А. М Олейников
В. Н. Мартынов

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Севастополь
2013

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ББК 39.26 + 39.46
О12
УДК .621.313(075)

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. зав. кафедрой Электромеханики Национального технического университета «КПИ» В.Ф. Шинкаренко;

д-р техн. наук, проф. кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского Национального технического университета Е.М. Потапенко;

д-р техн. наук, проф. декан факультета Автоматики Одесской национальной морской академии Л.В. Вишневский.

Научный редактор – д-р техн. наук, проф. кафедры СПЭМС СевНТУ Э.Ф. Бабуров.

Олєйников О.М.

О12 Судові електричні машини та их експлуатація: учеб. посібник/О.М. Олєйников, В.Н. Мартинов. Під ред. проф. О.М. Олєйникова. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013. – 376 с.

ISBN

Розглянуті принципи дії, конструктивні особливості, основи теорії, характеристики, режими роботи суднових електричних машин і трансформаторів.

Студентам, що навчаються у вищих навчальних закладах за фахом «Експлуатація суднового електроустаткування та засобів автоматики». Може використовуватись у системі підвищення кваліфікації і перепідготовки суднових електромеханіків.

Олейников А.М.

О12 Судовые электрические машины и их эксплуатация: учеб. пособие/А.М.Олейников, В.Н. Мартынов. Под ред. проф. А.М. Олейникова. – Севастополь. Изд – во СевНТУ, 2013. – 376 с.

ISBN

Рассмотрены принципы действия, конструктивные особенности, основы теории, характеристики, режимы работы судовых электрических машин и трансформаторов.

Студентам, обучающимся в высших учебных заведениях по специальности «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики». Может быть также использовано в системе повышения квалификации и переподготовки судовых электромехаников.

Рекомендовано к печати Ученым Советом СевНТУ, протокол № ….. от …….. 2013 г.

ISBN 978-966 -2960-72-3 ББК 39.26 + 39.46

Издательство СевНТУ, 2013

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Важное место в обеспечении безопасности мореплавания, эффективности использования морских и речных судов занимают судовые электрические машины, являющиеся основными источниками электроэнергии на судах и многочисленными ее преобразователями. Мощности, число и номенклатура судовых электрических машин с каждым годом увеличиваются, поэтому специалисты, занимающиеся их проектированием, изготовлением и эксплуатацией должны хорошо знать их конструкцию, вопросы теории, особенности работы и характеристики. При написании данного учебного пособия авторы преследовали цель в наиболее доступной форме ознакомить студентов – будущих судовых электромехаников с кругом этих вопросов.

Порядок изложения материала в учебном пособии подобен порядку, принятому в большинстве учебников по электрическим машинам для студентов электромеханических специальностей. В изложении материала по каждому типу электрической машины сначала рассматриваются вопросы общей теории, а затем особенности конструкции и характеристики.

В главе 10 данного учебного пособия авторы ставили задачу в наиболее доступной форме ознакомить будущих судовых электромехаников с основными правилами технической эксплуатации СЭО и СА, обеспечивающими высокую эффективность и надежность в работе, научить ориентироваться в решении специфической группы вопросов в судовых условиях, дать практические рекомендации по техническому обслуживанию, обеспечивающему постоянную готовность к использованию и безотказность в работе.

Изучение дисциплины базируется на базовых вузовских курсах физики, высшей математики, теоретической электротехники, электротехнических материалов и метрологии.

Пособие подготовлено с учетом действующей программы подготовки судовых электромехаников в морских учебных заведениях Украины.

Работа между авторами распределилась следующим образом: главы 1,4,5,7,8,9 написаны профессором А. М. Олейниковым; предисловие, введение, главы 2,3,6,10 – доцентом В. Н. Мартыновым.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность рецензентам – д-ру техн. наук, профессору В. Ф. Шинкаренко; д-ру техн. наук, профессору Е.М. Потапенко; д-ру техн. наук, профессору
Л. В. Вишневскому за полезные советы и рекомендации, а также д-ру техн. наук, профессору Э.Ф. Бабурову за тщательное редактирование рукописи.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Введение. Условия работы, особенности конструкции судовых электрических машин

Современные суда характеризуются высокой степенью электрификации, а самыми многочисленными элементами судового электрооборудования являются судовые электрические машины (СЭМ). Они являются и источниками электроэнергии на судне, и основными ее потребителями, приводящими в движение большое количество различных судовых механизмов, к которым относятся насосы, вентиляторы, грузоподьемные и якорно - швартовные устройства, средства активного управления движением судна и т.д.

Мощность многих судовых механизмов составляет сотни киловатт и имеет тенденцию к дальнейшему увеличению. В частности, значительную мощность (до тысячи киловатт и выше) имеют средства активного управления движением судна – крыльчатые движители, подруливающие устройства, гребные электродвигатели и т. д. Поэтому должны быть изучены проблемы работы таких мощных потребителей при питании их от судовых автономных источников электроэнергии соизмеримой мощности. Особенно это касается короткозамкнутых асинхронных электродвигателей.

Электрические машины на судне работают в значительно более тяжелых условиях, чем в береговых промышленных установках. Объясняется это тем, что судно является мореходным сооружением и электрические машины подвержены воздействию повышенной вибрации и сотрясениям, периодическим наклонам при кренах и дифферентах, вызываемых качкой судна. Кроме того, электрические машины на судне работают в условиях высокой влажности воздуха, наличия паров нефтепродуктов и масел, высокой окружающей температуры и ее резкими перепадами. Характерным для судов является также возможность попадания брызг и заливания морской водой электрических машин.

По указанным причинам СЭМ должны обладать повышенной ударостойкостью, высокой эксплуатационной надежностью, быть малошумными, иметь малые габариты и массу, а их изоляция должна обладать повышенной влаго - , водо - и маслостойкостью.

Требованиями Морского регистра Украины установлено, что СЭМ должны надежно работать при:

- длительном крене судна до 15° и дифференте до 10°;
- бортовой качке до 22,5°;
- относительной влажности воздуха 75% ± 3% и температуре 45°С ± 2°С или при 80% ± 3% и 40°С ± 2°С, или при 95% ± 3% и 25°С ± 2°С;
- температуре окружающего воздуха от -40 до +45°С, в тропиках до +50°С;
- в условиях вибрации с частотой от 5 до 60 Гц и амплитудой 1,0мм;
- периодических ударных нагрузках с ускорением 3g при частоте от 4 до 80 ударов в минуту.

Серийные машины общепромышленного назначения обычно не удовлетворяют этим требованиям, поэтому электромашиностроительные заводы разрабатывают и изготовляют специальные серии судовых электрических машин.

С целью защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями, находящимися внутри корпуса машины, а также защиты от попадания внутрь посторонних твердых тел и воды корпуса СЭМ в зависимости от условий имеют

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

различные степени защиты. Условное обозначение степени защиты содержит данные в следующей последовательности:

- буквенная часть IP – начальные буквы слов Internation Protection;
- условное цифровое обозначение степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями и от попадания внутрь посторонних твердых тел;
- условное цифровое обозначение степени защиты от попадания внутрь корпуса воды.

Например, степень защиты IP56 – по первой цифре 5 соответствует полной защите персонала от соприкосновения с вращающимися и токоведущими частями внутри машины, по второй цифре 6 – защита СЭМ, расположенной на палубе судна, при захлестывании морской волной.

По способам охлаждения СЭМ различают: с естественным охлаждением (без вентиляции), с самовентиляцией и с независимым охлаждением. На судах электрические машины с естественным охлаждением применяются редко. Наибольшее распространение получили СЭМ с самовентиляцией внутреннего пространства вентилятором на валу и с самовентиляцией наружной поверхности вентилятором на валу (обдуваемые).

Условное обозначение способа охлаждения содержит данные в следующей последовательности:

- буквенная часть IC – начальные буквы слов International Cooling;
- условное обозначение прописной буквой вида хладоагента (если хладоагент воздух, то это обозначение может быть опущено);
- условное цифровое обозначение устройства цепи для циркуляции хладоагента;
- условное цифровое обозначение способа перемещения хладоагента.

Например, способ охлаждения ICO141 – двигатель, обдуваемый наружным вентилятором, расположенным на валу машины.

Под конструктивным исполнением машины по способу монтажа понимают исполнение составных частей машины относительно элементов крепления (подшипников и концов вала). Способ монтажа определяет, как располагается машина в пространстве на месте установки, способ крепления и сочленение с механизмом.

Условное обозначение конструктивного исполнения по способу монтажа содержит данные в следующей последовательности:

- буквенная часть IM – начальные буквы слов International Mounting;
- условное цифровое обозначение группы конструктивных исполнений;
- условное цифровое обозначение способа монтажа;
- условное цифровое обозначение конца вала.

Например, способ монтажа IM2081 – двигатель на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите, с одним цилиндрическим концом вала.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА. ФИЗИКА ОСНОВНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

1.1. Принцип действия машин постоянного тока

Электрическими машинами называются устройства, предназначенные для преобразования механической энергии вращения в электрическую (генератор) и наоборот, электрической энергии в механическую (двигатель). Работа электрической машины основана на единстве законов электромагнитной индукции и электромагнитных сил.

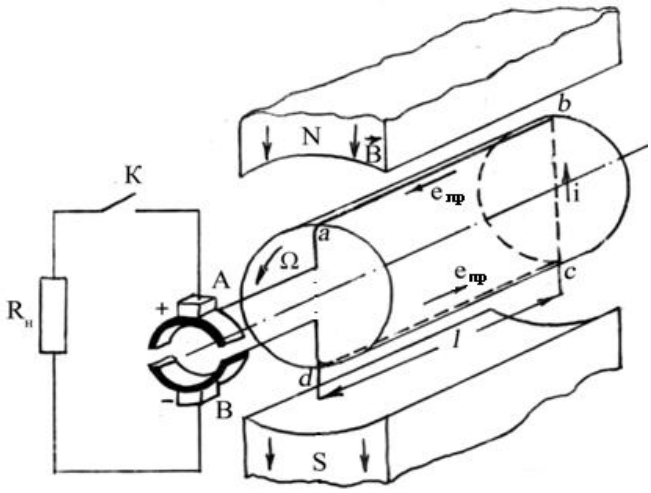


Рисунок 1.1 – К принципу действия машины постоянного тока

Рассмотрим устройство, состоящее из двух магнитных полюсов, создающих постоянное магнитное поле, и якоря – стального цилиндра с уложенным на нем витком из электропроводного материала. Концы витка присоединены к двум металлическим полукольцам, изолированным друг от друга и от вала. Полукольца соприкасаются с неподвижными щетками, соединенными с внешней цепью (рисунок 1.1).

При вращении якоря в соответствии с законом электромагнитной индукции в проводниках витка ab и cd при пересечении ими магнитного поля индуктируется ЭДС, равная

$$e_{пр} = B\ell v, \qquad (1.1)$$

где v – линейная скорость движения проводника относительно магнитного поля; B – индукция магнитного поля; ℓ – длина активной части проводника.

Направление ЭДС в проводниках ab и cd определяется по правилу правой руки. По контуру abcd эти ЭДС складываются и, так как верхний и нижний проводники находятся в одинаковых магнитных условиях, ЭДС витка равна

$$e_в = 2e_{пр} . \qquad (1.2)$$

Характер изменения во времени ЭДС в проводнике при вращении определяется характером распределения индукции B в зазоре, которое по окружности якоря неравномерное; так как магнитное сопротивление $R_μ$ магнитному потоку различное, под полюсами индукция B имеет максимальное значение, в промежутке между полюсами она уменьшается, достигая на линии qq нулевого значения (рисунок 1.2,а). Линия dd, проходящая через центр якоря по середине полюсов, называется продольной осью машины, а линия qq, проходящая через центр

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

якоря по середине между полюсами - поперечной. Поперечную ось также называют геометрической нейтралью. Часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс, называют полюсным делением и обозначают τ.

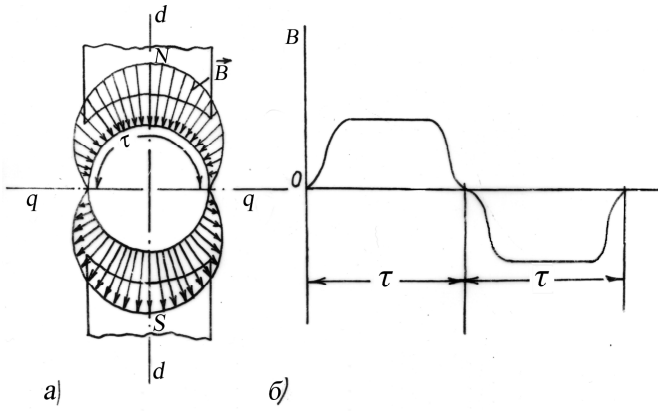


Рисунок 1.2 – Распределение магнитной индукции в зазоре

При вращении якоря через каждые полоборота проводники ab и cd оказываются в поле противоположных полюсов, поэтому направление ЭДС в них меняется на противоположное. Таким образом, при вращении якоря в витке индуктируется переменная ЭДС, а для получения во внешней цепи постоянного тока устанавливают специальный механический переключатель, называемый коллектором.

Проводники ab и cd присоединяются к полукольцам, изолированным друг от друга и от вала. Полукольца (пластины коллектора) соприкасаются с неподвижными щетками, соединенными с внешней цепью. При вращении якоря каждая из щеток будет соприкасаться только с той коллекторной пластиной и соответственно только с тем из проводников, который находится под полюсом данной полярности. Направление ЭДС в витке изменяется на линии геометрической нейтрали и в этот же момент происходит переключение полуколец к щеткам А и В. В результате полярность щеток в процессе работы машины остается неизменной, а ЭДС и ток во внешней цепи становятся постоянными по направлению и переменными по величине (рисунок 1.3).

Таким образом, коллектор играет роль механического переключателя сторон витка к щеткам, т.е. является выпрямителем. Чтобы сгладить пульсации ЭДС и тока во внешней цепи, на якоре располагают несколько витков, присоединенных к соответствующим парам коллекторных пластин и сдвинутых относительно друг друга на некоторый угол. Практически уже при 16 витках на якоре пульсации ЭДС становятся незаметными и ток во внешней цепи можно считать постоянным не только по направлению, но и по величине. Таким образом, мы получили генератор постоянного тока.

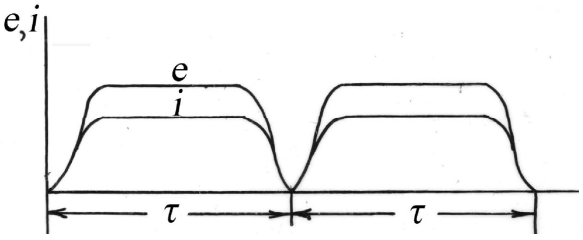


Рисунок 1.3 - Выпрямленные ЭДС и ток в витке при щетках, установленных на нейтрали

Рассмотрим работу данной системы в режиме двигателя. Если к щеткам приложить напряжение от внешнего источника электроэнергии, то в витке потечёт ток. Согласно закону электромагнитных сил на каждую сторону витка действует сила

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$f_{эм} = B\ell i. \quad (1.3)$$

Эта сила создает вращающий момент, действующий на виток и равный

$$M_{эм} = f_{эм} D_a/2, \quad (1.4)$$

где D_a – диаметр якоря.

Под действием совокупности моментов якорь начинает вращаться, преодолевая момент сопротивления на валу. После прохождения сторонами витка линии геометрической нейтрали они попадают в зону полюса противоположной полярности и в это же время в них изменяется и направление тока, что осуществляется с помощью коллектора. В результате направление момента остается прежним, и якорь продолжает вращаться в том же направлении. В этом случае коллектор выполняет роль инвертора – преобразователя постоянного тока в переменный.

1.2. Устройство машины постоянного тока

Электротехническая промышленность в настоящее время выпускает электрические машины постоянного тока для работы в различных условиях. Судовые машины имеют особенности конструкции отдельных узлов, но их общая конструктивная схема одинакова.

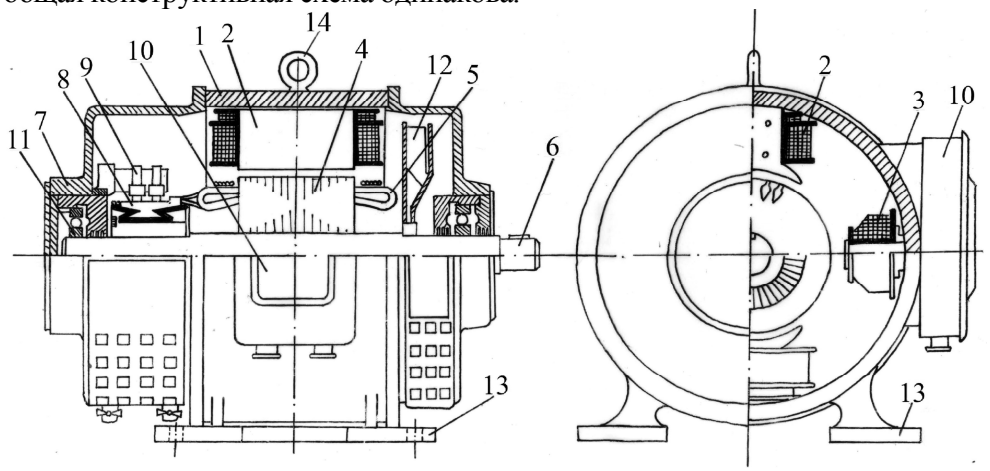


Рисунок 1.4 – Устройство машины постоянного тока

На рисунке 1.4 приведены продольный и поперечный разрез машины постоянного тока. Она состоит из 2–х основных частей: неподвижной – статора и вращающейся – якоря, между которыми имеется воздушный зазор δ. Статор, являющийся индуктором, т.е. такой частью машины, в котором создается магнитное поле, состоит из станины I, главных 2 и добавочных 3 полюсов.

К статору относятся также подшипниковые щиты 7 с подшипниками 11. На статоре крепятся щеточный аппарат 9 и коробка выводов 10. Якорь состоит из сердечника якоря 4 и коллектора 8, насаженных на вал 6. В машинах с самовентиляцией на валу крепится вентилятор 12.

Станина служит в качестве магнитопровода и одновременно является конструктивной основой, к которой крепятся главные и добавочные полюсы и подшипниковые щиты. Она представляет собой полый цилиндр, отлитый или сваренный из чугуна или стали. У крупных машин станина делается разъемной. На судах для удобства обслуживания и ремонта применяются также машины с поворотной станиной. Часть станины, по которой замыкаются магнитные потоки главных и

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

добавочных полюсов, называется ярмом 1. Вместе со станиной отливаются лапы 13 для крепления машины к фундаменту. На станине устанавливается рым-болт 14 для подъема машины.

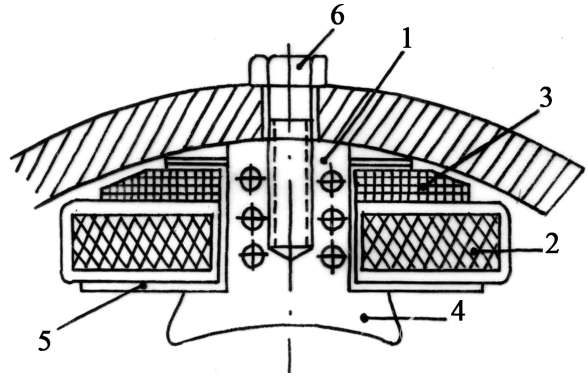


Рисунок 1.5 – Главный полюс машины постоянного тока

Главные полюсы предназначены для создания в машине магнитного потока необходимой величины. Главный полюс (рисунок 1.5) состоит из сердечника 1 и обмоток возбуждения 2 и 3, выполненных в виде катушек. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник заканчивается полюсным наконечником 4, с помощью которого обеспечивается требуемое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре.

Сердечник полюса набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,5…1,0 мм., покрытых изоляционным лаком для уменьшения потерь от вихревых токов, вызванных пульсацией магнитного потока из–за зубчатости якоря. Листы стали спрессовывают и скрепляют шпильками. Катушки обмоток возбуждения наматываются на изолирующий каркас 5, а затем надеваются на сердечник.

По отношению к обмотке якоря обмотки возбуждения могут включаться параллельно и последовательно. Катушки параллельной обмотки 2 состоят из большого числа витков провода малого сечения. Катушки последовательной обмотки 3 состоят из малого числа витков провода большого сечения, по которым проходит большой ток якоря. Для улучшения изоляции катушки компаундируют, т.е. пропитывают изоляционными лаками (компаундами) в вакууме при повышенной температуре, а затем сушат в специальных печах. Полюс в собранном виде крепится к станине болтами 6.

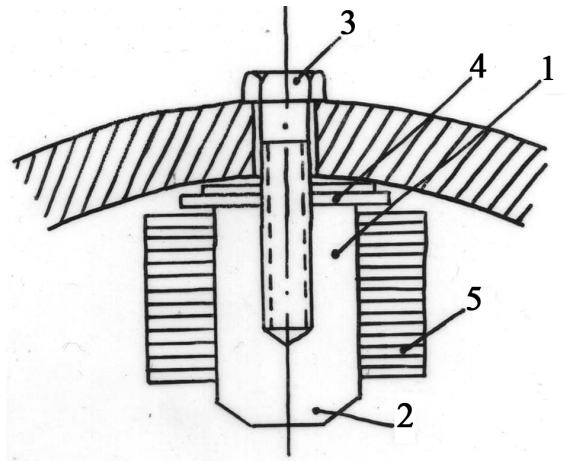


Рисунок 1.6 – Добавочный полюс машины постоянного тока

Добавочные полюсы служат для улучшения коммутации машины, т.е. обеспечивают безыскровую работу щеток и коллектора.

Они состоят из сердечника 1 и полюсной катушки 5 (рисунок 1.6) и устанавливаются между главными полюсами по линии геометрической нейтрали. Сердечник имеет наконечник 2 опреде ленной формы. Катушка изготавливается из полосовой меди большого сечения, так как она включается последовательно в цепь якоря и по ней проходит большой ток. Величина зазора δ между этим полюсом и якорем регулируется при наладке работы

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

машины с помощью магнитных и немагнитных прокладок 4 между полюсом и станиной. Добавочные полюсы крепятся к станине болтами 3.

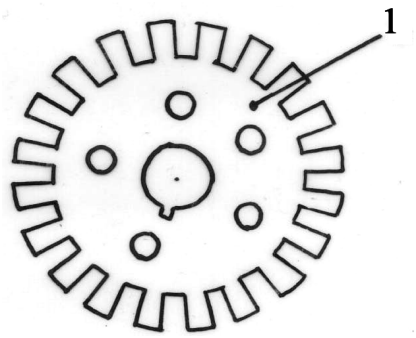


Рисунок 1.7 – Лист сердечника якоря машины постоянного тока

Якорь состоит из сердечника 4, обмотки 5, вала 6 и конструктивных деталей для их крепления.

Сердечник якоря – это стальной цилиндр, набранный из штампованных листов 1 (рисунок 1.7) электротехнической стали толщиной 0,5 мм, которые изолируются друг от друга лаком для уменьшения потерь от вихревых токов.

В листах штампуются пазы для размещения в них обмотки якоря и отверстия для насаживания сердечника на вал якоря, для стяжных шпилек и осевой вентиляции.

Пакет железа якоря фиксируется на валу шпонкой, а с торцов стягивается нажимными кольцами. В больших машинах якорь состоит из нескольких пакетов штампованных листов, между которыми делаются промежутки для лучшего охлаждения машины (радиальная вентиляция). Часть сердечника якоря, занятая пазами, образует зубцовую зону.

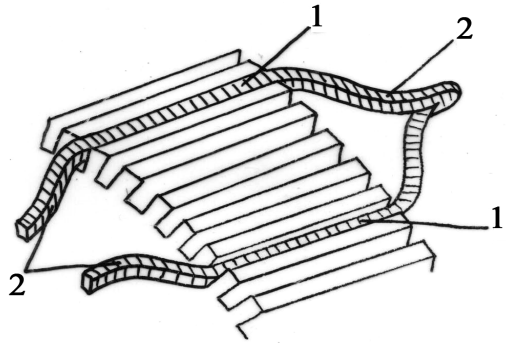


Рисунок 1.8 – Укладка секций

Обмотка якоря выполняется из изолированного провода круглого или прямоугольного сечения. Она состоит из отдельных элементов – секций, образованных из одного или нескольких витков (рисунок 1.8). Секции изготавливаются по шаблонам.

Часть секции 1, заложенная в пазы сердечника якоря, называется пазовой или активной частью. Часть секции 2, расположенная вне сердечника – в воздухе и соединяющая активные части, называется лобовой частью (лобовые соединения). Концы секций 2 припаиваются к коллекторным пластинам. Для крепления секций в пазах применяются деревянные, гетинаксовые или текстолитовые клинья. Кроме витковой изоляции обмотка имеет пазовую изоляцию от сердечника. Лобовые части по наружной поверхности стягиваются с помощью проволочного бандажа.

Электроизоляционные материалы, применяемые для изоляции обмоток, по степени термостойкости делятся на классы, которые допускают определенную температуру нагрева. В машинах постоянного тока применяются в основном классы А (до 105^0 С), Е (до 120^0 С), В (до 130^0 С), F (до 155^0 С), Н (до 180^0 С), С (свыше 180^0 С).

Коллектор (рисунок 1.9) набирается из медных пластин 1, изолированных друг от друга и от вала, на котором он крепится с помощью миканитовых прокладок 8 и манжет 5,7.

Пластины имеют форму ласточкиного хвоста 2. В два конусообразных углубления коллектора вставляются изолированные нажимные конусы 3, 4, которые стягивают коллекторные пластины в осевом направлении. В собранном виде коллектор спрессовывают в горячем

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

состоянии, после чего обтачивают для придания ему строго цилиндрической формы.

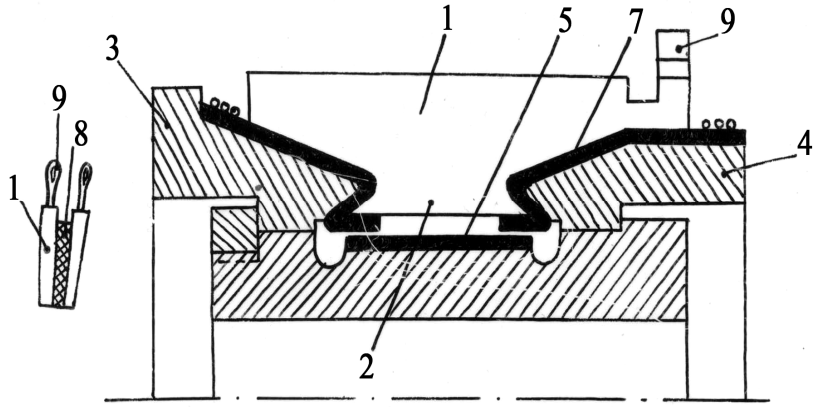


Рисунок 1.9 – Продольный разрез коллектора

В зависимости от размера якоря и коллектора концы секций обмотки впаиваются в коллекторные пластины непосредственно или через специальные медные соединения – петушки 9. Коллектор жестко крепится на валу ротора рядом с сердечником якоря.

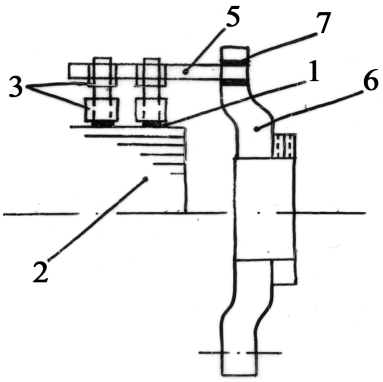


Рисунок 1.10 – Щеточное устройство

Щеточное устройство – предназначено для обеспечения электрической связи между неподвижными зажимами, соединенными с внешней цепью, и вращающейся обмоткой якоря (через коллектор) (рисунок 1.10). Оно состоит из щеток 1, щеткодержателей 3, пальцев 5, траверзы 6 и соединительных шин.

Непосредственный контакт с коллектором 2 имеет щетка. Она выполняется из специальным образом обработанной смеси угля, графита и других компонентов в виде прямоугольной призмы и помещается в обойму щеткодержателя 3. Щетка может перемещаться в обойме в радиальном по отношению к коллектору направлении и для плотного прилегания прижимается к нему пружиной через нажимной рычаг. Щеткодержатели крепятся к пальцам 5, которые заделываются в траверзу 6 через изоляционные втулки 7. На одном пальце может быть от 2 до 10 щеток, которые для равномерного износа коллектора располагаются на его поверхности в шахматном порядке и соединяются с пальцами медными гибкими тросиками. Число пальцев всегда равно числу главных полюсов. Пальцы, имеющие одинаковую полярность, соединяются посредством соединительной шины, от которой делается отвод в клеммную коробку машины или к обмотке дополнительного полюса.

Траверса может крепиться к подшипниковым щитам, станине или фундаментной плите. Крепление позволяет поворачивать всю систему щеток относительно станины.

Клеммная коробка предназначается для размещения изоляционной панели с клеммами, к которым подсоединяются выводы обмоток машины для соединения с внешней электрической сетью.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

1.3. Обмотки якорей машин постоянного тока

1.3.1. Принципы построения обмоток

Обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему изолированных проводников, определенным образом уложенных в пазы сердечника якоря и присоединенных к коллектору. К обмотке якоря предъявляются ряд требований. Она должна обеспечить получение необходимой ЭДС, прохождение тока номинальной величины и безыскровую работу щеточного контакта. При этом она должна иметь достаточную электрическую, термическую и механическую прочность, обеспечивать возможно меньший расход материалов и максимальное значение КПД.

Обмотка якоря состоит из отдельных элементов – секций. Секция – это часть обмотки, содержащая один или несколько витков и присоединенная к двум коллекторным пластинам. Несколько секций, скрепленных между собой для удобства укладки в пазы якоря, образуют катушку.

Секции в виде катушек являются основным конструктивным элементом при образовании якорной обмотки. Они укладываются в пазы в два слоя так, чтобы левые стороны секций располагались в верхней части паза, а правые – в нижней. Такая обмотка носит название двухслойной (рисунок 1.11).

Рисунок 1.11 – Расположение секций двухслойной обмотки

Части секций, лежащие в пазу, называются активными сторонами секции, они находятся в магнитном поле полюсов и при вращении якоря в них индуктируется ЭДС. Части секции, находящиеся вне пазов, называются лобовыми частями. Они находятся вне основного магнитного потока и ЭДС в них не индуктируется.

Верхняя сторона одной секции и нижняя сторона другой, уложенные в одном пазу, образуют так называемый элементарный паз (обозначается u). В реальном пазу может располагаться несколько элементарных пазов.

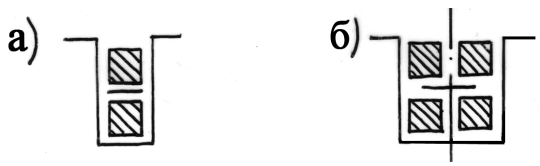


Рисунок 1.12 – Пазы якоря

На рисунке 1.12,а показан разрез элементарного паза и разрез паза (рисунок 1.12,б), который имеет u = 2 элементарных паза.

Так как секция имеет две активные стороны, то каждой секции в обмотке соответствует один элементарный паз.

Концы секции присоединяются к коллекторным пластинам, при этом к каждой пластине присоединяют конец одной секции и начало следующей, в результате чего все секции соединяются последовательно и на каждую секцию приходится одна коллекторная пластина (рисунок 1.13).

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

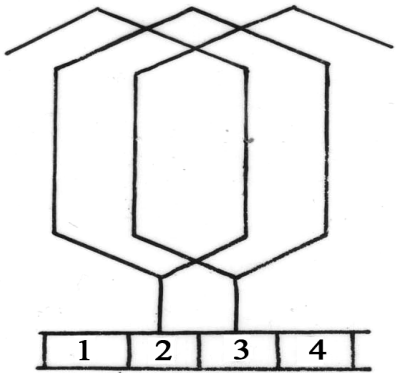


Рисунок 1.13 - Образование простой петлевой обмотки

Чтобы ЭДС, индуктируемые в активных сторонах секции, складывались и величина суммарной ЭДС секции при этом была наибольшей, необходимо секцию располагать в пазах сердечника так, чтобы ширина ее была равна или незначительно отличалась от полюсного деления τ. При этом с секцией будет сцепляться полный поток полюсов и ЭДС в ней будет достигать максимального значения.

Для характеристики обмотки необходимо знать как расположены ее секции в магнитном поле и как они соединены между собой. Это указывается на развернутой схеме обмотки. На этой схеме цилиндрические поверхности якоря и коллектора, разрезанные вдоль оси машины в любом месте, развертывают на плоскость и представляют прямоугольниками. Диаметр коллектора условно принимается равным диаметру якоря. Пазы якоря и все соединения проводников изображают отрезками прямых линий. Секции для простоты изображаются всегда одновитковыми (W_c =1). Активные стороны секций, находящиеся в нижнем слое паза, вычерчивают пунктиром.

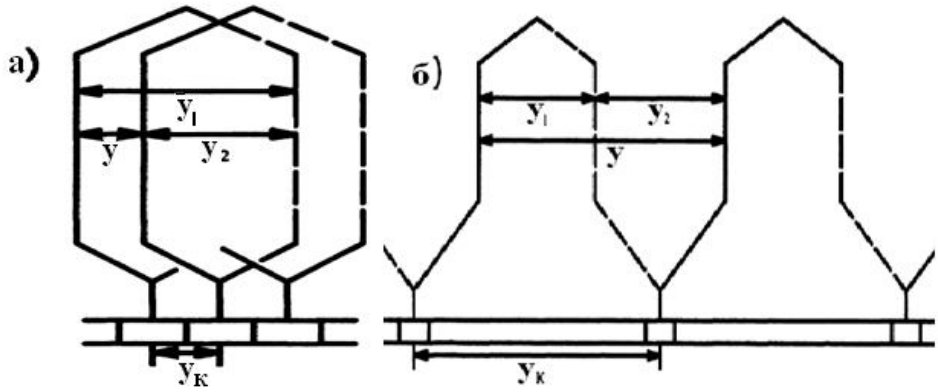


Рисунок 1.14 – Шаги простой петлевой (а) и простой волновой (б) обмоток

Для расчета, составления схем и монтажа обмотки используются понятия шагов обмотки. Расстояние между двумя активными сторонами секции, определяющие ее ширину (рисунок 1.14), называется первым частичным шагом обмотки $\mathbf{y_1}$. Расстояние между правой активной стороной секции и левой активной стороной последующей секции называется вторичным частичным шагом обмотки $\mathbf{y_2}$. Расстояние между началами двух последовательно соединенных секций называется результирующим шагом обмотки y. Шаги y_1, y_2, y измеряются обычно числом элементарных пазов. Расстояние между коллекторными пластинами, к которым присоединяются начало и конец секции, измеренное числом коллекторных пластин, называется шагом обмотки по коллектору $y_к$.

Так как начало следующей секции присоединяется к концу предыдущей, то $y_к$ равен числу коллекторных делений между началом одной секции и началом следующей. По якорю это соответствует резуль-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

тирующему шагу у. Таким образом, ход обмотки по коллектору соответствует ходу обмотки по якорю. Это обеспечивает выполнение симметричной обмотки и справедливо для всех типов обмоток якоря.

По внешнему очертанию контуров, образуемых последовательно соединенными секциями, различают петлевые, волновые и комбинированные обмотки.

1.3.2. Простая петлевая обмотка

Простая петлевая обмотка – это такая обмотка, в которой начало и конец секции присоединяются к рядом лежащим коллекторным пластинам. Начало второй секции присоединяется к коллекторной пластине вместе с концом первой секции и т.д. (рисунок 1.14,а). За один обход поверхности якоря укладываются все секции обмотки и она замыкается. Соединенные секции образуют петли, поэтому обмотка называется петлевой. Для такой обмотки $y_к = 1$.

При выполнении петлевой обмотки возможны два случая:

1. Конец секции присоединяется к коллекторной пластине, находящейся справа от исходной. Такую обмотку называют правоходовой и для нее $y_к = 1$.

2. Конец секции присоединяется к коллекторной пластине, находящейся слева от исходной. Такую обмотку называют левоходовой и для нее $y_к = -1$.

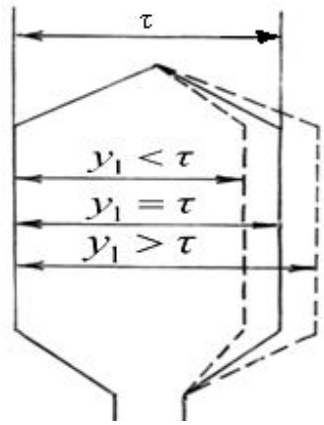


Рисунок 1.15 –Секции с полным, укороченным и удлиненным шагом

В общем случае простой петлевой обмотки $y_к = \pm 1$.

Из рисунка 1.14 видно, что между шагами обмотки существует следующая связь

$$y_2 = y_1 - y. \qquad (1.5)$$

Если полюсное деление якоря измерять в элементарных пазах, то первый частичный шаг находится по формуле

$$y_1 = \tau = \frac{z_э}{2p} \pm \xi, \qquad (1.6)$$

где $z_э$ – число элементарных пазов; p – число пар полюсов машины; ξ - наименьшая дробь, при которой y_1 становится целым числом.

Эта формула справедлива для любого типа обмотки. При $\xi = 0$, т.е. $y_1 = \tau$ получается обмотка с полным (диаметральным) шагом (рисунок 1.15); если $y_1 < \tau$ – обмотка с укороченным шагом; если $y_1 > \tau$ – обмотка с удлиненным шагом. Укорочение и удлинение шага обмотки ведет к уменьшению ЭДС, наводимой в секции. Однако при укорочении шага одновременно уменьшается длина лобовых частей, при удлиненном же шаге она возрастает.

Обмотки с удлиненным шагом, как правило, не применяются.

На рисунке 1.16 представлена развернутая схема простой петлевой обмотки с диаметральным шагом. Обмотка правоходовая.

Данные обмотки: *2p = 2;* $S = z_э = K = 12$; $w_s = 1$; $u_s = 1$; $y_1 = 6$; $y_2 = 5$; $y = y_к = +1$.

Порядок построения: 1–й верхний проводник соединяется с 7 нижним (т.к. y_1=6), 7 нижний – со 2–м верхним (т.к. y_2=5). Середина последнего соединения подводится к коллекторной пластине 2 (номер коллекторной пластины и номер присоединяемой к ней верхней сторо-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ны секции должны соответствовать). Далее 2–ой верхний проводник соединяется с 8–ым нижним и через коллекторную пластину 3 с 3–м верхним и т.д. в итоге обмотка должна замкнуться.

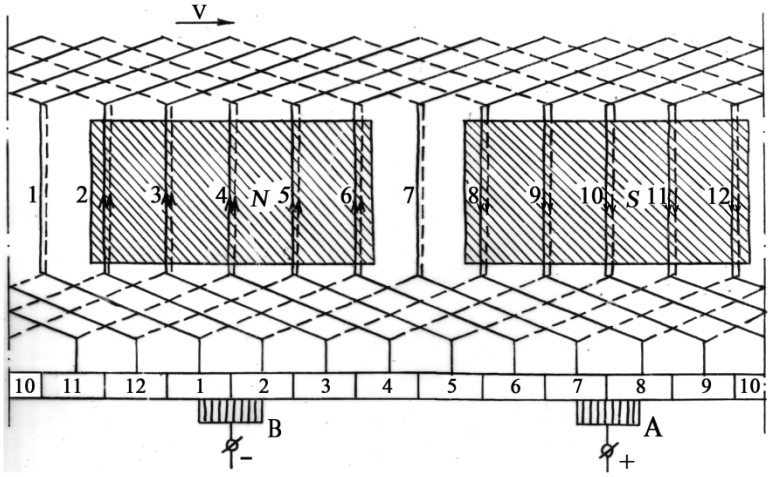


Рисунок 1.16 – Развернутая схема простой петлевой обмотки с диаметральным шагом

На развернутой схеме размечаем полюсы. В проводниках под полюсами указываем направление индуктируемых в них ЭДС. Направления ЭДС определяют, задаваясь направлением вращения якоря и считая, что полюсы находятся над обмоткой. Важным моментом здесь является расстановка щеток. Щетки на коллекторе располагаются на равном расстоянии по осям полюсов, как и в реальной машине. При этом щетки через коллекторные пластины соединяются с секциями обмотки, активные стороны которых находятся в межполюсных промежутках на линии "геометрической нейтрали". При сдвиге щеток с нейтрали ухудшаются характеристики машины, под щетками возникает сильное искрение, приводящее к разрушению щеток и оплавлению коллектора. Число щеток всегда равно числу полюсов. Ширина щетки для простых обмоток должна быть не менее ширины коллекторной пластины, $b_{щ} \geq b_{k}$. В многополюсных машинах щетки одинаковой полярности соединяются между собой сборными шинами или проводниками. Полярность щеток определяется по направлению ЭДС в активных сторонах секции. Если ЭДС стороны секции, примыкающей к щетке, направлена к ней, то щетка имеет положительную полярность (+), если от нее – отрицательную (–). При рассмотрении простой петлевой обмотки видно, что она состоит из двух частей, с последовательным соединением секций, расположенных между щетками разной полярности, называемых параллельными ветвями обмотки. В одну ветвь входят секции, начальные стороны которых находятся под северным полюсом, а в другую - под южным (рисунок 1.17). Следовательно, в простой петлевой обмотке столько параллельных ветвей, сколько полюсов

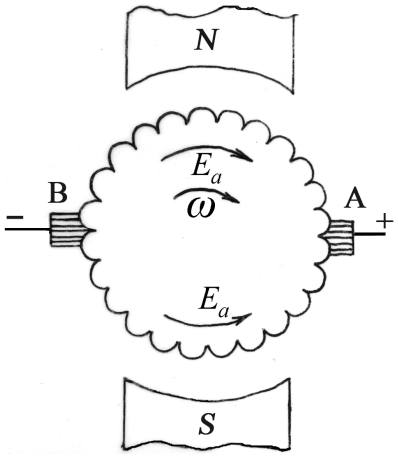


Рисунок 1.17 - Образование параллельных ветвей обмотки якоря

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$2a = 2p,$$

где a – число пар параллельных ветвей.

ЭДС секций в параллельной ветви складываются. Между щетками в раз ные моменты времени находятся различные секции, т.к. обмотка с коллектором при вращении непрерывно перемещается относительно щеток. Секции переходят из одной параллельной ветви в другую, поэтому общее число секций в параллельных ветвях и положение их в магнитном поле практически не меняется. Сумма ЭДС секций в параллельной ветви не меняется по величине и, следовательно, на щетках ЭДС неизменна.

Для большей наглядности обмотку якоря представляют в виде электрической схемы (рисунок 1.18), которая выполняется на основании развернутой схемы.

Для изображения электрической схемы берут щетки и имеющие с ними контакт коллекторные пластины. Затем делают обход секций обмоток, начиная с первой, и изображают их в виде отдельных витков, над которыми показывают направления индуктируемых ЭДС.

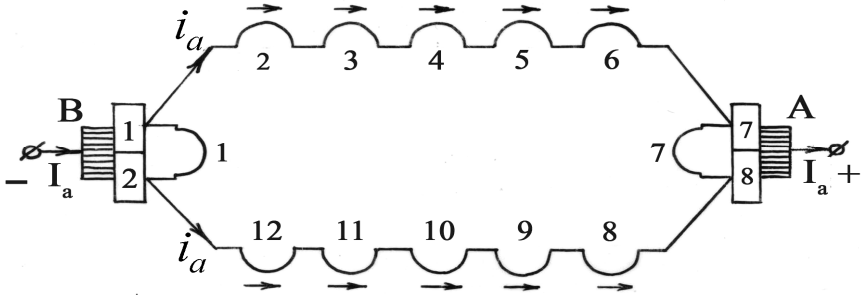


Рисунок 1.18 – Электрическая схема простой петлевой обмотки

Из электрической схемы видно, что обмотка (в нашем случае) состоит из 2–х параллельных ветвей (2a=2p=2) по 5 секций в каждой. ЭДС секций в пределах каждой параллельной ветви складывается, ЭДС на зажимах машины равна ЭДС одной параллельной ветви ($E = E_a$). Ток нагрузки I_a равен сумме токов параллельных ветвей (i_a).

$$I_a = 2a i_a. \qquad (1.7)$$

Секции 1 и 7 в рассматриваемый момент замкнуты через щетку накоротко и в создании ЭДС параллельных ветвей не участвуют. Это так называемые коммутируемые секции.

1.3.3. Принципы построения сложной петлевой обмотки

Сложная петлевая обмотка состоит из m простых обмоток, расположенных в пазах якоря, одна в промежутках между другими. Для этого при образовании каждой петли обмотки необходимо оставлять место для других простых обмоток, т.е. шаг $\mathbf{y_2}$ должен отличаться на m от шага секции y_1

$$y_2 = y_1 \pm m,$$

а шаг по коллектору и результирующий шаг должны быть равны

$$y_k = y = \pm m.$$

Следовательно, при образовании первой секции между коллекторными пластинами, к которым присоединяются концы этой секции, необходимо оставлять m - 1 коллекторных пластин для других простых

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

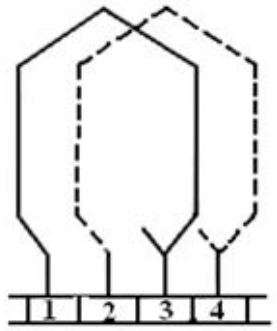


Рисунок 1.19 – Образование сложной петлевой обмотки

обмоток. На рисунке 1.19 показано образование сложной петлевой обмотки при m=2.

Сложная петлевая обмотка может быть однократно и многократно замкнутой. Чтобы все простые обмотки, составляющие сложную, были рабочими, ширина щетки принимается такой, чтобы она перекрывала не менее m коллекторных пластин. По отношению к внешней сети простые обмотки оказываются соединенными параллельно, поэтому сложная обмотка будет иметь число параллельных ветвей в m раз больше, чем у простой

$$2a = 2pm.$$

Расчет и построение схем сложных петлевых обмоток производится аналогично простым с учетом указанных особенностей.

1.3.4. Простая волновая обмотка

В простой волновой обмотке последовательно соединяются секции, находящиеся под разными парами полюсов, при этом расстояние между коллекторными пластинами, к которым присоединяются концы секции (рисунок 1.20), примерно равно двойному полюсному делению $y_k = 2\tau$, т.е. за один обход по якорю укладывается столько секций, сколько пар полюсов имеет машина. При этом конец последней по обходу секции присоединяют к коллекторной пластине, расположенной рядом с исходной слева или справа. В зависимости от этого обмотку называют левоходовой или правоходовой. Обычно применяют левоходовую обмотку.

За один обход перемещаются по коллектору на $p \cdot y_к$ коллекторных делений. Следовательно,

,

(–) – для левоходовой обмотки; (+) – для правоходовой обмотки.

Отсюда определяется шаг обмотки по коллектору

—.

Продолжая в том же порядке укладывать секции, замыкают обмотку на исходной коллекторной пластине. Исходя из принципа соответствия ход обмотки по якорю и коллектору и результирующий шаг равны $y = y_k$, а первый частичный шаг определяется по известной формуле

$$y_1 = \frac{z_э}{2p} \pm \xi.$$

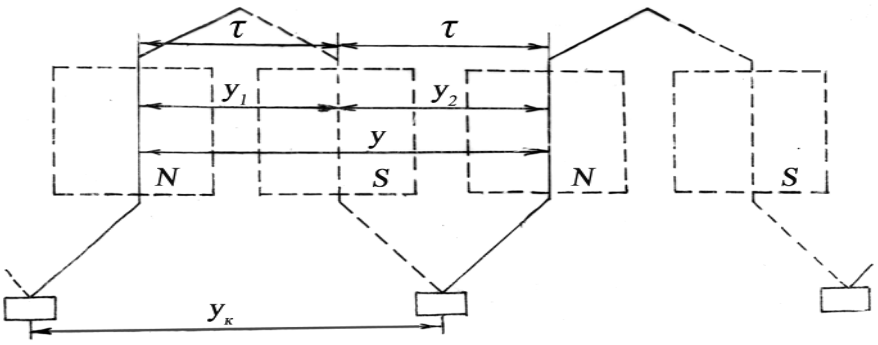


Рисунок 1.20 - Построение простой волновой обмотки

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Из рисунка 1.20 видно, что второй частичный шаг равен

$$y_2 = y - y_1 .$$

На рисунках 1.21 и 1.22 представлены развернутая и электрическая схема простой волновой обмотки с данными 2p=4, $S=z_э=K=13$; $W_s=1$; $u_s=1$; $y_1=3$; $y_2=3$, $y=y_к=6$.

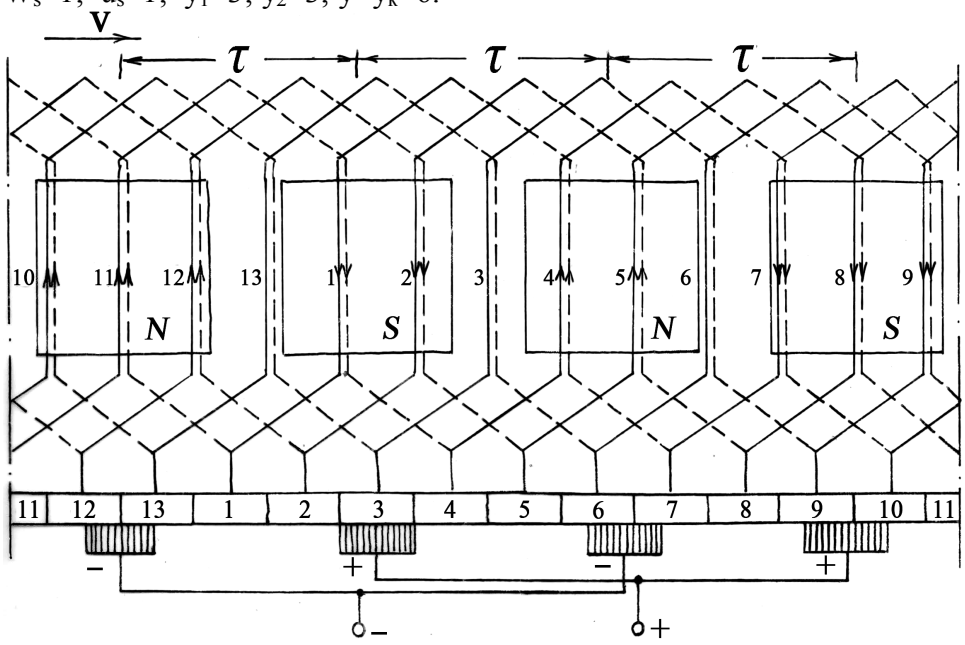


Рисунок 1.21 – Развернутая схема простой волновой обмотки

Порядок построения: 1-й верхний проводник соединяется с 4-м нижним ($y_1=3$), затем с 7-м верхним ($y_2=3$), с 10 нижним, с 13 верхним и т. д.

Соединения между секциями припаиваются к ближайшим коллекторным пластинам. Шаг по коллектору при этом получается $y_к=6$. Как видим из схемы, ток в обмотке якоря разветвляется по двум параллельным ветвям: первая ветвь – 12, 5, 11, 4 секции, вторая ветвь – 1, 8, 2, 9 секции.

Параллельная ветвь в волновых обмотках образуется из последовательно соединенных секций, лежащих под всеми полюсами машины. Число параллельных ветвей 2a у простой волновой обмотки независимо от числа полюсов машины равно 2, т.е. 2a=2. Секции 6, 13, 7 и 10, 3 не участвуют в наведении ЭДС, так как они оказываются короткозамкнутыми (коммутируемыми) при данном положении якоря.

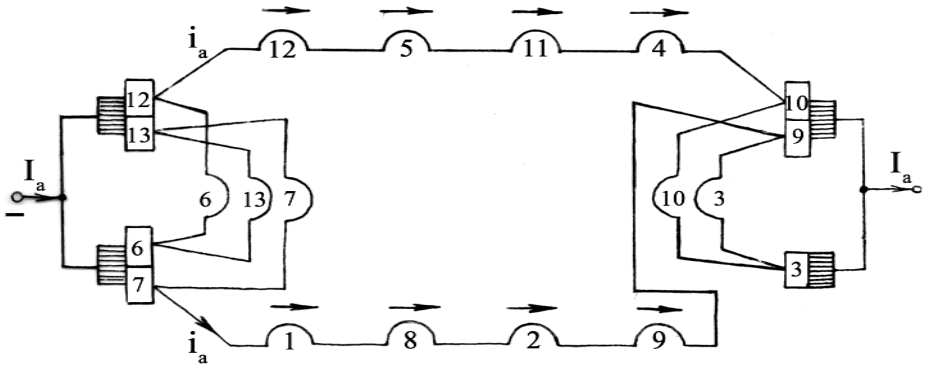


Рисунок 1.22 – Электрическая схема простой волновой обмотки

Простая волновая обмотка может быть выполнена только при определенном сочетании S и p. Например, при четном S и p результирующий

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

шаг y не получается в виде целого числа. Для образования волновой обмотки в этом случае одну секцию, оставляя ее на якоре, не включают в общую схему. Такую обмотку называют волновой с "мертвой" секцией.

1.3.5. Принципы построения сложной волновой обмотки

Сложная волновая обмотка состоит из m простых волновых обмоток, уложенных на одном якоре. После первого обхода якоря и коллектора переходят к коллекторной пластин, отстающей от исходной на m коллекторных делений. Следовательно,

$$y_k = \frac{k \mp m}{p}.$$

Остальные шаги рассчитываются аналогично простой волновой обмотке. Ширина щеток, как и в сложной петлевой обмотке, берется такой, чтобы каждая щетка одновременно перекрывала не менее m коллекторных пластин. Так как каждая простая волновая обмотка имеет две параллельные ветви, то сложная волновая обмотка будет иметь их в m раз больше т.е. 2a = 2m .

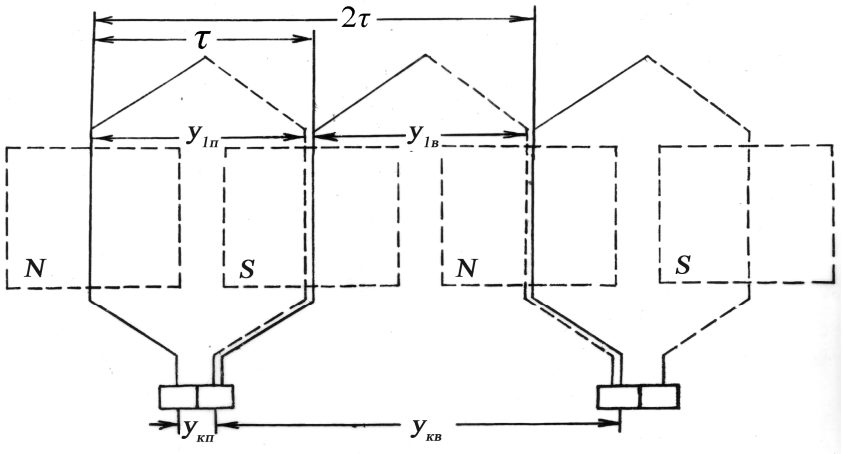


Рисунок 1.23 - Построение комбинированной обмотки

Комбинированная (лягушечья) обмотка представляет собой сочетание простой петлевой и сложной волновой обмоток, уложенных в одни и те же пазы и присоединенных в общему коллектору. При этом обе обмотки должны состоять из одинакового числа секций и параллельных ветвей $2a_п = 2p = 2a_в = 2m$.

Секции и принцип образования комбинированной обмотки показан на рисунке 1.23. Эти обмотки применяются в машинах большой мощности с тяжелыми условиями работы.

1.4. Электродвижущая сила обмотки якоря и электромагнитный момент

В соответствии с законом электромагнитной индукции в каждом отдельном проводнике обмотки якоря независимо от режима работы машины индуктируется ЭДС

$$e_x = B_x \ell v \qquad (1.8)$$

где B_x – магнитная индукция в месте размещения данного проводника;

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ℓ – длина якоря; v – линейная скорость движения проводника.

Распределение индукции в воздушном зазоре на одном полюсном делении τ имеет примерно трапециидальный характер, поэтому для определения ЭДС удобно воспользоваться средним значением магнитной индукции, приняв его равным высоте прямоугольника АВ′С′Д с основанием τ, площадь которого равна площади фигуры АВСД (см. рисунок 1.24)

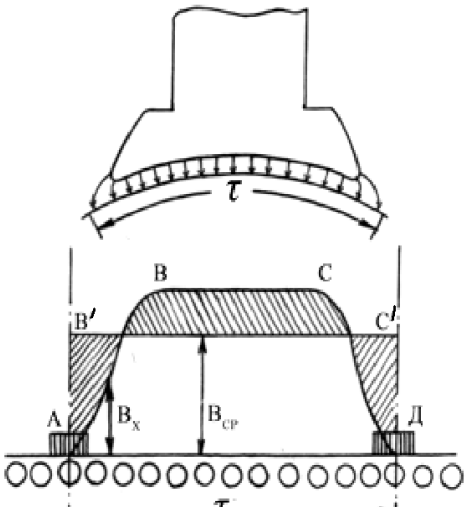


Рисунок 1.24 – Распределение магнитной индукции по ширине полюсного деления

$$B_{ср} = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} B_x\, dx. \qquad (1.9)$$

Тогда среднее значение ЭДС, индуктируемой в одном проводнике, равно

$$E_{ср} = B_{ср}\, \ell v. \qquad (1.10)$$

Обмотка якоря состоит из N проводников, однако, как было показано выше, ЭДС обмотки на зажимах якоря равна ЭДС одной параллельной ветви, в которую входит N/2a последовательно соединенных проводников. Поэтому ЭДС обмотки якоря равна

$$E = E_a = E_{ср}\frac{N}{2a} = B_{ср}\,\ell v\,\frac{N}{2a}, \qquad (1.11)$$

где $v = \frac{\pi D_a}{60} n$ – линейная скорость вращающегося якоря; n – частота вращения якоря, об/мин.

Учитывая, что $\pi D_a = 2p\tau$, можно записать

$$v = \frac{\tau\, 2p\, n}{60}. \qquad (1.12)$$

Подставив значение v в формулу получим

$$E = B_{ср}\,\ell\,\frac{\tau\, 2p\, n}{60}\,\frac{N}{2a}. \qquad (1.13)$$

В (1.13) произведение $\ell\cdot\tau = S$ представляет собой площадь, которую пронизывает магнитный поток Ф под одним полюсом, поэтому, $B_{ср}\,\ell\,\tau = B_{ср}\,S = \Phi$. Следовательно, можно записать

$$E = \frac{pN}{60a} = C_e \Phi n, \qquad (1.14)$$

где $\frac{pN}{60a} = C_e$ – для данной машины величина постоянная (постоянная ЭДС).

Таким образом, ЭДС машины, индуктируемая в проводниках обмотки якоря зависит от магнитного потока и частоты вращения якоря. Изменяя их, можно изменять величину ЭДС.

В соответствии с законом электромагнитных сил на каждый отдельный проводник обмотки якоря независимо от режима работы машины действует сила, равная

$$f_x = B_x\,\ell\, i_a, \qquad (1.15)$$

где i_a – ток секции якоря.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Сила f_x создает на валу машины момент равный

$$M_x = f_x \frac{D_a}{2} = B_x \ell \, i_a \frac{D_a}{2}. \quad (1.16)$$

В реальной машине под каждым полюсом находится N/2p проводников, поэтому общий момент равен сумме всех моментов, создаваемых каждым проводником под полюсом, умноженным на число полюсов 2p

$$M_a = 2p \sum_{x=1}^{N/2p} M_x = 2p\ell i_a \sum_{x=1}^{N/2p} B_x \, . \quad (1.17)$$

При достаточно большом числе проводников сумма $\sum_{x=1}^{N/2p} B_x$ равна среднему значению индукции $B_{ср}$, умноженному на число проводников под одним полюсным делением

$$\sum_{x=1}^{N/2p} B_x = B_{ср} \frac{N}{2p}, \quad (1.18)$$

где по аналогии с ЭДС

$$B_{ср} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_x \, dx. \quad (1.19)$$

Кроме того, нужно учесть , что

$$i_a = \frac{I_a}{2a} \, . \quad (1.20)$$

Подставим выражения (1.18) и (1.20) в формулу (1.17), получим

$$M_a = 2p\ell \frac{I_a}{2a} \frac{D_a}{2} B_{ср} \frac{N}{2p}.$$

В этом выражении можно заменить $B_{ср} \ell \tau = B_{ср} S = \Phi$ и записать $D_a = \frac{2p\tau}{\pi}$, тогда момент машины запишется в виде

$$M_a = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi = C_м \Phi I_a \, , \quad (1.21)$$

где $\frac{pN}{2\pi \cdot a} = C_м$ – для данной машины величина постоянная (постоянная момента).

Таким образом, из полученного выражения видим, что электромагнитный момент машины постоянного тока зависит от тока в якоре, магнитного потока и постоянной величины $C_м$.

1.5. Принципы расчета магнитной цепи машины постоянного тока

Для получения в машине постоянного тока заданных параметров в ней необходимо наличие определенного магнитного потока Ф, величина которого может быть определена из соотношения

$$\Phi = \frac{E_a}{c_e n}.$$

Магнитный поток в машинах постоянного тока создается под действием магнитодвижущей силы (МДС) обмоток возбуждения глав-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ных полюсов и замыкается между разноименными полюсами по определенному пути, который называется магнитной цепью машины.

На рисунке 1.25 показана магнитная цепь пары полюсов четырехполюсной машины.

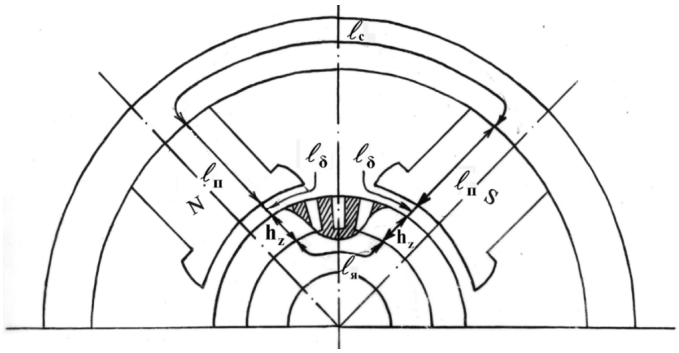


Рисунок 1.25 – Магнитная цепь машины постоянного тока

Магнитная цепь симметрична и имеет пять однородных участков: главные полюса с длиной пути $\ell_п$, воздушный зазор ℓ_δ, зубцы якоря h_z, сердечник якоря $\ell_я$ и станина ℓ_c машины. Поток, создаваемый каждым из полюсов, делится относительно продольной оси полюса на две части, образующие вместе с соседними полюсами два одинаковых магнитных контура. Число таких контуров равно числу полюсов.

Расчет магнитной цепи постоянного тока заключается в определении МДС, необходимой для создания под полюсами машины основного магнитного потока требуемой величины.

Расчет ведут обычно на одну пару полюсов (ввиду симметричности машины) на основе закона полного тока для средней магнитной линии

$$\oint \bar{H}\, d\bar{l} = \sum I,$$

где $\bar{H}$ – напряженность магнитного поля; $d\bar{l}$ – элемент длины магнитной линии; ΣI – полный ток, охватываемый магнитной линией.

Предположив, что на протяжении каждого однородного участка напряженность поля Н постоянна, заменяем интеграл суммой

$$\Sigma H_к l_к = \Sigma I = F_0, \quad \sum H_k l_k = \sum I = F_0$$

где H_k – напряженность магнитного поля в каждом однородном участке; $l_к$ – средняя длина однородного участка; F_0 – полная МДС пары полюсов, действующая в контуре цепи.

Таким образом, общую МДС, действующую в контуре, можно представить суммой МДС, необходимых для проведения магнитного потока на однородных участках

$$F_0 = F_п + F_\delta + F_z + F_я + F_c = H_п 2l_п + H_\delta 2l_\delta K_\delta + H_z 2h_z + H_я l_я + H_c l_c. \qquad (1.22)$$

Коэффициент K_δ, называемый коэффициентом воздушного зазора (коэффициентом Картера), учитывает возрастание среднего воздушного зазора за счет пазов и равен 1,1…1,5. Величину напряженности поля в К–ом участке можно определить по формуле

$$H_k = \frac{B_k}{\mu_k},$$

где B_k – индукция магнитного поля в участке; μ_k – магнитная проницаемость участка.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

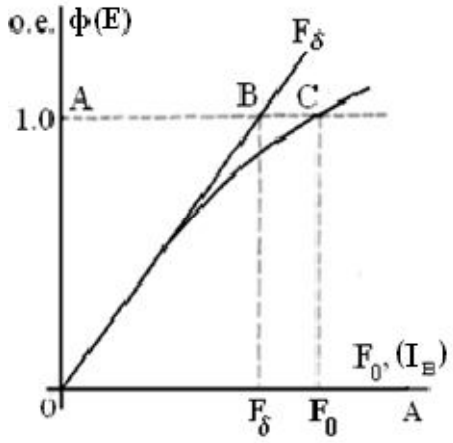


Рисунок 1.26 – Характеристика намагничивания машины постоянного тока

Для участков из ферромагнитных материалов H_k находится по кривым намагничивания $B = f(H)$, так как для них значение магнитной проницаемости не является постоянной величиной.

Индукцию $B_к$ определяют по величине потока $Ф_k$ и сечению участка S_k

$$B_k = \frac{Ф_k}{S_k}.$$

Подставив найденные значения H_k и l_k в (1.22), получим полную МДС пары полюсов.

Расчетное значение МДС возбуждения зависит от потока Ф, который необходимо создать в машине. Задаваясь различными значениями основного потока, например 0,5Ф, 0,75Ф, 1,0Ф, 1,25Ф, можно рассчитать соответствующие им МДС обмотки возбуждения и построить графически зависимость $Ф = f(F_o)$ (рисунок 1.26) которая носит название характеристики намагничивания машины.

Степень насыщения магнитной системы машины характеризуется коэффициентом насыщения, который находится расчетным путем или из кривой намагничивания $K_\mu = \frac{F_0}{F_\delta} = \frac{AC}{AB}$.

Коэффициент насыщения для различных машин находится в пределах 1,25…1,75. Характеристика намагничивания, выраженная в другом масштабе, представляет собой характеристику холостого хода машины $E_o = f(I_в)$, т.е. зависимость ЭДС от тока возбуждения при постоянной частоте вращения n = const .

1.6. Реакция якоря в машинах постоянного тока

При работе машины постоянного тока в режиме холостого хода ток в обмотке якоря практически отсутствует (I_a= 0) и в ее магнитной цепи действует лишь одна МДС обмотки возбуждения F_o. Магнитное поле машины в этом случае является симметричным относительно полюсов и не зависит от направления вращения якоря и расположения щеток на коллекторе (рисунок 1.27).

Обмотка возбуждения сосредоточена на главных полюсах и любая замкнутая магнитная линия основного потока охватывает всю сумму токов обмотки. МДС такой обмотки в пределах полюсного деления τ постоянна и равна $F_o/2$ (рисунок 1.27, б). Распределение магнитной индукции поля вдоль окружности якоря зависит от величины воздушного зазора и приближенно показано на рисунке 1.27, б.

При нагрузке машины по обмотке якоря протекает ток, который создает собственное магнитное поле. Поэтому магнитный поток в воздушном зазоре и его пространственное распределение при нагрузке машины определяется совместным действием МДС полюсов и якоря.

Магнитный поток и распределение результирующего поля в воздушном зазоре будут уже иными, чем при холостом ходе. Воздей-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ствие МДС якоря F_a на основное магнитное поле машины называется реакцией якоря.

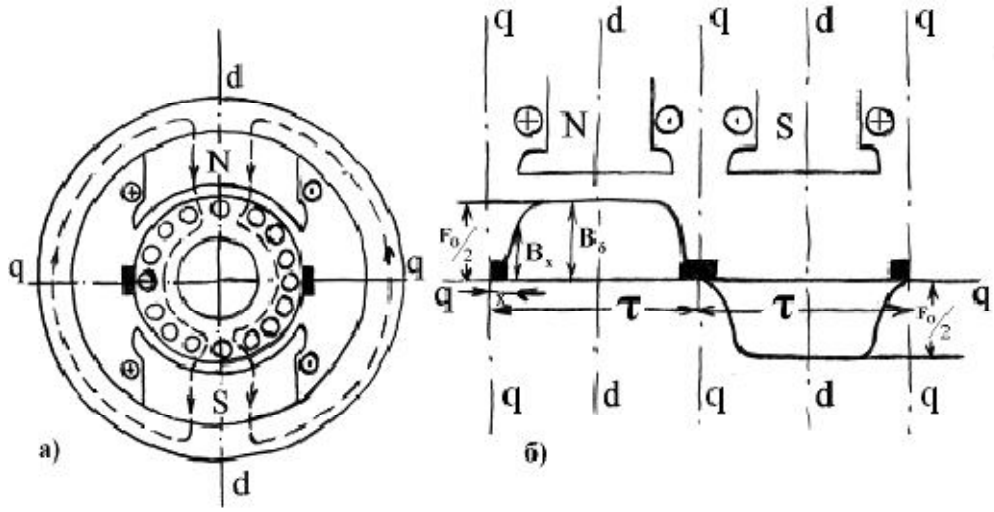


Рисунок 1.27 – Распределение МДС и магнитной индукции машины постоянного тока при холостом ходе

На рисунке 1.28 показано поле, создаваемое токами в проводниках якоря при отсутствии МДС главных полюсов, когда щетки стоят на геометрической нейтрали qq.

Под каждым полюсом располагается часть обмотки, в проводниках которой проходит ток одного направления. Как видно из рисунка 1.28 ось поля якоря совпадает с осью щеток, обуславливающих токораздел в якоре. При щетках, установленных на геометрической нейтрали, картина поля якоря симметрична относительно продольной и поперечной осей машины. Ось этого поля направлена по поперечной оси qq, поэтому такое поле якоря называют поперечным, а реакцию якоря – поперечной.

Если наложить поле якоря на поле главных полюсов, то получим картину результирующего поля (рисунок 1.29). Как видно из этого

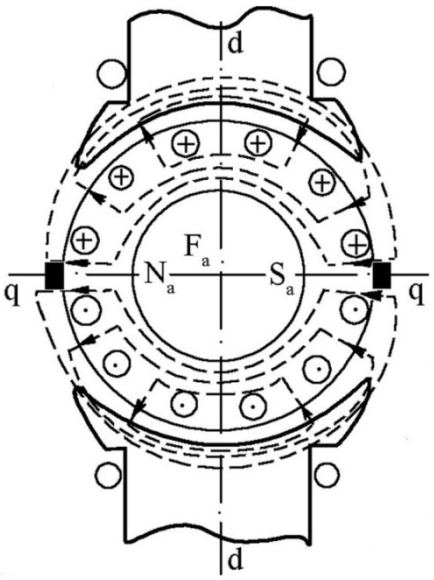


Рисунок 1.28 – Магнитное поле обмотки якоря

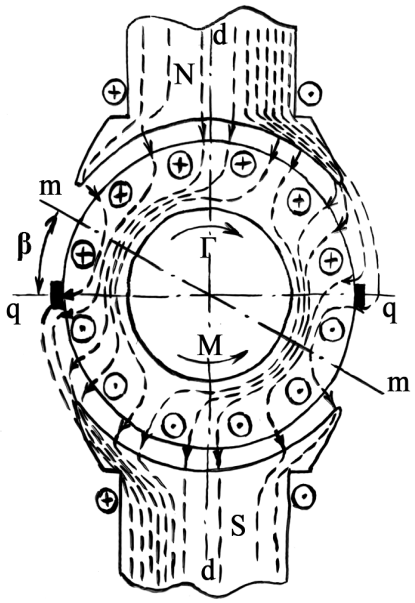


Рисунок 1.29 – Результирующее магнитное поле машины постоянного тока

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

рисунка поле при нагрузке смещается по направлению вращения в генераторе (Г) и против направления вращения в двигателе (М), распределяясь несимметрично относительно оси полюсов. Под набегающим краем полюса генератора поле ослабляется, а под сбегающим усиливается, в двигательном режиме - наоборот. Под воздействием поперечной реакции якоря физическая нейтраль (т.е. линия, на которой B = 0), смещается на некоторый угол β и занимает положение mm.

У современных машин с добавочными полюсами щетки устанавливаются на линии геометрической нейтрали, однако вследствие неточной установки щеточной траверзы может иметь место некоторый сдвиг щеток относительно этой линии.

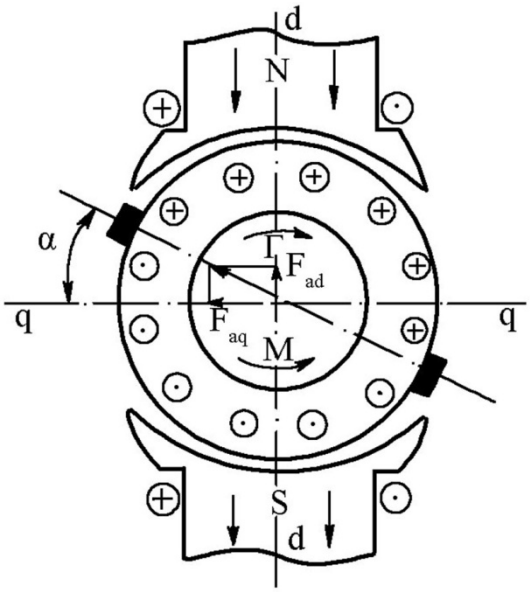


Рисунок 1.30 - Распределение поля реакции якоря при сдвиге щеток с нейтрали

В этом случае распределение токов якоря относительно главных полюсов становится несимметричным (рисунок 1.30). МДС якоря F_a, направленную всегда по линии щеток, можно разделить на две составляющие: поперечную F_{aq}, направленную по оси qq, и продольную F_{ad}, направленную вдоль оси dd. При сдвиге щеток с нейтрали в направлении вращения якоря продольная МДС якоря генератора действует навстречу МДС возбуждения, т.е. размагничивает машину; а при сдвиге щеток против вращения МДС реакции якоря действует согласно с МДС возбуждения, т.е. намагничивает машину. В двигательном режиме получается обратная картина.

При сдвиге щеток с геометрической нейтрали возникает также реакция добавочных полюсов.

В генераторах она создает размагничивающий эффект при сдвиге щеток по направлению вращения якоря и намагничивающие – при сдвиге против вращения якоря. Добавочные полюса в этом случае начинают частично выполнять роль главных полюсов.

Таким образом, под действием реакции якоря происходит изменение магнитного потока машины и перераспределение поля в воздушном зазоре. Это оказывает влияние на мгновенные значения ЭДС отдельных секций якоря и на результирующую ЭДС его обмотки. Для устранения вредного влияния реакции якоря на работу машины используются добавочные полюсы, последовательная и компенсационная обмотки.

1.7. Коммутация в машинах постоянного тока

1.7.1. Физические процессы коммутации

При вращении якоря секции обмотки непрерывно переходят из одной параллельной ветви в другую и в них происходит изменение направления тока. Процесс переключения секции из одной параллельной

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ветви в другую и называется коммутацией. В более широком смысле слова под коммутацией понимают совокупность явлений, связанных с изменением направления тока в секциях при переходе их из одной параллельной ветви в другую, и передачей тока через скользящий контакт между коллектором и щеткой. Процессы, возникающие при этом в секциях и под щетками, называются коммутационными, переключаемая секция называется коммутируемой, а время, в течение которого происходит процесс коммутации — периодом коммутации $T_к$.

Коммутацию рассмотрим на примере простой петлевой обмотки (рисунок 1.31), при условии, что ширина щеток $b_щ$ равна ширине коллекторной пластины b_k.

В реальной машине щетка перекрывает несколько пластин и процесс коммутации происходит сразу в нескольких секциях. За время переключения сила тока в короткозамкнутой (коммутируемой) секции изменяется от значения i_a до того же значения в обратном направлени, т.е. от $+i_a$ до $-i_a$.

Установим закон изменения коммутационного тока, причины и последствия его изменения. При вращении коллектора пластина 1 постепенно сбегает со щетки, а пластина 2 набегает на щетку, происходит замыкание секции щеткой через коллекторные пластины 1 и 2 накоротко. Для контура короткозамкнутой секции можно составить уравнение ЭДС по второму закону Кирхгофа

$$\Sigma e = \Sigma\, i R_k \qquad (1.23)$$

где Σe – алгебраическая сумма ЭДС, индуктируемых в коммутируемой секции; i – ток в коммутируемой секции; R_k– активное сопротивление к–го участка контура.

В коммутируемой секции индуктируется ЭДС самоиндукции e_L, вызванная изменением тока в секции, ЭДС взаимоиндукции $e_м$, вызванная изменением тока в соседних одновременно коммутируемых секциях, коммутирующие ЭДС e_k, возникающие в секции за счет пересечения ее результирующим полем или полем добавочных полюсов. Кроме того возникает трансформаторная ЭДС $e_т$, вызванная пульсацией во времени магнитного потока Ф из–за зубчатости якоря, однако она мала и ее, как правило, не учитывают.

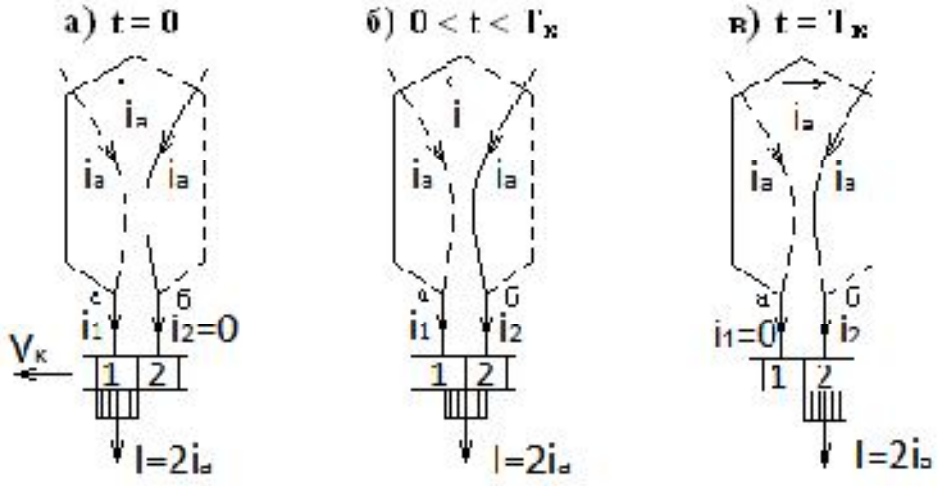


Рисунок 1.31 – Характер изменения тока в коммутируемой секции: а – до начала коммутации; б – в период коммутации; в – после коммутации

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Сумму ЭДС самоиндукции $e_р$ и взаимоиндукции $e_м$ называют реактивной ЭДС

$$e_р = e_L + e_м . \quad (1.24)$$

Она равна

$$e_p = -(L_c + M_c)\frac{di}{dt} = -L_k \frac{di}{dt}, \quad (1.25)$$

где L_c – индуктивность секции; M_c – взаимная индуктивность секции; $L_k=L_c+M_c$ –эквивалентная индуктивность секции.

По закону Ленца реактивная ЭДС $e_р$ направлена таким образом, чтобы препятствовать изменению тока в коммутируемой секции.

Коммутирующая ЭДС e_k может действовать как согласно с $e_р$, так и встречно. Это зависит от направления внешнего магнитного поля в зоне коммутации, то есть

$$\Sigma e = e_р \pm e_k .$$

Активное сопротивление щеточного контакта значительно больше других сопротивлений контура короткозамкнутой секции, поэтому для упрощения будем учитывать только сопротивления $R_{щ1}$ и $R_{щ2}$ – текущие контактные сопротивления сбегающего и набегающего краев щетки. Тогда можно записать

$$\Sigma e = e_р \pm e_k = i_1 R_{щ1} - i_2 R_{щ2} . \quad (1.26)$$

По первому закону Кирхгофа для узлов А и В можно записать

$$i_2 = i_a + i. \quad (1.27)$$

Решая совместно уравнения (1.26) и (1.27), получим

$$i = i_a \frac{R_{щ2} - R_{щ1}}{R_{щ1} + R_{щ2}} + \frac{\sum e}{R_{щ1} + R_{щ2}} \quad (1.28)$$

Переходные сопротивления $R_{щ1}$ и $R_{щ2}$ обратно пропорциональны площадям касания щетки с коллекторными пластинами и, если учесть, что эти площади изменяются пропорционально времени коммутации, то получим

$$R_{щ1} = R_{щ} \cdot \frac{S_{щ}}{S_{щ1}} = R_{щ} \frac{T_k}{T_k - t}; \quad (1.29)$$

$$R_{щ2} = R_{щ} \cdot \frac{S_{щ}}{S_{щ2}} = R_{щ} \frac{T_k}{t} \quad (1.30)$$

где $R_{щ}$ – сопротивление переходного контакта всей поверхности щетки; $S_{щ}$ – полная площадь контакта щетки с коллектором; $S_{щ1}$, $S_{щ2}$ – площади сбегающего и набегающего контакта щеток с коллектором; $T_к$ – период коммутации ; t– промежуток времени от начала коммутации.

Подставляя значение $R_{щ1}$ и $R_{щ2}$ в уравнение (1.28), найдем

$$i = i_a \left(1 - 2\frac{t}{T_k}\right) + \frac{\sum e}{R_{щ} T_k^2}(T_k - t)t . \quad (1.31)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

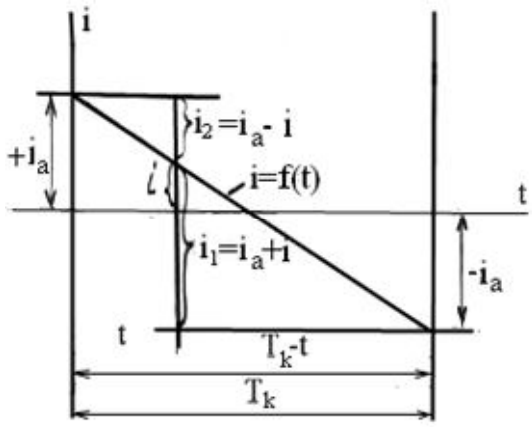


Рисунок 1.32 – Характер изменения тока коммутации при ∑e = 0

Анализируя уравнения (1.31) и (1.26) видим, что если коммутирующая ЭДС e_k равна реактивной ЭДС e_p, и направлена навстречу ей, то вторая составляющая коммутационного тока равна нулю, так как Σe = 0 и ток будет изменяться по линейному закону

$$i = i_a\left(1 - 2\frac{t}{T_k}\right) = i_л .$$

График этой функции представлен на рисунке 1.32. Токи i_1 и i_2, протекающие через коллекторные пластины, изменяются во времени линейно. Коммутация с таким характером изменения токов называется прямолинейной. Плотность тока по всей площади будет одинаковой. Это наиболее благоприятная коммутация. При Σe ≠ 0 ток в секции i представляет сумму двух составляющих: линейного тока $i_л$ и так называемого добавочного тока коммутации $i_к$, определяемого величиной Σe.

При $e_к < e_р$ добавочный ток $i_к$, накладываясь на ток линейной коммутации $i_л$, будет задерживать изменение тока в секции и она сначала будет изменяться медленнее (кривая 1, рисунок 1.33), чем при линейной коммутации. Такой процесс в коммутируемой секции называется замедленной криволинейной коммутацией. Она характеризуется неравномерным распределением тока под щеткой. Под сбегающим краем щетки плотность тока будет больше, чем под набегающим, что приведет к искрообразованию на коллекторе.

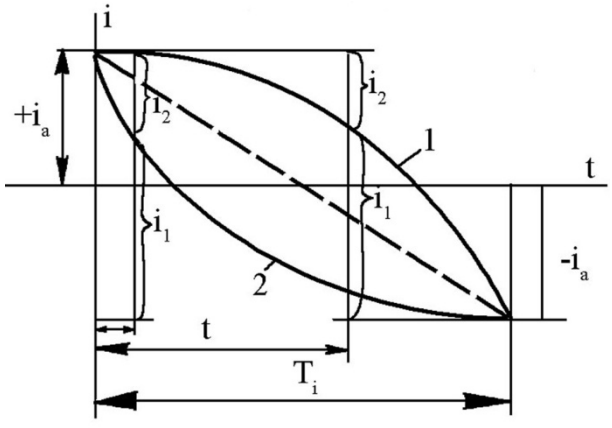


Рисунок 1.33 – Характер изменения тока коммутации при ∑e ≠ 0

При $e_к > e_р$ добавочный ток $i_к$ накладываясь на $i_л$ будет ускорять изменение тока i в секции и процесс коммутации пойдет быстрее, чем при линейной коммутации (кривая 2, рисунок 1.33). Такая коммутация называется ускоренной криволинейной коммутацией. В этом случае добавочный ток будет увеличивать плотность тока под набегающим краем щетки и уменьшать под сбегающим, создавая неравномерную плотность тока, что также приводит к искрообразованию на коллекторе.

Таким образом, состояние коммутации определяется, главным образом, значением тока $i_к$, величина которого зависит от суммарной ЭДС $e = e_р + e_k$ и сопротивления переходного контакта щетки $R_щ$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

1.7.2. Причины и степени искрения

При работе машины может наблюдаться искрение в щеточном контакте (между щеткой и коллектором), которое может привести к разрушению щеток, оплавлению пластин коллектора и, в конечном счете, к выходу машины из строя.

В соответствии с нормами (ГОСТ 183-74) искрение на коллекторе электрической машины должно оцениваться по степени искрения под сбегающим краем щётки и по шкале (классам коммутации), указанной в таблице 1.1.

Степень искрения (класс коммутации) проверяют в номинальных условиях работы при практически установившейся температуре, но не ранее, чем через 2 часа для машин мощностью до 100 кВт и 4 часа для машин мощностью более 100 кВт.

Из таблицы 1.1 видно, что оценка степени искрения производится визуально (субьективно), хотя в настоящее время разработаны и обьективные способы.

Электрические машины, предназначенные для работы в длительном режиме, при номинальной нагрузке должны работать практически без искрения (допустимая степень искрения должна быть не выше $1\frac{1}{4}$). У электрических машин, работающих в кратковременном и повторно-кратковременном режимах, при номинальной нагрузке может быть допущена степень искрения $1\frac{1}{2}$.

Причины искрения могут быть различными.

1. Механические, приводят к искрению из–за нарушения или ухудшения скользящего контакта. Они связаны с неисправностью коллектора и щеточного аппарата. К ним относятся: неровность поверхности коллектора, его эксцентричность, выступание изоляции между пластинами, плохая балансировка, плохое крепление траверзы или щеткодержателей, неправильный выбор марки щеток, слабое нажатие щеток, плохая притирка щеток к коллектору и пр.

2. Потенциальные, вызываемые неравномерным распределением напряжения на коллекторе. Если напряжение между соседними коллекторными пластинами превысит определенное значение, то может возникнуть искрение из–за электрического пробоя изоляционных промежутков между пластинами. Дело в том, что при нагрузке машины из–за поперечной реакции якоря распределение магнитной индукции, а следовательно, и распределение напряжения между коллекторными пластинами приобретает резко неравномерный характер, напряжение между соседними пластинами может достигнуть больших значений, что может привести к проскакиванию искр между соседними пластинами и даже к перекрытию их дугой. Максимально допустимое напряжение между соседними коллекторными пластинами в зависимости от мощности машины составляет 25 … 60 В.

3. Коммутационные, определяются соотношением ЭДС в коммутирующей секции. При значительном преобладании реактивной ЭДС коммутирующая секция имеет значительный запас электромагнитной энергии $L_k \frac{i_k^2}{2}$. В момент сбегания щетки с коллекторной пластины происходит разрыв коммутирующй цепи - разряд электромагнитной энергии секции и является причиной искрения. Искрению

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

способствует также нагрев краев щетки в результате неравномерного распределения плотности тока под щеткой.

При выявлении причин искрения полезным может оказаться наблюдение за цветом искр и характером их образования (таблица 1.2).

1.7.3. Средства улучшения коммутации

Современные средства улучшения коммутации сводятся, главным образом, к устранению коммутационных и потенциальных причин искрения.

1. Применение добавочных полюсов.

Безыскровая работа коллектора в машине будет при прямолинейной коммутации и имеет место, если $i_к=0$. Добавочный ток $i_к$ полностью исчезает, если коммутационная ЭДС $e_к$ уравновешивает реактивную ЭДС $e_р$. Для создания соответствующей $e_к$ в зоне коммутации между главными полюсами устанавливают добавочные полюсы. МДС добавочных полюсов $F_к$ должна быть направлена против МДС реакции якоря F_q, чтобы скомпенсировать ее в зоне коммутации (ЭДС от поля реакции якоря стремится замедлить коммутацию) и создать, сверх того, поле для компенсации реактивной ЭДС $e_р$. Важно при этом правильно определить полярность добавочных полюсов: в генераторе за главным полюсом должен следовать по направлению вращения добавочный полюс противоположной полярности, а в двигателе наоборот (рисунок 1.34).

Для того, чтобы компенсация ЭДС $e_р$ и $e_к$ существовала при всех значениях тока якоря, обмотка добавочных полюсов соединяется последовательно с якорем, а сердечник этих полюсов делается ненасыщенным.

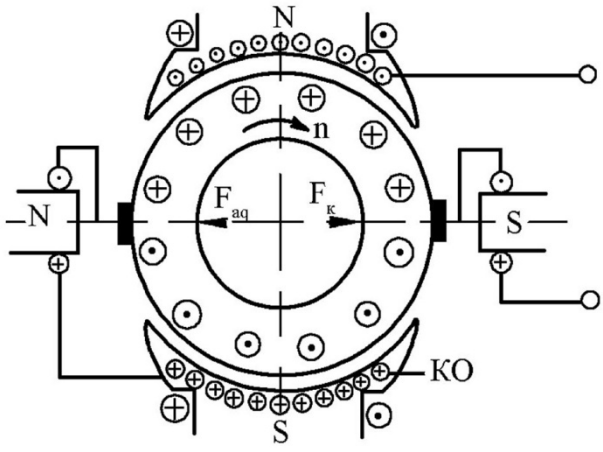


Рисунок 1.34 – Расположение добавочных полюсов и компенсационной обмотки

В малых машинах без добавочных полюсов требуемая компенсация может быть достигнута путем некоторого сдвига щеток, а следовательно и коммутационной зоны с геометрической нейтрали: у генераторов – в сторону вращения якоря, у двигателей – против его вращения.

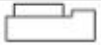
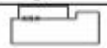
2. Применение компенсационной обмотки.

Для эффективной компенции МДС поперечной реакции якоря и улучшения коммутации в полюсных наконечниках главных полюсов предусматривают устройство пазов, в которые укладывают компенсационную обмотку (**ко**) (рисунок 1.34). Эта обмотка включается последовательно в цепь якоря с целью автоматической компенсации F_q при всех нагрузках. Закон распределения МДС компенсационной обмотки в воздушном зазоре имеет вид почти зеркального отображения МДС реакции якоря F_q.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Таблица 1.1 - Оценка искрения коллекторов электрических машин.

Степень искрения	Характер искрения	Последствия искрения	Когда допускается
1	 Отсутствие искрения (темная коммутация)	Коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для длительной работы. Коммутация считается «практически без искрения». Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках.	Допускается для всех номинальных режимов работы.
1¼	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки, приблизительно у четверти числа всех щеток.		
1½	 Слабое искрение под большей частью края щетки, приблизительно у половины числа всех щеток.	Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием поверхности бензином, и следов нагара на щетках.	
2	Искрение под большей частью щетки у большинства или у всех щеток.	При длительной работе на коллекторе остаются следы почернения, а на щетках - следы нагара, не устраняемые протиранием поверхности бензином	Допускается при кратковременных перегрузках, толчках и реверсах (с реостатами или пусковыми ступенями).
3	Значительное искрение у всех щеток, недопустимое при длительной работе с наличием вылетающих искр.	При длительной работе возникает почернение коллекторных пластин, а также подгар и разрушение щеток. Это соответствует «опасному искрению».	Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для длительной работы.

СЕВАСТОПОЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Таблица 1.2 – Признаки искрообразования

Электромагнитного характера	Механического характера
Цвет искр бело-голубой или желтоватый. Искры располагаются под сбегающим краем щетки.	Цвет искр зеленоватый. Искры располагаются под контактной поверхностью щетки.
Интенсивность искрообразования зависит от нагрузки и возрастаетс ее увеличением.	Интенсивность искрообразования не зависит от нагрузки.
Искрообразование возрастает с увеличением нажатия на электрощетку.	Искрообразование ослабевает с увеличением нажатия на электрощетку.
С увеличением окружной скорости якоря искрообразование изменяется незначительно.	С увеличением окружной скорости якоря искрообразование резко возрастает.
Нагар (почернение) на коллекторе по всей его поверхности, подгорают отдельные пластины, причем в расположении подгоревших пластин наблюдается определенная закономерность.	Нагар (почернение) происходит на отдельных участках поверхности коллектора; в расположении подгоревших пластин закономерности не наблюдается.
Интенсивность искрообразования зависит от температуры; с повышением температуры оно возрастает	Интенсивность искрообразования от температуры не зависит.

3. Применение твердых сортов щеток.

Некоторое уменьшение тока коммутации можно достигнуть увеличением сопротивления контакта щеток $R_{щ}$, что осуществляется применением более твердых сортов. В машинах постоянного тока применяют угольно–графитные (УГ), графитные (Г), электрографитированные (ЭГ), медно–графитные (МГ) и бронзо–графитные (БГ) щетки. С целью улучшения коммутации целесообразно применять твердые щетки (УГ, Г, ЭГ), так как они обладают наибольшей величиной переходного сопротивления. Однако допускаемая плотность тока твердых щеток невелика, поэтому их применение ведет к необходимости увеличения площади щеточного контакта, что требует увеличения габаритов коллектора. На судах обычно используются графитные и электрографитированные щетки. Для этих же целей в крупных машинах применяют разрезные щетки, которые обеспечивают, кроме того, и лучший контакт щетки с коллектором.

4. Нормальные условия охлаждения.

Чрезмерный нагрев щеток и коллектора может явиться дополнительной причиной искрения. Кроме того, опыт эксплуатации машин постоянного тока показывает, что безыскровая и длительная работа коллектора наблюдается при образовании на поверхности коллектора устойчивой оксидной пленки, которая образуется только при определенной влажности, температуре и чистоте охлаждающей среды.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

1.8. Потери мощности и КПД машин постоянного тока

При работе электрических машин часть энергии в отдельных ее узлах теряется, превращаясь в тепло. Потери энергии в машинах постоянного тока можно разделить на следующие группы.

1. Механические потери $\Delta P_{мех}$: трение в подшипниках, трение щеток о коллектор, трение якоря о воздух, вентиляционные. Обычно эти потери определяются по эмпирическим формулам или экспериментально.

2. Магнитные потери $\Delta P_{ст}$: потери на гистерезис, обусловленные перемагничиванием сердечника якоря и зубцов при вращении, и потери на вихревые токи, обусловленные пересечением магнитным потоком отдельных зон тела якоря. Вихревые токи замыкаются в плоскостях продольного разреза якоря. С целью уменьшения потерь на вихревые токи сердечник якоря собирают из штампованных, изолированных друг от друга, листов электротехнической стали. Потери в стали, учитывающие потери на гистерезис и вихревые токи, определяются по формуле

$$P_{ст} = K_0 P_y \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B^2 m ,$$

где K_0 – опытный коэффициент, учитывающий влияние обработки и сборки листовой стали, равный для машин постоянного тока 1,7…4,0; P_y – удельные потери в стали, зависящие от сорта и толщины листов; f – частота перемагничивания стали; β – коэффициент, равный для слаболегированных и среднелегированных сталей 1,4…1,6, для высоколегированных 1,2…1,3; B – магнитная индукция в стали; m – масса сердечника якоря или зубцов.

Эта формула является универсальной, т.е. по ней можно определять потери в стали и в машинах переменного тока.

3. Электрические потери $\Delta P_э$ – это потери в обмотке якоря, в обмоках возбуждения, добавочных полюсов и компенсационной, в контактном слое щеток, которые определяются по формуле

$$\Delta P_э = r_я I_я + U_в I_в^2 + (r_с + r_к + r_д) I_я^2 + \Delta U_щ I_я,$$

где $r_я$, $I_я$– полное сопротивление цепи якоря и ток в ней; $U_в$, $I_в$– напряжение и ток возбуждения; $r_с$, $r_к$, $r_д$ – сопротивления обмоток, соответственно, последовательной, компенсационной и добавочных полюсов; $\Delta U_щ$ – переходное падение напряжения на пару щеток (среднее значение $\Delta U_щ$=2В). Потери на возбуждение относятся к источнику, питающему обмотку возбуждения, хотя выделяются они внутри машины.

4. Добавочные потери $\Delta P_д$: механические потери, обусловленные вибрацией вала, щеток, потери в стали, обусловленные неравномерностью распределения индукции в зубцах, потери в полюсных наконечниках, обусловленные пульсацией основного потока вследствие зубчатости якоря и другие. Добавочные потери трудно поддаются учету, поэтому для нормальных машин ГОСТ предусматривает $\Delta P_д = 0{,}01\ P_н$.

Полные потери в машине постоянного тока находятся по формуле

$$\sum \Delta P = \Delta P_{мех} + \Delta P_{ст} + \Delta P_д + \Delta P_э . \qquad (1.32)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Механические и магнитные потери практически не зависят от нагрузки машины, поэтому принято называть их потерями холостого хода ΔP_0, электрические же потери пропорциональны квадрату тока, поэтому являются переменными и зависят от нагрузки машины. Если подвести к машине мощность P_1, то она распределится следующим образом

$$P_1 = P_2 + \Sigma\Delta P = P_{эм} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{ст} + \Delta P_д = P_{эм} + \Delta P_o, \quad (1.33)$$

где P_1 =UI– это электрическая мощность, подводимая к двигателю, или механическая мощность на валу приводного двигателя генератора; P_2 – механическая мощность, снимаемая с вала двигателя или электрическая мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь.

Отношение полезной мощности P_2 к подводимой мощности P_1 называется коэффициентом полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{P_2}. \quad (1.34)$$

КПД машин постоянного тока величина непостоянная, он изменяется при изменении нагрузки, достигая максимума при нагрузках от 75% до 100% номинальной. В зависимости от мощности машин КПД в номинальном режиме для малых машин достигает 83…87% и для машин большой мощности 92…97%.

1.9. Щетки электрических машин

Выбор марки щеток. Выбор марки и конструкции щеток в значительной степени влияет на работу электрической машины и определяет надежность ее эксплуатации. Основные характеристики электрощеток: переходное падение напряжения в щеточном контакте, коэффициент трения, твердость, интенсивность износа. При выборе щеток необходимо учитывать разнообразные свойства и характеристики различных марок и конструкций щеток, выбирая оптимальный вариант. Основные марки щеток и преимущественные области их применения приведены в таблице 1.3.

Для машин малых напряжений и машин с хорошей коммутацией применяют щетки с небольшим контактным сопротивлением, для машин больших напряжений и тяжелых условий коммутации — щетки с большим контактным сопротивлением, для быстроходных машин — с малым коэффициентом трения.

Замена щеток. При замене щеток учитывают данные машины и условия эксплуатации щеток, имея в виду, что марки щеток отечественного производства не полностью соответствуют однотипным маркам щеток иностранных фирм.

Установка щеткодержателей и щеток. Щеткодержатели помещают на стержнях траверсы или бракетах (ряд положительных и ряд отрицательных щеток) таким образом, чтобы ось расположения щеток была строго параллельна оси коллектора. Расстояние по окружности коллектора между сбегающим краем щеток отдельных стержней или бракетов должно быть одинаковым. Для правильной установки щеток

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

на коллекторе под ними прокладывают бумажную ленту, размеченную на равные части соответственно числу стержней или бракетов.

Щетки пришлифовывают к коллектору (кольцам) стеклянной бумагой. После этого машину тщательно очищают от угольной и абразивной пыли. Пришлифовку щеток заканчивают пуском машины при нагрузке 20…30% номинальной до образования на коллекторе «политуры» (синеватого оттенка), а на щетках — полированной поверхности.

Проверка величины нажатия щеток на коллекторе (кольцах). Величину нажатия щеток измеряют динамометром с соответствующей шкалой. Для этого под щетку подкладывают папиросную бумагу, крючок динамометра при помощи шнурка цепляют за жгутик непосредственно у места крепления его к щетке или за пружину в месте давления ее на щетку. Сила нажатия измеряется в направлении оси щетки по ее высоте так, чтобы не допустить неточности в измерении из-за перекосов щетки в обойме.

Таблица 1.3 – Основные марки щеток, применяемых в судовых машинах постоянного тока

Обозначение марок щеток	Условное обозначение марок	Наименование групп марок	Преимущественная область применения
Г20 Г21 Г22	20 34 32	Угольно-графитные	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г3 611М 6110М	43 88 56	Графитные	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактными кольцами
ЭГ2А ЭГ24Ф ЭГ4 ЭГ8 ЭГ14 ЭГ51 ЭГ61 ЭГ71 ЭГ74 ЭГ74Аф ЭГ85	12 68 14 18 41 51 61 71 74 79 85	Электро-графити-ровнные	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактными кольцми
М1 М3 М6 М20	81 83 86 93	Металло-графитные	Для низковольтных генераторов и контактных колец
МГ МГ20 МГ4 МГС5 МГС0	17 82 19 9 21	Металло-графитные	Для низковольтных генераторов и контактных колец

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

С этой целью одной рукой оттягивают динамометр, а другой папиросную бумагу; величина нажатия на щетку фиксируется показаниями динамометра в тот момент, когда бумага начинает легко двигаться под щеткой. Для определения удельного нажатия необходимо показания динамометра в граммах разделить на поперечное сечение в квадратных миллиметрах.

Для определения величины нажатия щеток применяется и упрощенный способ. Под щетку подкладывают полоску папиросной бумаги, после чего ее устанавливают на место. При обычном нажатии пружины на щетку осторожно вытягивают из-под нее бумагу. Если она извлекается с трудом и не имеет разрывов, нажатие можно считать приблизительно нормальным, если бумага рвется — большим, если вытягивается легко — недостаточным.

Притирка щеток производится при остановленной и обесточенной машине. Для этого применяется бумага мелкозернистая стеклянная № 00. Металлоугольные щетки целесообразно вначале подогнать напильником и крупнозернистой бумагой. Притирка щеток наждачной бумагой запрещается. Чтобы избежать порчи, щетки, не подлежащие притирке, приподнимают. Стеклянную бумагу кладут между коллектором (кольцом) и притираемыми щетками шероховатой поверхностью к щеткам. Затем при нормальном нажатии пружин щеткодержателей протягивают бумагу вперед и назад, прижимая ее к коллектору (кольцу). У нереверсивных машин в конце притирки бумагу протягивают только в сторону вращения. Во время притирки запрещается увеличивать нажатие щеток и прижимать их руками.

В малых машинах, у которых доступ к щеткам затруднен, для притирки лучше использовать длинную ленту стеклянной бумаги, равную приблизительно полуторной длине окружности коллектора, ее укладывают под все щетки одного ряда, после чего якорь проворачивают вручную. По каждому ряду щеток притирка производится поочередно. Когда поверхность щеток станет гладкой, притирку прекращают.

При снятии щеток и установке их в прежнее положение необходимо следить, чтобы они не переворачивались.

После притирки щеток машину очищают от угольной пыли и продувают воздухом; для пришлифовки щеток до зеркального блеска рекомендуется запускать машину с нагрузкой 20…30% номинальной.

1.10. Обозначения выводов и схемы соединений электрических машин постоянного тока

Выводы обмоток электрических машин постоянного тока обозначаются согласно ГОСТ 26772-85 (таблица 1.4)

Начало и конец каждой обмотки обозначаются одной и той же прописной буквой с проставленными после нее цифрами: для начала обмотки -1, а для конца -2.

Начало и конец каждой обмотки определяется тем условием, что при правом вращении машины в режиме двигателя ток во всех обмотках, за исключением размагничивающих обмоток главных полюсов, протекает от начала 1 к концу 2. Выводы обмоток ранее разработанных машин и установленных на судах, находящихся в эксплуатации, обозначены согласно ГОСТ 183 – 74, которые в таблице 1.4 указаны в скобках.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Таблица1.4 – Обозначение выводов обмоток машин постоянного тока

Наименование обмоток	Обозначение выводов	
	начало	конец
Обмотки якоря	А1(Я1)	А2(Я2)
Компенсационная обмотка	С1(К1)	С2(К2)
Обмотка добавочных полюсов	В1(Д1)	В2(Д2)
Последовательная обмотка возбуждения	D1(С1)	D2(С2)
Параллельная обмотка возбуждения	Е1(Ш1)	Е2(Ш2)
Независимая обмотка возбуждения	F1(Н1)	F2(Н2)

Направление вращения считается правым, когда машина вращается по часовой стрелке, если смотреть со стороны конца вала соединяемого с механизмом; для машин, имеющих два конца вала, направление вращения считается правым, когда машина вращается по часовой стрелке, если смотреть со стороны, противоположной коллектору.

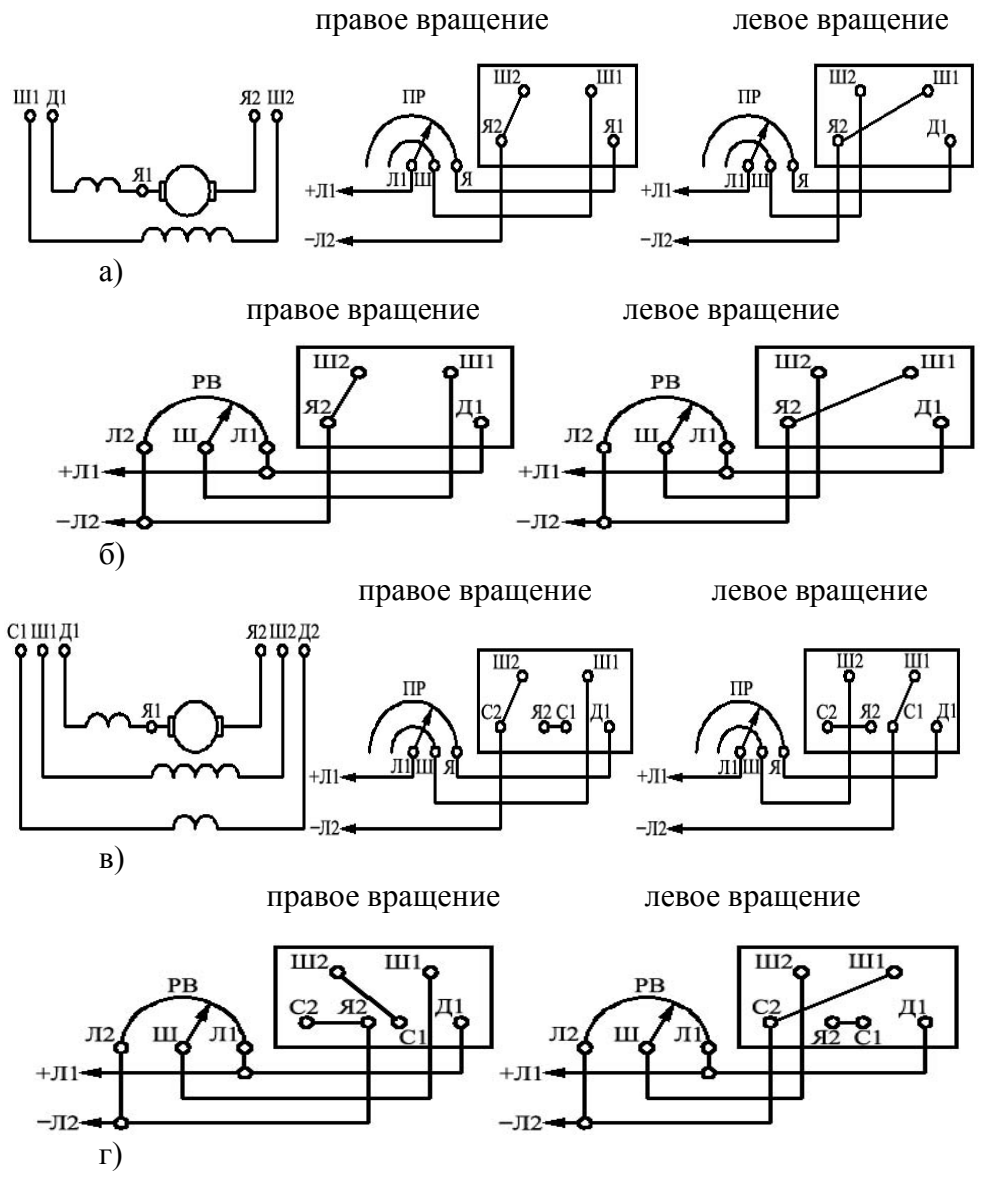


Рисунок 1.35 – Обозначение включений обмоток машин постоянного тока: параллельное возбуждение – двигатель (а), – генератор (б); смешанное возбуждение – двигатель (в), – генератор (г); ПР – реостат пусковой; РВ – регулятор возбуждения

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В соответствии с указанными условиями в машинах правого вращения в режиме двигателя ток из сети направляется к А1, а в режиме генератора ток от А1 направляется в сеть.

При наличии в машине нескольких обмоток одного наименования выводы их начал и концов помимо буквенных обозначений имеют цифровые обозначения 1-2, 3-4, 5-6 и т.д. Схемы соединений машин постоянного тока представлены на рисунке 1.35. Обозначения выводов представлены согласно ГОСТ 183 – 74.

1.11. Установка щеточной траверсы относительно нейтрали машины

Установка щеточной траверсы относительно геометрической нейтрали машины, или установка щеток на нейтраль, не входит в перечень часто выполняемых операций. Правильность этой установки чаще всего проверяется по заводской метке, нанесенной на корпус машины при ее изготовлении.

Однако бывают случаи, когда указанная метка отсутствует вследствие повреждений машины или во время предыдущего ремонта были изменены обмоточные данные, и новое положение метки неясно.

В то же время известно, что при смещении щеточной траверсы относительно геометрической нейтрали даже у полностью исправной машины при работе будут наблюдаться внешние признаки дефектов и неисправностей. Поэтому проверка и установка щеточной траверсы машины относительно ее геометрической нейтрали, т. е. линии, проходящей посередине между соседними главными полюсами, имеют важное значение при оценке состояния электрических машин.

При этом необходимо учитывать, что в машинах, снабженных для устранения вредного действия реакции якоря добавочными полюсами или компенсационными обмотками, при правильной установке траверсы щетки находятся действительно на геометрической нейтрали. В машинах, не имеющих указанных полюсов и обмоток, при правильном положении траверсы щетки оказываются несколько смещенными с геометрической нейтрали: для генераторов - по направлению вращения якоря, для двигателей - в противоположную сторону.

На наличие смещения щеточной траверсы указывают такие признаки: при ее сдвиге по направлению вращения якоря напряжение генератора снижается; если сдвиг траверсы против направления вращения, то напряжение генератора повышается, частота вращения электродвигателя возрастает.

Судовые электрические машины постоянного тока обычно выполняются с добавочными полюсами. Для этих машин известны следующие способы установки щеточной траверсы на нейтраль: индуктивный метод, метод наибольшего напряжения для генераторов, метод измерения частоты вращения для двигателей.

При индуктивном методе, применимом как для генераторов, так и для двигателей, положение щеточной траверсы определяется при неподвижном якоре машины.

При этом методе траверсу предварительно устанавливают в такое положение, при котором линия щеток приходится примерно против середины главных полюсов. К щеткам отсоединенной от сети ма-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

шины подключают вольтметр магнитоэлектрической системы с нулем по середине шкалы и пределами измерения до 3 . . . 5В.

К отсоединенной от якоря обмотке возбуждения от аккумуляторной батареи через рубильник и реостат подают пониженное напряжение, обеспечивающее ток в обмотке возбуждения, равный 10...15% номинального. На рисунке 1.36, а, показана схема для двигателя параллельного возбуждения (сплошными линиями показана штатная схема двигателя, пунктирными - элементы схемы настройки).

Быстро замыкая и размыкая рубильник в цепи питания обмотки возбуждения, вызывают появление в якоре индуктированной ЭДС и наблюдают положение стрелки вольтметра.

Проверка и установка щеточной траверсы по схеме, приведенной на рисунке 1.36, а, обеспечивает ориентацию щеток относительно главных полюсов машины. В электрических машинах с добавочными полюсами щетки могут быть ориентированы как относительно главных полюсов, так и относительно добавочных. Для машин с точным размещением главных и добавочных полюсов проверка и установка щеточной траверсы относительно тех или других полюсов из указанных дает одинаковые результаты.

Если же указанные полюсы в какой-то степени смещены относительно друг друга, то положения щеточной траверсы, определенные относительно главных или добавочных полюсов, не совпадают.

Практическое значение данное обстоятельство имеет для электрических машин реверсивных приводов. Реверсирование машины, щеточная траверса которой установлена на нейтраль, определенной относительно главных полюсов, обеспечивает лучшие скоростные характеристики (обеспечивается уменьшение отклонений этих характеристик при реверсе). Реверс этих же машин, но со щеточной траверсой, установленной на нейтраль, которая определена относительно добавочных полюсов, сопровождается отклонением скоростных характеристик. В то же время во втором случае допускаются лучшие условия коммутации. Потому определение нейтрали может зависеть от особенностей привода, для которого предназначен электродвигатель.

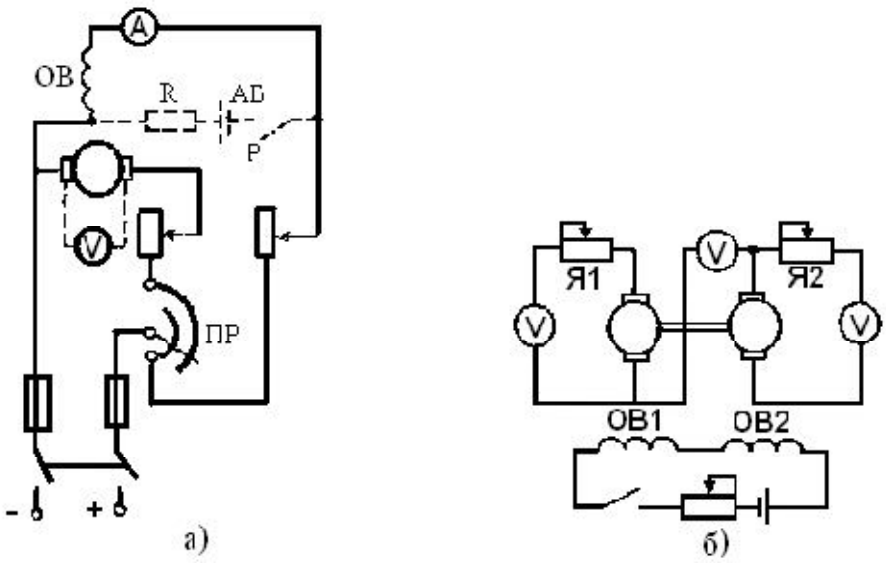


Рисунок 1.36 - Схемы установки щеток на нейтраль двигателя параллельного возбуждения (а) и на нейтраль двухякорной машины (б)

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Проверка и установка щеточной траверсы относительно добавочных полюсов может выполняться по методу, применяемому для тяговых машин.

При этом методе на обмотку добавочных полюсов электродвигателя с петлевой обмоткой при неподвижном якоре от сварочного трансформатора или другого источника подают переменное напряжение 30 … 80В. Вольтметром переменного тока, оснащенным щупом, контролируют напряжение между соседними пластинами коллектора в зоне коммутации. Скачкообразное изменение напряжения между соседними пластинами указывает на подключение щупа к пластинам, соединенным с секциями другой катушки. Затем вольтметр подключают к пластинам коллектора, относящимся к средней секции катушки и, поворачивая якорь, находят такое его положение, при котором вольтметр показывает отсутствие напряжения. В этом положении якоря нейтраль машины проходит точно посередине между указанными пластинами коллектора. Щеточную траверсу поворачивают так, чтобы середина щетки приходилась на паз между этими пластинами. Таким же образом производится установка всех щеткодержателей.

Для двигателей с волновой обмоткой якоря все действия выполняют аналогично, за исключением нахождения пластин коллектора. Измеряя напряжение между соседними пластинами, находят три пластины, между которыми оно имеет одинаковое значение. Пластины, к которым подключают вольтметр, находятся рядом с тремя указанными.

При использовании индуктивного метода для двухякорных машин с общим валом (на судах применяются в гребных электрических установках) применяют схему, приведенную на рисунке 1.36, б. Правильная установка щеточных траверс относительно общей нейтрали таких машин будет иметь место при минимальных показаниях трех вольтметров.

Индуктивный метод применяется и для электромашинных усилителей (ЭМУ). Для этих машин при установке щеточной траверсы вначале удаляют перемычку, соединяющую короткозамкнутые щетки, и включают между этими щетками вольтметр с нулем посередине. В одну из обмоток управления при перемещении якоря подают напряжение от постороннего источника постоянного тока. Далее выполняются действия, как и описанные выше. После нахождения таким образом нейтрали для ЭМУ обычно требуется сместить щетки дополнительно на 1,5 ... 2 мм по направлению вращения якоря. Это связано с тем, что при установке щеток на нейтрали иногда наблюдается, так же как при сдвиге щеток против направления вращения, самовозбуждение и потеря управления ЭМУ.

Метод наибольшего напряжения применяется для генераторов параллельного и смешанного возбуждения, не работающих параллельно, и реализуется в режиме холостого хода этих машин. При этом методе генератор запускают в режим холостого хода и посредством реостата возбуждения доводят напряжение на его зажимах до нормального (напряжение контролируют вольтметром, подключенным к зажимам генератора). При неизменном положении реостата возбуждения смещают в одну и другую сторону щеточную траверсу, наблюдая по вольтметру за изменением напряжения на зажимах генератора. Положение щеточной траверсы, при которой наблюдается наибольшее напряжение, является точным. Данный метод менее точен, чем индук-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

тивный, но для генераторов, не работающих параллельно, обеспечивает приемлемые для практики результаты. Для генераторов, работающих в параллель, даже небольшое смещение траверсы от точного положения может вызвать их перемагничивание, поэтому для этих генераторов метод наибольшего напряжения не рекомендуется.

Методом измерения частоты вращения определяется правильность положения щеточной траверсы электродвигателей. При этом методе, также реализуемом в режиме холостого хода машины, измеряют ее частоту вращения в обоих направлениях при некотором положении щеточной траверсы. Изменение направления вращения обеспечивается переключением параллельной обмотки возбуждения.

Смещением щеточной траверсы в обе стороны добиваются такого положения, при котором частота вращения якоря одинакова для обоих направлений вращения. Это положение траверсы и есть точное.

При установке щеточной траверсы методом наибольшего напряжения или методом измерения частоты вращения следует помнить, что перемещать траверсу можно только после отключения машины от сети и полной остановки якоря.

Наиболее точным и безопасным методом является индуктивный.

1.12. Вопросы для самопроверки и контроля знаний

1. Изобразите картину распределения магнитной индукции в зазоре машины постоянного тока (МПТ).
2. Изобразите конструктивную схему МПТ.
3. Нарисуйте конструктивную схему коллектора МПТ.
4. Расскажите принцип построения простой и сложной петлевой обмотки.
5. Расскажите принцип построения простой и сложной волновой обмотки.
6. Покажите распределение МДС и магнитной индукции МПТ при холостом ходе.
7. Изобразите картину результирующего магнитного поля МПТ при нагрузке.
8. Назовите основные причины искрения на коллекторе МПТ.
9. Приведите оценки степени искрения на коллекторе МПТ.
10. Перечислите основные потери мощности МПТ.
11. Приведите обозначения выводов МПТ.
12. Расскажите принцип действия МПТ (на примере генератора).
13. Изобразите конструктивную схему дополнительного полюса МПТ.
14. Приведите соотношения для расчета шагов петлевой и волновой обмоток МПТ.
15. Приведите соотношения для ЭДС обмотки якоря МПТ.
16. Приведите соотношения для расчета электромагнитного момента МПТ.
17. Запишите уравнение для МДС магнитной цепи МПТ.
18. Изобразите типичную характеристику намагничивания магнитной цепи МПТ.
19. Назовите составляющие ЭДС коммутируемой секции обмотки якоря МПТ.
20. Покажите характер изменения тока коммутации МПТ при различных условиях.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 2. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Основные соотношения и классификация генераторов постоянного тока

На современных судах с электроэнергетической системой постоянного тока в качестве источников электрической энергии используются генераторы постоянного тока. Это такие электромеханические устройства, которые преобразуют механическую энергию первичного двигателя (паровой или газовой турбины, дизеля) в электрическую. В зависимости от типа первичного двигателя генераторы делятся на турбогенераторы, газогенераторы, дизель-генераторы. В электроэнергетических системах на переменном токе для питания потребителей постоянного тока используют электромашинные преобразователи, которые представляют собой агрегат, состоящий из приводного двигателя переменного тока и генератора постоянного тока.

По способу возбуждения генераторы постоянного тока делятся на две группы - генераторы независимого возбуждения и генераторы с самовозбуждением. Генераторы с независимым возбуждением разделяются на магнитоэлектрические генераторы и генераторы с электромагнитным возбуждением. У магнитоэлектрических генераторов основной магнитный поток создается постоянными магнитами, в генераторах с электромагнитным возбуждением магнитный поток создается одной или несколькими обмотками возбуждения, расположенными на главных полюсах машины. Обмотка возбуждения генератора независимого возбуждения получает питание от постороннего источника электрической энергии постоянного тока (рисунок 2.1, а).

В генераторах с самовозбуждением обмотки возбуждения получают питание от самого генератора. На возбуждение в зависимости от мощности генератора расходуется (0,3..5)% номинальной мощности.

Генераторы с самовозбуждением, в зависимости от способа включения обмоток возбуждения в электрическую цепь машины, подразделяются на генераторы параллельного возбуждения (шунтовые) (рисунок 2.1, б), генераторы последовательного возбуждения (сериесные) (рисунок 2.1, в) и генераторы смешанного возбуждения (компаундные) (рисунок 2.1, г).

В генераторах параллельного возбуждения обмотка возбуждения включается параллельно обмотке якоря. Обычно эти обмотки выполняются с большим числом витков из проводников небольшого сечения. По ним проходит ток возбуждения, который составляет (1..5)% номинального тока $I_н$. В этих машинах ток якоря I_a равен сумме токов нагрузки $I_н$ и возбуждения $I_в$.

Генераторы последовательного возбуждения имеют обмотку возбуждения, включенную последовательно с обмоткой якоря. При этом ток нагрузки $I_н$, ток якоря I_a и ток возбуждения $I_в$ являются одним и тем же током. Последовательная обмотка рассчитывается на номинальный ток машины и выполняется из проводников большого сечения с небольшим числом витков.

Генераторы смешанного возбуждения имеют две обмотки возбуждения –параллельную, включенную параллельно обмотке якоря и последовательную, включенную последовательно с обмоткой якоря.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

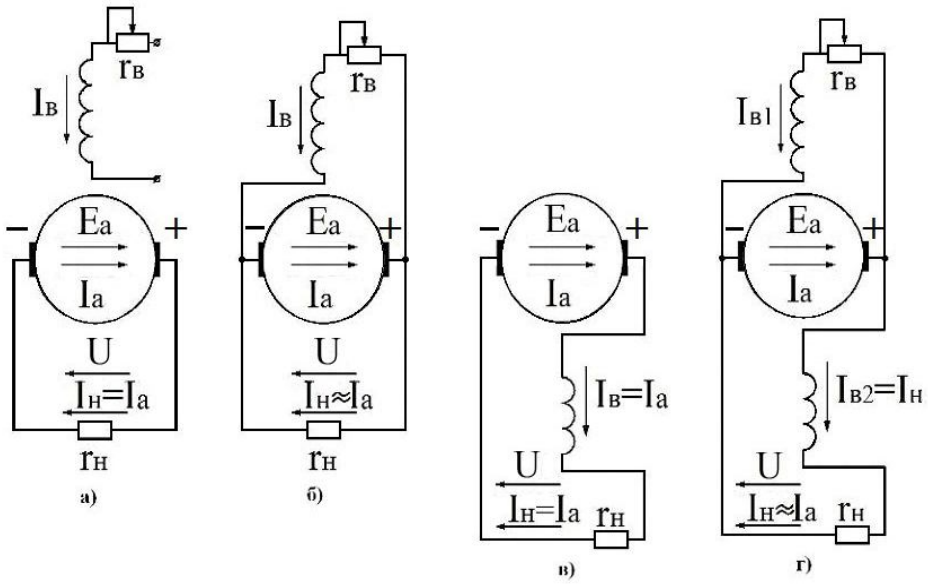


Рисунок 2.1 – Схемы генераторов независимого (а), параллельного (б), последовательного (в), смешанного (г) возбуждения

Если эти обмотки включены так, что создаваемые ими МДС совпадают по направлению, т.е. складываются, то такое включение называется согласным. Если МДС не совпадают по направлению, т.е. вычитаются, то включение называется встречным. Обычно применяют согласное включение обмоток. У генераторов смешанного возбуждения основная МДС создается параллельной обмоткой.

В цепях обмоток параллельного и независимого возбуждения для регулирования тока возбуждения включают регулировочные реостаты. В судовых электроэнергетических системах применяют генераторы независимого, параллельного и смешанного возбуждения.

2.2. Уравнения электрического и механического равновесия генераторов постоянного тока

При работе генератора постоянного тока в его якорной обмотке индуктируется ЭДС E_a. При подключении к генератору нагрузки $r_н$ (рисунок 2.1) в цепи якоря появляется ток I_a и на зажимах устанавливается напряжение U.

Уравнение равновесия ЭДС по второму закону Кирхгофа для цепи якоря генератора записывается в виде

$$U = E_a - I_a \Sigma r = c_c n\Phi - I_a \Sigma r, \qquad (2.1)$$

где I_a – ток в обмотке якоря; Σr- сумма сопротивлений участков цепи якоря.

В общем случае

$$\Sigma r = r_a + r_д + r_c + r_k ,$$

где r_a, $r_д$, r_c, $r_к$ - сопротивления обмоток якоря, добавочных полюсов, последовательной обмотки возбуждения и компенсационной обмотки.

Умножив обе части выражения (2.1) на ток I_a, получим уравнение мощности генератора

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$UI_a = E_a I_a - I_a^2 \Sigma r, \qquad (2.2)$$

где $UI_a = P_2$ – полезная мощность, отдаваемая генератором подключенным потребителям; $E_a I_a = P_{эм}$ – электромагнитная мощность генератора; $I_a^2 \sum r = \Delta P_м$. - потери в цепи якоря.

Из выражения (2.1) следует, что ЭДС генератора E_a имеет две составляющие: одна U выводится на зажимы генератора и действует на подключенную нагрузку, а другая $I_a \sum r$ преодолевает омическое сопротивление цепи якоря и называется падением напряжения в якоре генератора.

Уравнение вращающих моментов для установившегося режима работы имеет вид

$$M_1 = M_{эм} + M_0, \qquad (2.3)$$

где $M_1 = \frac{P_1}{\Omega}$ - вращающий момент первичного двигателя; $M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\Omega}$ электромагнитный момент генератора; $M_0 = \frac{P_0}{\Omega}$ - момент холостого хода, соответствующий потерям на трение, потерям в стали и добавочным потерям.

В неустановившихся режимах, когда частота вращения изменяется, возникает также динамический (вращающий) момент

$$M_{дин} = J \frac{d\Omega}{dt} \qquad (2.4)$$

где J - момент инерции вращающихся частей генератора.

Динамический момент соответствует кинетической энергии вращающихся масс. При изменении частоты вращения генераторного агрегата от установившихся значений в сторону увеличения динамический момент оказывает тормозящее действие, т.е. действует согласно с $M_{эм}+M_0$, а при изменении частоты вращения в сторону уменьшения, момент $M_{дин}$ оказывает ускоряющее действие, т.е. совпадает с M_1 первичного двигателя. Следовательно, в общем случае при n≠const уравнение моментов будет иметь вид

$$M_1 = M_{эм} + M_0 \pm M_{дин}. \qquad (2.5)$$

Уравнение электрического равновесия генератора (2.1) дает возможность установить зависимость между любыми электрическими величинами в генераторе, т.е. определить характеристики машины. Основными величинами, определяющими режимы работы генераторов, являются: U, I_a, $I_в$, n. Генераторы чаще всего работают с постоянной частотой вращения, поэтому основные характеристики снимаются при n = const.

2.3. Характеристики генераторов независимого возбуждения

Характеристика холостого хода. Определяет зависимость напряжения U_0 от тока возбуждения при $I_a = 0$ и n = const. Для снятия этой характеристики собирается схема, показанная на рисунке 2.2. Выключатель "Р" отключен, генератор разгоняется до номинальной час-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

тоты вращения, снятие характеристики начинают с тока $I_в$=0. При этом, ввиду наличия магнитного потока остаточного намагничивания, в проводниках обмотки якоря индуктируется ЭДС $E_{ост}$, величина которой обычно составляет (2…3)% от $U_н$ генератора.

При увеличении тока в обмотке возбуждения от нуля до максимального значения, напряжение генератора возрастает по кривой 1.

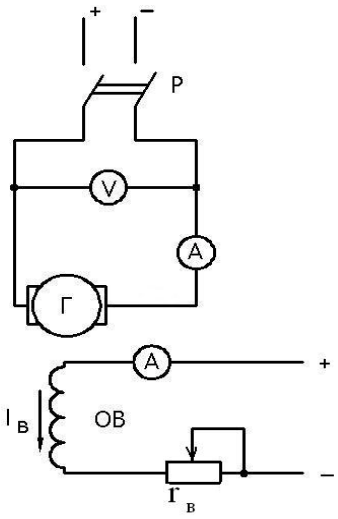


Рисунок 2.2 – Схема для снятия характеристики холостого хода

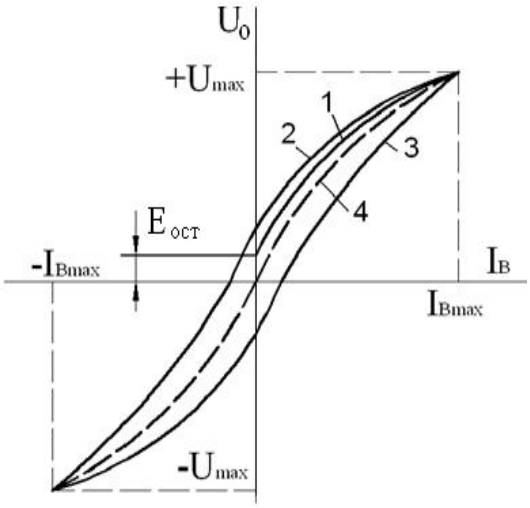


Рисунок 2.3 – Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

Обычно ток возбуждения увеличивают до тех пор, пока напряжение на зажимах генератора не достигнет значения (1,1…1,25) $U_н$. Затем ток возбуждения уменьшают до нуля, изменяют его направление на обратное и вновь увеличивают до $I_в$= - $I_{вmax.}$. Напряжение при этом изменяется от +U_{max} до -U_{max} по кривой 2, которая называется нисходящей ветвью. Кривая 2 проходит выше кривой I, что объясняется процессами перемагничивания магнитной цепи. Далее изменяют ток возбуждения от -$I_{вmax}$ до +$I_{вmax}$, при этом напряжение меняется от -U_{max} до +U_{max} по кривой 3, называемой восходящей ветвью характеристики холостого хода. Кривые 2 и 3 образуют петлю гистерезиса, которая определяет свойства стали магнитной цепи машины. Проведя между ними среднюю линию 4, получают так называемую расчетную характеристику холостого хода, которой пользуются на практике.

Следует отметить, что при снятии характеристики холостого хода изменять ток возбуждения нужно только в одном направлении, чтобы точки принадлежали одной ветви.

Анализ характеристики холостого хода показывает, что начальная часть кривой представляет собой практически прямую линию, так как при малых токах $I_в$ почти вся МДС идет на преодоление магнитного сопротивления воздушного зазора. По мере увеличения тока $I_в$ и возрастания потока Ф сталь магнитопровода насыщается и зависимость $U_0 = f(I_в)$ становится нелинейной.

Точка, соответствующая напряжению $U_н$, лежит обычно на перегибе характеристики холостого хода. Это связано с тем, что при работе на прямолинейном участке характеристики напряжение генератора неустойчиво, а в насыщенной части кривой ограничены возможно-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

сти регулирования напряжения генератора. Таким образом характеристика холостого хода имеет важное значение для оценки свойств генератора.

Нагрузочные характеристики. Определяют зависимости напряжения от тока возбуждения при I_a = const и n = const. Схема для снятия этих характеристик та же, что и для снятия характеристики холостого хода, но в этом случае к генератору подключена нагрузка и по цепи якоря проходит постоянный по величине ток, а напряжение генератора меньше ЭДС вследствие 2-х причин - падения напряжения в цепи якоря $I_a\Sigma r$ и размагничивающего действия реакции якоря. Поэтому все нагрузочные характеристики расположены ниже расчетной характеристики холостого хода (рисунок 2.4). Можно считать, что характеристика холостого хода есть частный случай нагрузочной характеристики при I = 0. Обычно нагрузочную характеристику снимают при $I_a = I_н$.

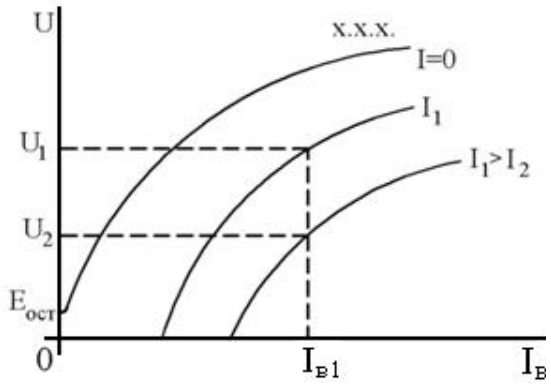


Рисунок 2.4 - Нагрузочные характеристики генератора независимого возбуждения

Внешняя характеристика. Определяет зависимость напряжения генератора U от тока нагрузки I, т.е. U = f(I) при n = const и $I_в$= const, что при независимом возбуждении равносильно условию $r_в$= const .

Внешняя характеристика генератора снимается по схеме рисунка 2.5.

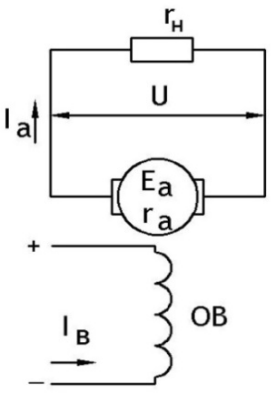


Рисунок 2.5 – Схема для снятия внешней характеристики

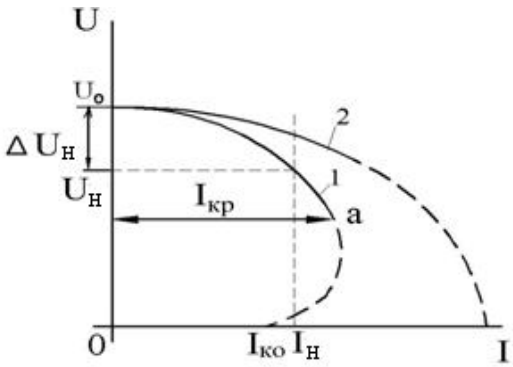


Рисунок 2.6 – Внешние характеристики генератора: 1 –параллельного возбуждения; 2 –независимого возбуждения

Сначала доводят скорость генератора до номинальной частоты вращения, и возбудив генератор, нагружают его до номинальной нагрузки. При этом устанавливают такой ток возбуждения $I_в = I_{вн}$, чтобы при токе нагрузки $I = I_н$ напряжение на генераторе было равно номинальному $U_н$. Затем постепенно уменьшают нагрузку до нуля и снимают показания приборов. По мере уменьшения нагрузки напряжение на генераторе будет возрастать по двум причинам - из-за уменьшения падения напряжения в цепи обмотки якоря $I_a\sum r$ и уменьшения размагни-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

чивающего действия реакции якоря. При переходе к холостому ходу (I = 0) напряжение возрастает на величину $\Delta U_н$ (рисунок 2.6), которая называется номинальным изменением напряжения генератора и определяется по формуле

$$\Delta U_н = \frac{U_о - U_н}{U_н} \cdot 100\% \cdot \qquad (2.6)$$

ГОСТ регламентирует величину изменения напряжения генератора (у генераторов независимого возбуждения $\Delta U_н$ = 5...10%).

При коротком замыкании генератора, т.е. уменьшении сопро тивления нагрузки до нуля, напряжение на его зажимах падает до нуля (U = 0), а ток короткого замыкания во много раз превосходит номинальный $I_{кз}$= (6…15)$I_н$. Поэтому режим короткого замыкания для генераторов независимого возбуждения является очень опасным, особенно для коллектора и щеточного аппарата из-за возможности возникновения сильного искрения или кругового огня.

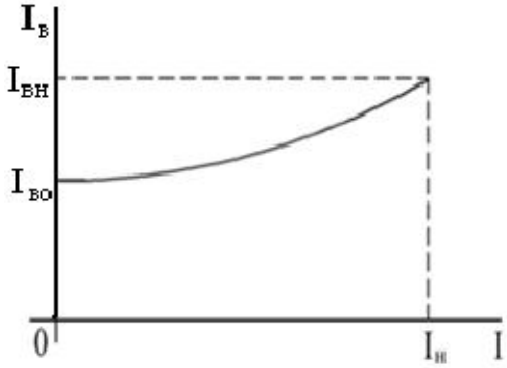


Рисунок 2.7 – Регулировочная характеристика генератора

Регулировочная характеристика. Определяет зависимость тока возбуждения $I_в$ от тока нагрузки I, т.е. $I_в$ = f(I) при n = const и U = const (рисунок 2.7).

Регулировочная характеристика показывает, как надо изменять ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение на генераторе оставалось неизменным по величине.

С увеличением нагрузки ток возбуждения необходимо увеличивать чтобы скомпенсировать увеличение падения напряжения на обмотке якоря $I_a\sum r$ и размагничивающее действие реакции якоря.

При переходе от холостого хода к номинальной нагрузке увеличение тока возбуждения составляет (10…15)%.

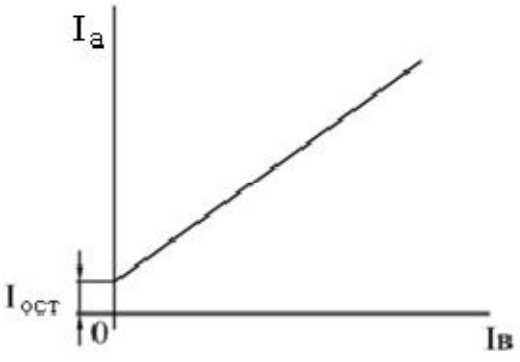


Рисунок 2.8 – Характеристика короткого замыкания

Характеристика короткого замыкания. Определяет зависимость тока цепи якоря I_a от тока возбуждения I_a = f($I_в$) при U = 0 и n = const.

Для снятия этой характеристики зажимы генератора замыкают накоротко, разгоняют генератор до номинальной частоты вращения и увеличивая ток возбуждения от нуля доводят ток якоря до $I_{кз}$= (1,25..1,5)$I_н$. По полученным данным строят характеристику короткого замыкания (рисунок 2.8).

Эта характеристика носит вспомогательный характер и при испытании генератора обычно не снимается.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

2.4. Генераторы параллельного возбуждения

2.4.1. Условия самовозбуждения генератора

В генераторах с самовозбуждением, а к ним относится и генератор параллельного возбуждения, обмотки возбуждения получают питание непосредственно от якоря самого генератора, при этом посторонний источник питания им не требуется.

Самовозбуждение генератора возможно при выполнении трех условий:

1) наличие потока остаточного намагничивания магнитной цепи $\Phi_{ост}$;

2) согласное направление магнитного потока остаточного намагничивания и магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения генератора;

3) сопротивление цепи возбуждения $r_в$ должно быть ниже некоторого критического значения, а частота вращения должна быть не ниже номинального значения.

В электрической машине практически всегда существует небольшой, порядка (2...5)% от номинального, поток остаточного намагничивания. Если в генераторе такой поток отсутствует, то необходимо его намагнитить, пропустив ток по обмотке возбуждения от постороннего источника.

Если привести якорь генератора во вращение с частотой, равной номинальной, то под действием потока остаточного намагничивания в обмотке якоря возникает небольшая ЭДС $E_{ост}= c_e n\Phi_{ост}$, равная (2...5)% от $U_н$.

Под действием этой ЭДС по цепи возбуждения потечет ток, который создает добавочный поток намагничивания $\Phi_{доб}$. Ток, создающий $\Phi_{доб}$, равен

$$I_в = \frac{E_{ост}}{r_a + r_в}, \qquad (2.7)$$

где $r_в=r_{рв}+r_{шо}$; $r_{рв}$ -сопротивление регулировочного реостата; $r_{шо}$ - сопротивление параллельной обмотки возбуждения; r_a - сопротивление цепи якоря.

В зависимости от направления тока $I_в$ в обмотке возбуждения поток $\Phi_{доб}$ может быть направлен либо встречно относительно $\Phi_{ост}$, либо согласно с ним. При встречном направлении $\Phi_{ост}$ и $\Phi_{доб}$ процесс самовозбуждения идти не будет, т.к. не выполняется второе условие. В этом случае необходимо поменять направление тока $I_в$, переключив концы питания обмотки возбуждения. Если потоки направлены согласно, то развивается процесс самовозбуждения, который можно представить в виде следующий логической схемы

$$\left.\begin{matrix}\Phi_{ост}\\ \\ n\end{matrix}\right\} \rightarrow E_{ост} \rightarrow I_в \rightarrow F_{доб} \rightarrow \Phi_{доб} \rightarrow E\uparrow \rightarrow I_в\uparrow \rightarrow \text{ и т.д..}$$

При выполнении двух первых условий процесс самовозбуждения будет развиваться до определенного предела. Этот предел зависит от сопротивления цепи возбуждения $r_в$, вида ее вольт-амперной характеристики и вида характеристики холостого хода. На рисунке 2.9 представлены характеристики холостого хода (1) при частоте вращения ге-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

нератора n_1, и (2) при частоте вращения $n_2 > n_1$, и вольтамперные характеристики цепи возбуждения генератора (3-6) при различных углах α.

Определим предел, до которого идет процесс самовозбуждения. При этом считаем, что генератор работает на холостом ходу, т.е. $I_a = 0$.

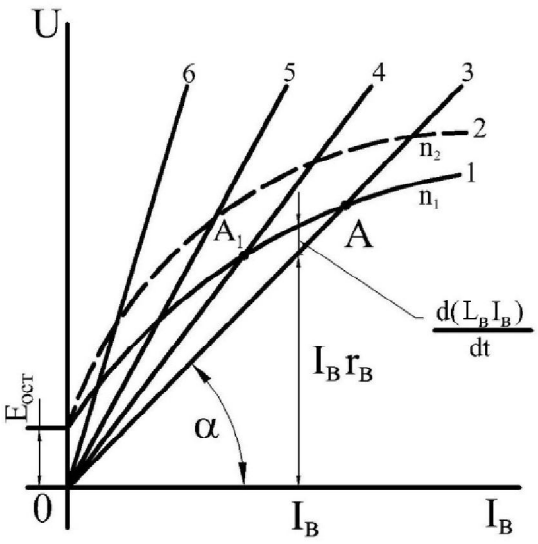


Рисунок 2.9 – Условия самовозбуждения генератора параллельного возбуждения

При самовозбуждении $I_в \neq const$ и следовательно уравнение ЭДС может быть написано следующим образом

$$U_B = I_B r_B + \frac{d(L_B I_B)}{dt}; \quad (2.8)$$

или

$$U_B - I_B r_B = \frac{d(L_B I_B)}{dt}, \quad (2.9)$$

где $U_в$- напряжения возбуждения, равные изменяющемуся напряжению U на генераторе; $I_в$ - ток возбуждения; $r_в$ – сопротивление цепи возбуждения; $L_в$ -индуктивность цепи возбуждения.

Так как $r_в = const$, то напряжение $I_в r_в$ изменяется прямо пропорционально току $I_в$. Графически эта зависимость выражается прямой (3) (рисунок 2.9), выходящей из начала координат под углом α, причем

$$tg\alpha = \frac{I_в r_в}{I_в} = r_в, \quad (2.10)$$

следовательно, каждому значению $r_в$ соответствует определенная характеристика цепи возбуждения, выходящая из начала координат под углом, определяемым формулой (2.10)

При работе генератора на холостом ходу ток $I_в$ мал, поэтому можно считать, что $I_a r_a \approx 0$, тогда из уравнения равновесия ЭДС следует, что $U = E_a$ и процесс изменения напряжения на зажимах генератора определяется характеристикой холостого хода (кривая I). Отрезки ординат между кривой 1 и линией 3 дают разность $U_в - I_в r_в = \frac{d(L_в I_в)}{dt}$ и служат мерой интенсивности происходящего процесса самовозбуждения, т.е. скорости изменения тока возбуждения. Очевидно, что этот процесс окончится тогда, когда разность $U_в - I_в r_в$ станет равной нулю, т.е. установившееся значение тока $I_в$ определяется точкой А пересечения характеристик 1 и 3.

Если увеличить $r_в$, то вольтамперная характеристика пойдет круче и примет положение 4. Процесс самовозбуждения в этом случае замедляется и заканчивается в точке A_1 при меньшем напряжении на генераторе. При дальнейшем увеличении $r_в$ получим прямую 5, и далее 6 - касательную к начальной части характеристики холостого хода. Значение $r_в$, соответствующее прямой 6, называется критическим ($r_{вкр}$). При сопротивлении цепи обмотки возбуждения, равной и большей $r_{вкр}$ генератор практически не возбуждается.

Если изменять частоту вращения генератора, то вид характеристики холостого хода меняется (кривая 2), следовательно, величина

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

критического сопротивления $r_{вкр}$ зависит также от частоты вращения генератора. Большей частоте вращения генератора соответствует большее значение критического сопротивления $r_{вкр}$.

2.4.2. Характеристики генератора параллельного возбуждения

Характеристика холостого хода $U_0 = f(I_в)$ при $I = 0$ и $n = const$. В процессе самовозбуждения в генераторах параллельного возбуждения $I_а = I_в$, причем $I_в = (0{,}02…0{,}03)I_н$. Поэтому можно пренебречь реакцией якоря и падением напряжения в обмотке якоря и считать, что между характеристиками холостого хода генератора параллельного возбуждения и независимого возбуждения практически нет разницы. Следует учесть однако, что эта характеристика может быть снята только в одном квадранте, так как процесс самовозбуждения в данном генераторе может протекать только в одном направлении при согласном действии остаточного магнитного потока и потока, создаваемого током возбуждения, причем на прямолинейном участке характеристики напряжение генератора не удается регулировать как у генератора независимого возбуждения, что определяет меньший диапазон регулирования его напряжения.

Нагрузочная характеристика $U = f(I_в)$ при $I = const$ и $n = const$. Нагрузочные характеристики генератора параллельного возбуждения практически совпадают с характеристиками генератора независимого возбуждения, так как увеличение тока $I_а$ на величину тока возбуждения при параллельном возбуждении не может оказать заметного влияния на напряжение генератора.

Внешняя характеристика $U = f(I)$ при $r_в = const$ и $n = const$ (рисунок 2.6, кривая 1) показывает влияние изменения нагрузки на напряжение генератора. При этом ток возбуждения не регулируется с помощью регулировочного реостата. Следует учесть, что при независимом возбуждении $I_в = \frac{U_в}{I_в} = const$, а при параллельном возбуждении

$$I_в = \frac{U_в}{I_в} = \frac{U}{I_в} \neq const.$$

Последнее равенство означает, что при снятии внешней характеристики ток возбуждения генератора изменяется пропорционально напряжению на генераторе. Таким образом, уменьшение напряжения генератора параллельного возбуждения при увеличении его нагрузки вызывается не только размагничивающим действием реакции якоря и падением напряжения в цепи якоря, но и уменьшением тока возбуждения. Поэтому внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (рисунок 2.6, кривая 1) располагается ниже внешней характеристики генератора независимого возбуждения (кривая 2).

В генераторе параллельного возведения ток нагрузки I будет увеличиваться только до определенного критического значения $I_{кр} = (2..2{,}5)I_н$, после чего он начнет уменьшаться до $I_{ко} < I_н$. Действительно $I = \frac{U}{r_н}$, т.е. ток зависит от двух факторов – напряжения генератора U и сопротивления нагрузки $r_н$. Уменьшение сопротивления $r_н$ ведет к увеличению тока I, а это приводит к уменьшению напряжения U по вышеуказанным причинам. Вначале, пока генератор насыщен, маг-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

нитный поток Ф при уменьшении тока возбуждения спадает не очень значительно. По этой причине и напряжение падает сначала медленно.

Сопротивление $r_н$ в этот период снижается быстрее, чем напряжение U, и ток I растет. По мере увеличения тока I сверх номинального, напряжение U начинает уменьшаться быстрее, т.к. генератор переходит в ненасыщенное состояние (на прямолинейных участках характеристики холостого хода) и поток Ф начинает спадать пропорционально уменьшению тока возбуждения. Наступает момент, когда уменьшение напряжения опережает уменьшение $r_н$ и ток I, достигнув критического значения $I_{кр}$, начинает уменьшаться (рисунок 2.6, пунктирная часть кривой 1). Начиная с точки а , дальнейшее уменьшение $r_н$ не вызывает увеличения тока I, а наоборот, происходит его уменьшение, т.к. напряжение U падает быстрее, чем сопротивление $r_н$. При коротком замыкании U = 0, $I_в$= 0 и ток $I_{ко}$ определяется только потоком остаточного намагничивания. Таким образом, короткое замыкание, вызванное постепенным уменьшением сопротивления нагрузки, не опасно для генераторов параллельного возбуждения. Однако, при внезапном коротком замыкании ток успевает достигнуть значений $I_{кз}$= (8…15)$I_н$. Это обусловлено значительной индуктивностью обмотки возбуждения (большая постоянная времени обмотки), что приводит к постепенному уменьшению тока возбуждения $I_в$ и процесс уменьшения магнитного потока происходит значительно медленнее, чем процесс нарастания тока в цепи якоря. Поэтому для защиты генераторов параллельного возбуждения от токов короткого замыкания необходимы быстродействующие автоматические выключатели, как и для генераторов независимого возбуждения.

Регулировочная характеристика $I_в$= f(I) при n = const и U = const снимается так же как и для генератора независимого возбуждения и практически получается такой же, как и при независимом возбуждении, т.к. ток возбуждения очень мал и падение напряжения $I_в r_а$ в цепи якоря от тока возбуждения также очень мало и не оказывает заметного влияния на напряжение генератора.

Характеристика короткого замыкания $I_к$= f($I_в$) при n = const и U = 0 может быть снята только при питании обмотки возбуждения от постороннего источника, т.к. при самовозбуждении при U = 0 ток возбуждения $I_в$= 0.

2.5. Генераторы последовательного возбуждения

В генераторах последовательного возбуждения обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря, поэтому $I_в$= $I_а$= I (рисунок 2.1,в). Следовательно, характеристику холостого хода, нагрузочные характеристики, регулировочную и характеристику короткого замыкания можно снять только по схеме генератора независимого возбуждения.

При нормальном включении обмотки возбуждения снимается только внешняя характеристика: U = f(I) при n = const (рисунок 2.10, кривая 1). При холостом ходе напряжение генератора определяется потоком остаточного намагничивания. После подключения и по мере увеличения нагрузки ток $I_в$= I увеличивается, а следовательно увеличивается и напряжение генератора U. Вначале рост напряжения происходит линейно (машина ненасыщенна), а затем

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

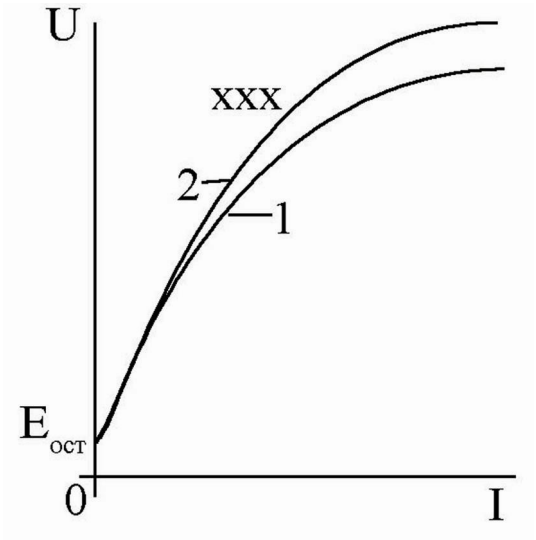


Рисунок 2.10 – Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения

при достижении насыщения процесс роста напряжения замедляется и при достаточно большом значении тока I начинает уменьшаться. Это объясняется тем, что вследствие насыщения магнитной системы магнитный поток Ф практически не увеличивается, а реакция якоря и падение напряжения в цепи якоря продолжают возрастать.

Генераторы последовательного возбуждения вследствие сильной зависимости напряжения на зажимах от тока нагрузки в обычной практике не применяются.

2.6. Генераторы смешанного возбуждения

Генератор смешанного возбуждения имеет параллельную и последовательную обмотки возбуждения, поэтому он совмещает в себе свойства генераторов обоих типов (рисунок 2.1, г). Обмотки возбуждения могут включаться согласно или встречно. При согласном включении обмоток возбуждения МДС обоих обмоток направлены в одну сторону и при увеличении нагрузки магнитный поток увеличивается. При встречном включении МДС обмоток направлены встречно и результирующий магнитный поток при увеличении нагрузки уменьшается. Как правило, применяется согласное включение обмоток возбуждения, при этом главную роль играет параллельная обмотка возбуждения. Последовательная обмотка предназначена для компенсации МДС реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря при определенной нагрузке. Этим достигается практически постоянное по величине напряжение генератора в определенных пределах изменения тока нагрузки.

Характеристика холостого хода генератора смешанного возбуждения ничем не отличается от характеристики генератора параллельного возбуждения т.к. на холостом ходу ток в последовательной обмотке равен нулю и генератор работает как параллельный.

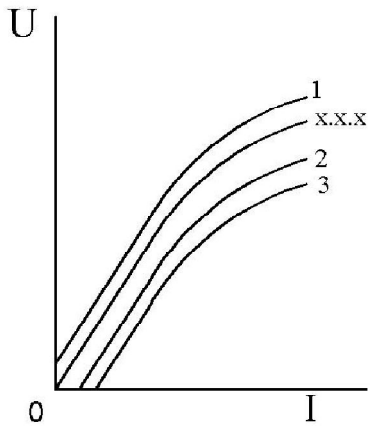


Рисунок 2.11 – Нагрузочные характеристики генератора смешанного возбуждения

Нагрузочные характеристики.

$U = f(I_в)$ при I = const и n = const (рисунок 2.11) имеют аналогичный вид, что и у генератора независимого возбуждения. Однако при согласном включении последовательной обмотки нагрузочная характеристика генератора смешанного возбуждения (кривая 2) пойдет выше, чем такая же характеристика генератора независимого или паралельного возбуждения (кривая 3). При

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

достаточно сильной последовательной обмотке возбуждения нагрузочная характеристика может располагаться выше характеристики холостого хода (кривая 1). В последнем случае действие последовательной обмотки возбуждения можно рассматривать как подмагничивающую реакцию якоря.

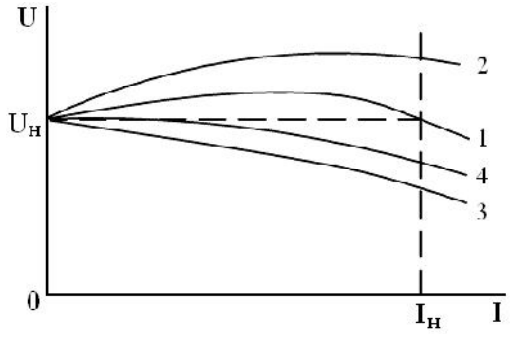


Рисунок 2.12 – Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения

Внешняя характеристика $U = f(I)$ при $r_в = const$ и $n = const$ (рисунок 2.12). Вид характеристики зависит от числа ампервитков последовательной обмотки возбуждения. При согласном включении можно рассчитать последовательную обмотку так, чтобы напряжение генератора U при токе $I_в$ было равно номинальному напряжению $U_н$, т.е. в этом режиме МДС последовательной обмотки полностью компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря. Поэтому у такого генератора по мере увеличения тока на грузки напряжение на зажимах изменяется незначительно (кривая 1). Для поддержания постоянного напряжения на зажимах приемников электроэнергии необходимо скомпенсировать еще и падение напряжения в линии электропередачи, действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря. В этом случае усиливают последовательную обмотку и внешняя характеристика такого перекомпаундированного генератора будет иметь вид кривой 2. Если обмотки возбуждения включены встречно, то напряжение генератора при росте нагрузки будет резко падать (кривая 3). Генератор называют в этом случае противокомпаундным. Такое включение используют в сварочных генераторах. Для сравнения на рисунке 2.12 дана характеристика генератора параллельного возбуждения (кривая 4).

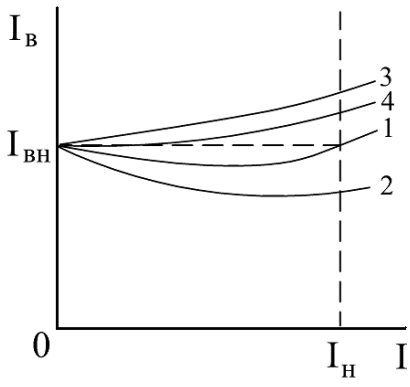


Рисунок 2.13 – Регулировочные характеристики генератора смешанного возбуждения

Регулировочная характеристика $I_в = f(I)$ при $U = const$ и $n = const$ (рисунок 2.13). Для нормально-компаундированного генератора (кривая 1) ток возбуждения в параллельной обмотке при изменении нагрузки от $I = 0$ до $I = I_н$ должен изменяться незначительно, т.к. размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря компенсируется последовательной обмоткой. В перекомпаундированном генераторе (кривая 2) при росте нагрузки необходимо даже снижать ток возбуждения, т.к. в таком генераторе с ростом нагрузки поток будет увеличиваться за счет увеличения МДС последовательной обмотки.

В противокомпаундном генераторе для поддержания $U = const$ с ростом нагрузки необходимо резко увеличивать ток возбуждения $I_в$ в

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

параллельной обмотке (кривая 3). Для сравнения на рисунке 2.13 показана регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения (кривая 4).

Характеристика короткого замыкания. Эта характеристика может быть снята только при питании параллельной обмотки возбуждения от постороннего источника питания и при встречном включении последовательной обмотки, т.к. при согласном включении возникает недопустимо большой ток короткого замыкания. Если затем снять характеристику короткого замыкания с отключенной последовательной обмоткой, то можно определить МДС этой обмотки и теоретически построить характеристику короткого замыкания для случая согласного включения обмоток.

2.7. Параллельная работа генераторов

В судовых электроэнергетических системах с целью увеличения живучести устанавливаются два и более генераторов. Суммарная мощность генераторов всегда несколько больше суммарной мощности всех потребителей. Установка нескольких генераторов повышает живучесть и экономичность системы, дает возможность проводить плановые осмотры и ремонты генераторов, выводя их поочередно из действия.

Судовые генераторы могут работать раздельно, без электрической связи между собой, или совместно, при параллельном соединении. Различают кратковременную и длительную параллельную работу генераторов. Кратковременная параллельная работа предназначена для плавного перевода нагрузки с одного генератора на другой с последующим отключением первого генератора или раздельной их работы. Совместная параллельная работа генераторов имеет ряд преимуществ:

- перевод нагрузки с одного генератора на другой осуществляется плавно, без перерыва питания;
- обеспечивается бесперебойность питания потребителей при выходе из строя одного из генераторов;
- обеспечивается более высокое качество электроэнергии (меньше колебания напряжения);
- обеспечивается возможность поочередного проведения технических осмотров и ремонтов генераторов.

К недостаткам параллельной работы генераторов следует отнести:

- усложнение схемы включения и управления генераторами;
- значительное увеличение тока при коротких замыканиях в электроэнергетической системе.

Рассмотрим параллельную работу генераторов постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения, т.к. генераторы последовательного возбуждения в таком режиме обычно не применяются, а в параллельной работе генераторов параллельного и независимого возбуждения практически различий нет.

Включение на параллельную работу генераторов параллельного возбуждения. Принципиальная схема параллельной работы генераторов изображена на рисунке 2.14.

Допустим, что первый генератор $Г_1$ включен на шины и работает с некоторой нагрузкой, создавая на шинах напряжение U. Генератор $Г_2$, работающий на холостом ходу, требуется включить в работу так, чтобы не изменился режим первого генератора, а ток генератора $Г_2$ при включении равнялся нулю.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Для замкнутого контура, образованного генератором $Г_2$ и участком шин между ним и сетью, составим уравнение по второму закону Кирхгофа

$$U = E_{a2} - I_{a2} r_{a2} . \qquad (2.11)$$

Отсюда следует, что ЭДС генераторов должны быть направлены встречно относительно друг друга. Следовательно, условия включения генераторов параллельного возбуждения на параллельную работу можно сформулировать так:

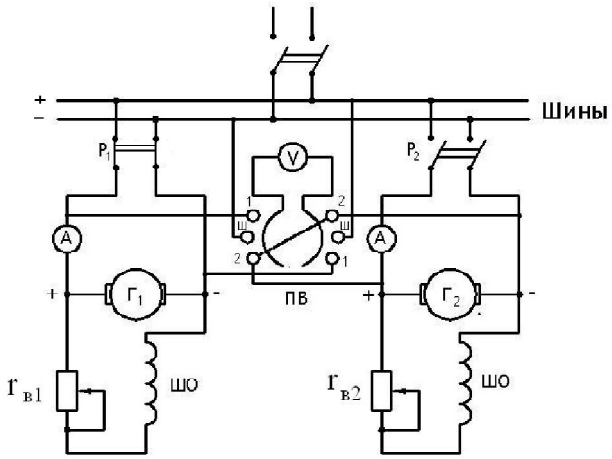


Рисунок 2.14 – Схема параллельной работы генераторов параллельного возбуждения

1. Полярность зажимов работающего и подключаемого генератора должна быть одинаковой.

2. ЭДС подключаемого генератора должна быть равна напряжению сети, к которой он подключается.

При выполнении этих условий ток генератора $Г_2$ будет равен нулю, а режим генератора $Г_1$ не изменится, так как

$$I_{a2} = \frac{E_{a2} - U}{r_{a2}} = 0. \qquad (2.12)$$

Если включить генератор $Г_2$ с неправильной полярностью, в замкнутой цепи, образованной якорями обоих генераторов и шинами, их ЭДС будут складываться и, так как сопротивление этой цепи очень мало, то возникает очень большой ток, что приведет к аварии.

Перевод и распределение нагрузки. После подключения генератора $Г_2$ к сети, можно принимать на него нагрузку. Для двух работающих параллельно генераторов уравнения равновесия напряжений цепи якоря можно представить в виде

$$E_{a1} - I_{a1} r_{a1} = U = E_{a2} - I_{a2} r_{a2}, \qquad (2.13)$$

откуда получаются соотношения для токов нагрузки

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_{a1} - U}{r_{a1}} = \frac{c_{e1} n_1 \Phi_1 - U}{r_{a1}} \\ I_2 &= \frac{E_{a2} - U}{r_{a2}} = \frac{c_{e2} n_2 \Phi_2 - U}{r_{a2}} \end{aligned}\right\} \qquad (2.14)$$

Из уравнений (2.14) видно, что для принятия нагрузки на генераторы нужно увеличивать ЭДС, которые можно изменять либо изменением числа оборотов генератора, либо изменением тока возбуждения. Обычно частота вращения генераторов поддерживается постоян-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ной с помощью автоматического регулятора скорости (АРС) и на практике ЭДС генераторов регулируют изменением тока возбуждения.

Для принятия нагрузки на генератор $Г_2$ нужно увеличить ток $I_{в2}$ путем уменьшения сопротивления $r_{в2}$ в цепи возбуждения. ЭДС E_{a2} становится больше напряжения U, в результате чего в якоре генератора $Г_2$ возникает ток I_2. Если ток нагрузки не изменяется, то с появлением тока I_2 ток I_1 уменьшается. Если E_{a1} при этом не изменять, то разность $E_{a1} - I_1 r_{a1}$ увеличивается и напряжение на шинах начинает расти. Поэтому для поддержания U = const одновременно с увеличением E_{a2} нужно уменьшать E_{a1} путем уменьшения тока возбуждения $I_{в1}$. Таким образом можно перевести часть или всю нагрузку с генератора $Г_1$ на генератор $Г_2$. В реальных судовых ЭЭС для поддержания числа оборотов генераторов постоянными включаются в работу АРС, которые изменяют подачу топлива, пара и т.д. в первичный двигатель.

Как правило, в качестве генераторов для параллельной работа выбираются машины равной мощности, внешние характеристики которых совпадают. Тогда можно нагружать генераторы равномерно при одинаковом токе возбуждения. Если внешние характеристики не совпадают, то генераторы при параллельной работе нагружаются разными токами. На рисунке 2.15 показаны внешние характеристики двух генераторов, имеющие разный наклон. Допустим, что оба генератора включены параллельно и работают на холостом ходу с напряжением U_0. При включении на них номинальной нагрузки равной $2I_н$ на шинах устанавливается номинальное напряжение $U_н$.

Этому напряжению по внешним характеристикам соответствуют токи нагрузки генераторов I_1 и I_2, причем $I_1+I_2 = 2I_н$. Как видим, генератор, имеющий более "мягкую" характеристику (1), оказывается недогруженным, а с более "жесткой" характеристикой (2) – перегружен. В этом случае для равномерной нагрузки обоих генераторов необходимо увеличивать ток возбуждения первого генератора и уменьшать его у второго генератора до уравнивания токов I_1 и I_2.

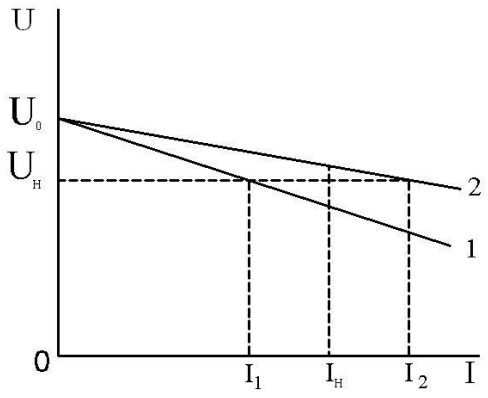


Рисунок 2.15 – Внешние характеристики генераторов

Если генераторы имеют различные мощности и предназначены для параллельной работы, то для пропорционального распределения нагрузки соответственно их мощностям без регулирования тока возбуждения, необходимо, чтобы совпадали их относительные характеристики $U = f(I/I_н)$. В этом случае нагрузка будет распределяться пропорционально номинальным мощностям генераторов.

Особенности параллельной работы генераторов смешанного возбуждения. Принципиальная схема включения генераторов смешанного возбуждения при параллельной работе представлена на рисунке 2.16.

Ее отличительная особенность состоит в том, что точки (I) и (2), в которых последовательные обмотки возбуждения подключены к одноименным зажимам якоря, соединены между собой уравнительным

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

проводом, который позволяет обеспечить устойчивую параллельную работу генераторов.

Чтобы уяснить необходимость уравнительного провода, рассмотрим параллельную работу генераторов смешанного возбуждения

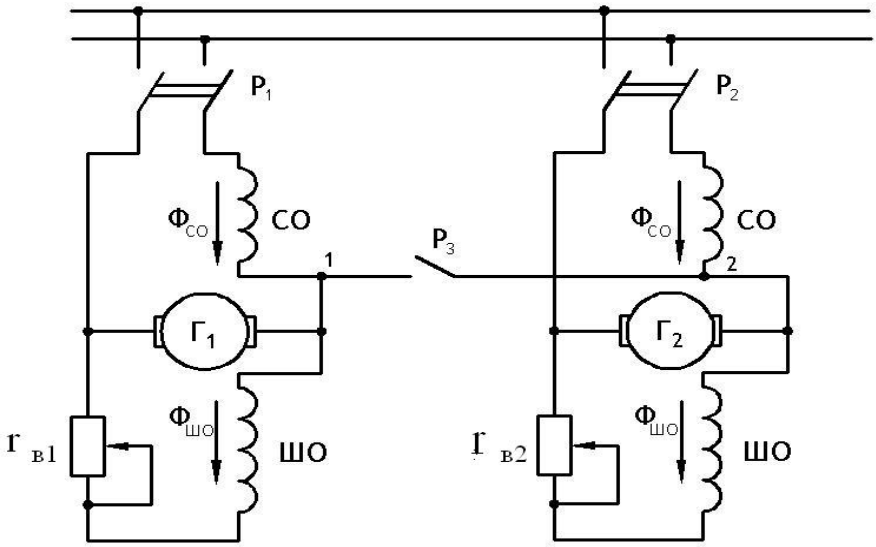


Рисунок 2.16 – Схема параллельной работы генераторов смешанного возбуждения

без уравнительного провода. Допустим, что работают два генератора одинаковой мощности, с одинаковой частотой вращения, одинаковым внутренним сопротивлением $r_{a1} = r_{a2}$, при этом нагрузки, ЭДС и магнитные потоки их также равны.

Если по какой-либо причине скорость одного, например, первого генератора, возрастает, то это вызовет увеличение его ЭДС E_{a1}, а следовательно и увеличение тока нагрузки на этот генератор. Благодаря наличию последовательной обмотки, рост нагрузки влечет за собой увеличение результирующего магнитного потока этого генератора, что приводит к еще большему возрастанию ЭДС, а соответственно и тока и т.д. В результате нагрузка данного генератора будет возрастать, а у второго генератора уменьшаться, вплоть до его перехода в двигательный режим, что опасно для обоих генераторов.

В дальнейшем чрезмерное увеличение нагрузки на первом генераторе вызывает снижение его частоты вращения, а следовательно и ЭДС. Нагрузка начинает переходить на второй генератор и таким образом возникает колебательный процесс перехода нагрузки с одного генератора на другой и параллельная работа получается неустойчивой.

При наличии уравнительного провода 1-2 (рисунок 2.16), последовательные обмотки оказываются включенными параллельно. Следовательно, их токи всегда находятся в одном и том же отношении, определяемом сопротивлениями этих обмоток.

Если теперь почему-либо ЭДС E_{a1} генератора $Г_1$ станет больше ЭДС E_{a2} генератора $Г_2$, то в цепи между якорями возникает уравнительный ток, величина которого определяется выражением

$$I_{ур} = \frac{E_{a1} - E_{a2}}{r_{a1} + r_{a2}}, \qquad (2.15)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Таким образом, при увеличении ЭДС, а следовательно и тока в последовательной обмотке одного генератора в том же отношении увеличится ток и в последовательной обмотке другого генератора. В соответствии с этим одновременно увеличатся ЭДС и нагрузочные токи обоих генераторов и колебательный процесс происходить не будет. Это равенство токов в последовательных обмотках будет сохраняться при любой нагрузке. Если параллельно работают генераторы разной мощности, то сопротивления их последовательных обмотках будут не равны, поэтому токи в этих обмотках будут распределяться обратно пропорционально их сопротивлениям. Однако в любом случае изменение тока в одном генераторе приведет к изменению тока и в другом и колебательный процесс происходить не будет. В этих условиях параллельная работа генераторов смешанного возбуждения становится вполне устойчивой.

Прием и распределение нагрузки в генераторах смешанного возбуждения производится также, как в генераторах параллельного возбуждения путем изменения тока в параллельных обмотках возбуждения.

2.8. Электромашинные усилители

Электромашинный усилитель представляет собой генератор постоянного тока, в котором используется поперечная реакция якоря. Принципиальная схема ЭМУ изображена на рисунке 2.17.

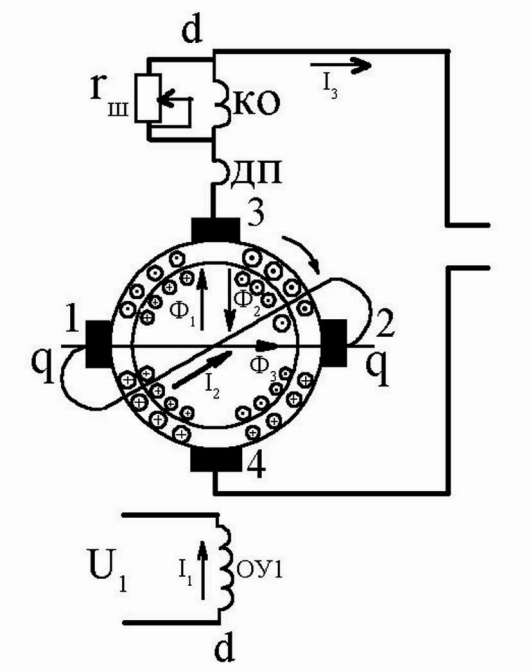


Рисунок 2.17 – Принципиальная схема ЭМУ с поперечным полем

На коллектор обычного якоря машины постоянного тока наложены две пары щеток - щетки 3-4 по продольной оси dd и щетки 1-2 по поперечной оси qq. Щетки по поперечной оси замкнуты накоротко. На статоре расположены две или в общем случае несколько обмоток управления ОУ, одна из которых (первичная) создает основной магнитный поток Φ_1, а на другие подаются сигналы, управляющие работой усилителя. Кроме управляющих обмоток на статоре имеются компенсационная обмотка КО и обмотки добавочных полюсов ДП по продольной оси.

Принцип действия ЭМУ. Подведем к первичной обмотке $ОУ_1$ небольшую мощность $P_1 = U_1 I_1$ и создадим поток Φ_1. При вращении якоря в этом потоке в его обмотке между щетками 1-2 индуктируется небольшая ЭДС E_2. Так как щетки 1-2 замкнуты накоротко, то под действием этой ЭДС в обмотке якоря возникает значительный, ввиду малого сопротивления цепи якоря, ток I_2, создающий магнитный поток Φ_2. Направление тока I_2, в проводниках обмотки якоря показано на рисунке 2.17 по внешнему кольцу якоря.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Величина потока $Ф_2$ значительно превышает поток $Ф_1$. Этот поток, который направлен по поперечной оси qq, является рабочим потоком, поэтому такие машины получили название ЭМУ поперечного поля. Поток $Ф_2$ в пространстве неподвижен, поэтому в той же обмотке якоря, между щетками 3-4 по продольной оси, он будет индуктировать ЭДС E_3, которая создает ток I_3 в рабочей цепи. Направление тока I_3 в проводниках обмотки якоря показано по внутреннему кольцу якоря. Таким образом, в обмотке якоря протекает одновременно два тока I_2 и I_3.

При подключении нагрузки ток I_3, протекая по обмотке якоря, создает поток реакции якоря $Ф_3$, направленный по продольной оси встречно $Ф_1$, т.е. стремится размагнитить машину. Чтобы скомпенсировать размагничивающее действие МДС реакции якоря, устанавливается компенсационная обмотка КО, которая включается в цепь нагрузки последовательно. В ЭМУ с поперечным полем компенсационную обмотку делают несколько больше, чем это требуется для полной компенсации реакции якоря от тока нагрузки. Это необходимо для того, чтобы при наладке машины получить нужную степень компенсации путем изменения величины шунтирующего сопротивления $r_ш$.

Для получения благоприятной коммутации под щетками 3-4 в зоне этих щеток устанавливают добавочные полюсы.

Таким образом, электромашинный усилитель с поперечным полем имеет две ступени усиления. Первой ступенью являются обмотка управления $ОУ_1$ и обмотка якоря, замкнутая накоротко щетками 1-2. Второй ступенью является обмотка якоря с щетками 1-2, являющаяся обмоткой возбуждения для второй ступени, и обмотка якоря с щетками 3-4, создающая нагрузочный ток.

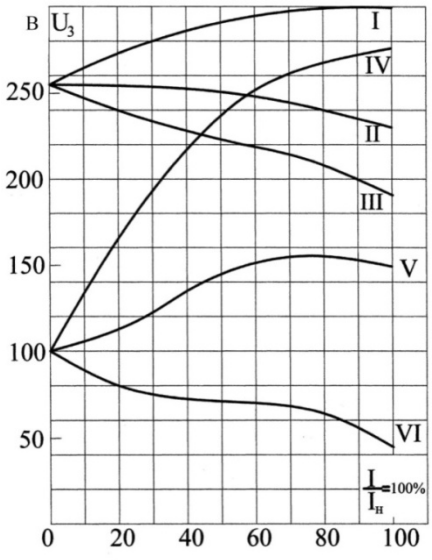


Рисунок 2.18 – Внешние характеристики ЭМУ
I и IV - при перекомпенсации;
II и V – при критической компесации;
III и VI – при недокомпенсации

Якорь ЭМУ поперечного поля не отличается от якоря обычной машины постоянного тока, но выполняется с более прецизионной балансировкой,так как ЭМУ крайне чувствительны к малейшим нарушениям щеточного контакта.

Рабочие свойства ЭМУ поперечного поля характеризуются мощностью на выходе, коэффициетом усиления, внешней характеристикой (рисунок 2.18), быстродействием.

На выходе ЭМУ получают мощность $P_3 = U_3I_3$, которая значительно превышает входную мощность P_1. Отношение мощности выхода к мощности входа называется коэффициентом усиления мощности $K_y = \frac{P_3}{P_1}$. В современных ЭМУ коэффициент усиления лежит в пределах 500…10000.

Для ЭМУ важно постоянство его коэффициента усиления по мощности при варьировании сигнала управления.Это требование, главным образом, обеспечивается за счет линейности статических характеристик ЭМУ и, впервую очередь, за счет линей-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ности его характеристики холостого хода. Отклонение характеристик ЭМУ от линейных обусловливается в основном магнитным насыщением и гистерезисом магнитопровода.

Быстродействие ЭМУ обычно оценивается по характеристикам переходных процессов при включении обмотки управления на постоянное напряжение. Грубо быстродействие ЭМУ оценивается по темпу нарастания выходного напряжения, определяемому по относительному приращению выходного напряжения во времени и взятому по линеаризированному среднему участку процесса. Эта величина обычно находится по номинальным данным ЭМУ

$$\Delta U / \Delta t = k U_н / P_н$$

Более точно быстродействие ЭМУ оценивается по частотным характеристикам.

Для оценки качества ЭМУ как машины часто пользуются коэффициентом качества (или добротности). Коэффициентом качества называют отношение коэффициента усиления ЭМУ к постоянной времени его выходной ступени Д = $k_у/T_э$.

Для современных ЭМУ коэффициент качества достигает 3000 и более.

Как отмечалось выше, в ЭМУ обычно предусматривается несколько обмоток управления. Каждая из этих обмоток создает свою МДС и магнитные потоки, которые индуктируют ЭДС в поперечной цепи якоря. Под действием этих ЭДС создается соответствующий ток возбуждения по поперечной оси, наводя аналогичную ЭДС между рабочими щетками. Таким образом, в ЭМУ усиливаются различные сигналы, подаваемые в обмотки управления.

ЭМУ с поперечным полем находят применение в схемах автоматического управления электроэнергетическими установками. Основными положительными качествами ЭМУ с поперечным полем являются высокое быстродействие, большой коэффициент усиления и относительная простота конструкции.

Отечественной промышленностью выпускается единая серия ЭМУ поперечного поля на мощности 0,3 до 11 кВт. Возможно расширение этой серии до 60 кВт. При мощности до 20 квт электромашинные усилители поперечного поля обычно имеют двухполюсное исполнение, а при мощности 40 кВт и выше (до 100кВт включительно) – четырех полюсное.

Стандартные скорости вращения для ЭМУ средних и больших мощностей приняты 1500 и 3000 об/мин.

Маломощные ЭМУ поперечного поля (до 1,5 кВт включительно) часто выполняются на повышенные скорости вращения – от 3000 до 7000 об/мин.

2.9. Серии судовых генераторов постоянного тока

В судовых установках генераторы постоянного тока применяются для питания силовых и осветительных сетей, а также для зарядки аккумуляторных батарей. Генераторы выполняются на напряжения 115 и 230В, а также на пониженные напряжения 26, 28, 36, 46В. Они выпускаются как с независимым возбуждением так и с самовозбуждени-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ем. Генераторы с самовозбуждением в зависимости от схемы возбуждения подразделяются на генераторы с параллельным возбуждением (шунтовые) и генераторы со смешанным возбуждением (компаундные).

Генераторы выполняются с самовентиляцией или принудительной вентиляцией. По исполнению корпус генератора может быть в брызгозащищённом и защищённом исполнении. Режим работы генераторов длительный.

На судах нашли применение генераторы серий П, ПМ, ПД, КГ, ГПМ. Изоляция обмоток генераторов выполняется влаго-, водо -, и маслостойкой. Классы изоляции обмоток якоря – А, В, Н; параллельной, последовательной и обмоток добавочных полюсов – А, В, Н и F. Судовые генераторы изготавливаются в горизонтальном исполнении, на лапах, с одним или двумя концами валов. Вращение генераторов против часовой стрелки, если смотреть со стороны коллектора. Генераторы допускают параллельную работу при идентичных внешних характеристиках при условии совпадения скоростных характеристик приводных двигателей. Как правило, длительная параллельная работа предусматривается лишь для генераторов смешанного возбуждения при наличии уравнительного провода.

2.10. Вопросы для самопроверки и контроля знаний

1. По каким признакам производится классификация судовых генераторов ?
2. Как классифицируются судовые генераторы постоянного тока по способу возбуждения ?
3. Запишите уравнение равновесия ЭДС генератора постоянного тока и поясните суть его составляющих.
4. Какую зависимость определяет характеристика холостого хода генератора постоянного тока ?
5. Начертите схему и опишите последовательность выполнения операций при снятии характеристики холостого хода генератора независимого возбуждения.
6. Какую зависимость определяют нагрузочные характеристики генераторов постоянного тока ?
7. Какую зависимость определяют внешние характеристики генераторов постоянного тока ?
8. Какую зависимость ределяют регулировочные характеристики генераторов постоянного тока ?
9. Перечислите условия самовозбуждения генераторов параллельного возбуждения.
10. Перечислите достоинства и недостатки параллельной работы генераторов в судовых условиях.
11. Перечислите условия включения генераторов параллельного возбуждения на параллельную работу.
12. Опишите порядок перевода и распределения нагрузки параллельно работающих генераторов постоянного тока.
13. Начертите схему параллельной работы генераторов параллельного возбуждения.
14. Начертите схему параллельной работы генераторов смешанного возбуждения.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 3. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Общие сведения о двигателях постоянного тока

Принцип обратимости электрических машин. Двигатели постоянного тока по конструкции не отличаются от генераторов и, как отмечалось, электрические машины постоянного тока могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, т.е. являются обратимыми. Допустим, что машина работает в режиме генератора на сеть с постоянным напряжением U=const и развивает тормозной (по отношению к первичному двигателю) момент (рисунок 3.1).

Для этого режима справедливы соотношения

$$E_a = U + I_a \sum r \quad \text{и} \quad I_a = \frac{E_a - U}{\sum r}, \tag{3.1}$$

где $\sum r$- полное сопротивление цепи якоря.

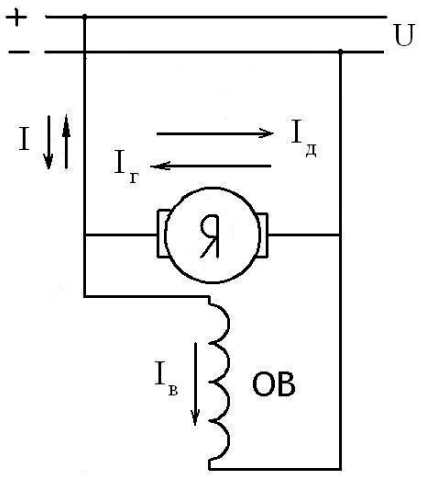


Рисунок 3.1 – Генераторный и двигательный режимы машины постоянного тока

Если уменьшать ЭДС E_a генератора, уменьшая его частоту вращения или магнитный поток Ф, то будет уменьшаться и ток I_a. Когда E_a станет меньше напряжения U, ток I_a изменит свое направление, однако, поскольку U = const, направление тока $I_в$ в обмотке возбуждения, а следовательно и полярность основных полюсов останутся без изменения. При этих условиях изменяется знак электромагнитного момента $M_{эм}$ и машина переходит в двигательный режим, т.е. если прежде она работала генератором, преобразуя механическую мощность в электрическую, то теперь она потребляет электрическую мощность, преобразуя эту мощность в механическую и развивая на валу вращающий момент $M_д$. При этом машина продолжает вращаться в прежнем направлении. Если отсоединить первичный двигатель и приложить к валу машины момент сопротивления механизма M_c, то он будет преодолеваться электромагнитным моментом $M_c = M_{эм}$.

Классификация двигателей постоянного тока. Аналогично генераторам, двигатели постоянного тока классифицируются по способу включения обмотки возбуждения по отношению к обмотке якоря - независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Схемы двигателей и генераторов с перечисленными способами возбуждения одинаковы и приведены на рисунке 2.1. Все типы двигателей в зависимости от вида возбуждения имеют различные характеристики, но в основе их работы лежит один и тот же энергетический процесс, характеризуемый уравнениями равновесия ЭДС и моментов.

Уравнение ЭДС двигателя в установившемся режиме работы имеет вид

$$U = E_a + I_a \Sigma r \cdot \tag{3.2}$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

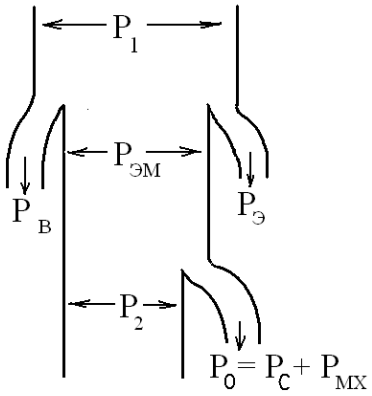


Рисунок 3.2 – Энергетическая диаграмма

ЭДС E_a в обмотке якоря направлена встречно приложенному напряжению, поэтому ее называют противо ЭДС.

Энергетическая диаграмма. Энергетический процесс рассмотрим на примере двигателя параллельного возбуждения с помощью энергетической диаграммы (рисунок 3.2). Двигатель потребляет из сети мощность $P_1 = U(I_a+I_в)$. Часть этой мощности тратится на покрытие потерь на возбуждение $\Delta P_в = UI_в$ и потери в цепи якоря $\Delta P_э = I_a^2 \Sigma r$. Оставшаяся часть мощности представляет собой электромагнитную мощность якоря $P_{эм}$, которая преобразовывается в полную механическую мощность

$$P_{эм} = U(I_a+I_в) - UI_в - I_a^2 \Sigma r = UI_a - I_a^2 \Sigma r = E_a I_a, \qquad (3.3)$$

Полезная механическая мощность P_2, отдаваемая двигателем рабочему механизму, меньше мощности $P_{эм}$ на величину потерь холостого хода ΔP_o, включающих потери в стали якоря $\Delta P_{ст}$ и механические потери $P_{мех}$ (трение в подшипниках, вентиляционные и т.д.)

$$P_2 = P_{эм} - \Delta P_o = P_{эм} - (\Delta P_{с\,т} - \Delta P_{мех}). \qquad (3.4)$$

Полезная мощность P_2 обозначается на заводском щитке машины.

Аналогично происходит энергетический процесс в двигателях других типов.

Уравнение равновесия моментов. Уравнение вращающих моментов в установившемся режиме можно получить, разделив все члены равенства (3.4) на угловую скорость вращения двигателя Ω

$$\frac{P_{эм}}{\Omega} = \frac{P_2}{\Omega} + \frac{P_o}{\Omega} \quad \text{или} \quad M_{эм} = M_2 + M_o, \qquad (3.5)$$

где M_2 -момент сопротивления рабочего механизма; M_o-момент холостого хода.

Вращающий электромагнитный момент равен

$$M_{эм} = c_м I_a \Phi. \qquad (3.6)$$

Таким образом, вращающий электромагнитный момент расходуется на уравновешивание двух тормозящих моментов:

- момента сопротивления рабочего механизма M_2 ;
- момента холостого хода M_o, соответствующего потерям $P_o = P_c + P_{мх}$.

Момент M_2 называется полезным моментом, т.к. он соответствует полезной мощности двигателя P_2. В неустановившемся режиме скорость двигателя изменяется и на его валу возникает динамический момент. Уравнение равновесия моментов в таких режимах приобретает вид

$$M_{эм} = M_{ст} + M_j, \qquad (3.7)$$

где $M_{ст} = M_2 + M_o$ -статический момент сопротивления; $M_j = J\frac{d\Omega}{dt}$ динамический момент.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В зависимости от того, уменьшается или увеличивается частота вращения двигателя, динамический момент может быть отрицательным или положительным, т.е. в переходных режимах на валу двигателя создается момент M_j, который препятствует изменению скорости вращения двигателя и механизма. В установившемся режиме динамический момент $M_j = 0$.

Общие характеристики двигателей постоянного тока. Рабочие свойства электродвигателей постоянного тока оцениваются следующими характеристиками:

1. Пусковые характеристики, которые оценивают пусковые свойства электродвигателя. К ним относятся:

- кратность пускового тока $\kappa_i = \frac{I_{ап}}{I_{ан}}$,

где $I_{ап}$ - пусковой ток ; $I_{ан}$- номинальный ток нагрузки;

- кратность пускового момента $\kappa_м = \frac{M_п}{M_н}$, где $M_п = c_м I_{ап} Ф_п$;

- $t_п$ -время пуска;

- экономичность пуска (стоимость пусковой аппаратуры, пусковые потери).

2. Рабочие характеристики, под которыми понимают зависимости n, M и η от полезной мощности P_2 или тока якоря I_a при постоянных значениях напряжения U_c, сопротивления цепи якоря $\sum r$ и сопротивления цепи возбуждения $r_в$. Зависимость $n = f(P_2)$ называют скоростной характеристикой, зависимость $M = f(P_2)$- моментной характеристикой.

3. Механическая характеристика, представляющая собой зависимость $n = f(M)$ при постоянных значениях $U_н$, r_a, $r_в$.

4. Регулировочные характеристики, к которым относятся:

- диапазон регулирования скорости n_{max}/n_{min};
- экономичность регулирования (потери, стоимость аппаратуры);
- характер регулирования (плавность);
- простота, надежность и компактность регулировочной аппаратуры.

3.2. Характеристики двигателей параллельного возбуждения

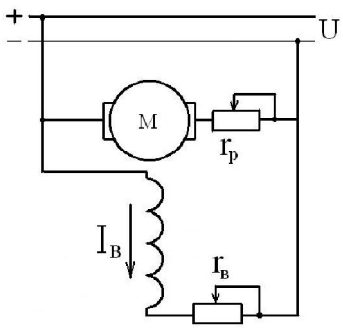


Рисунок 3.3 Схема двигателя параллельного возбуждения

Электродвигателем параллельного возбуждения называется двигатель постоянного сока, обмотка возбуждения которого включена параллельно обмотке якоря (рисунок 3.3).

При снятии характеристик к цепи якоря подводится номинальное напряжение $U_н = const$.

Ток, потребляемый двигателем из сети, определяется суммой $I = I_a + I_в$, ток возбуждения обычно равен $I_в = (0{,}03..0{,}04)I_н$. Все характеристики двигателя снимаются при постоянных сопротивлениях в цепях возбуждения $r_в = const$ и якоря $\Sigma r = const$.

Скоростная характеристика. Зависимость $n = f(I_a)$ при $U_н = const$ и $I_в = const$

Из уравнения ЭДС для электродвигателя (3.2) имеем

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{\sum r}{c_e \Phi} I_a \qquad (3.8)$$

Как видно из выражения (3.8) частота вращения двигателя зависит от двух факторов - изменения тока нагрузки и магнитного потока. При увеличении тока нагрузки падение напряжения в сопротивлении цепи якоря увеличивается, а частота вращения двигателя уменьшается.

Поперечная реакция якоря размагничивает магнитную цепь, с ростом тока I_a уменьшается поток и, следовательно, увеличиваются обороты двигателя. Таким образом, оба фактора действуют в отношении оборотов машины встречно и вид скоростной характеристики определяется их результирующим действием.

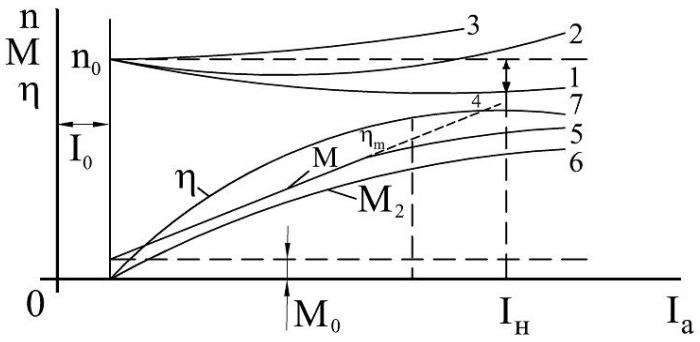


Рисунок 3.4 – Характеристики двигателя параллельного возбуждения

На рисунке 3.4 показаны три разные скоростные характеристики двигателя (кривые 1, 2, 3). Кривая 1 - скоростная характеристика при преобладании влияния $I_a\sum r$, кривая 2 - оба фактора приблизительно уравновешиваются, кривая 3 - преобладает фактор размагничивающего действия реакции якоря.

Ввиду того, что в реальных двигателях изменение потока Ф незначительно, скоростная характеристика является практически прямой линией. На ряде современных машин параллельного возбуждения для компенсации влияния поперечной реакции якоря устанавливается дополнительная стабилизирующая обмотка возбуждения, которая полностью или частично компенсирует влияние реакции якоря.

Нормальной формой скоростной характеристики, при которой обеспечивается устойчивая работа двигателя, является характеристика вида кривой 1.

Наклон характеристики определяется величиной сопротивления цепи якоря Σr без учета реакции якоря. Когда добавочных сопротивлений в цепь якоря не включено, характеристика называется естественной. Естественная характеристика двигателя параллельного возбуждения достаточно жесткая. Обычно $\Delta n/n_0 = (2\ldots8)\%$, где n_o - частота вращения при холостом ходе. При включении в цепь якоря добавочных сопротивлений $R_{рг}$, наклон характеристик увеличивается, они становятся "мягкими" и называются искусственными или реостатными.

Моментная характеристика – это зависимость $M = f(I_a)$ при $r_в$= const, $U = U_н$ и Σr = const. В установившемся режиме работы двигателя согласно (3.5) имеем $M_{эм} = M_2 + M_0 = c_м I_a \Phi$. Если бы в процессе работы машины поток Ф не изменялся, то моментная характеристика представляла бы собой прямую (характеристика 4, рисунок 3.4). В действительности поток Ф с ростом тока I_a несколько уменьшается из-за размагничивающего действия реакции якоря, поэтому моментная ха-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

рактеристика слегка наклонена вниз (кривая 5). Характеристика полезного момента располагается ниже кривой электромагнитного момента на величину момента холостого хода (кривая 6).

Характеристика КПД $\eta = f(I_a)$ снимается при $U = U_н$, $r_в = const$, $\Sigma r = const$ и имеет типичный для электродвигателей вид (характеристика 7 на рисунке 3.4). КПД быстро растет при увеличении нагрузки от холостого хода до $0{,}25P_н$, достигает максимального значения при $P = (0{,}5...0{,}75)P_н$, а затем до $P = P_н$ остается почти неизменным. Обычно в двигателях малой мощности $\eta = 0{,}75...0{,}85$, а в двигателях средней и большой мощности $\eta = 0{,}85...0{,}94$.

Механическая характеристика представляет зависимость $n = f(M)$ при $U = U_н$, $I_в = const$ и $\Sigma r = const$. Аналитическое выражение для механической характеристики можно получить из уравнения ЭДС электродвигателя

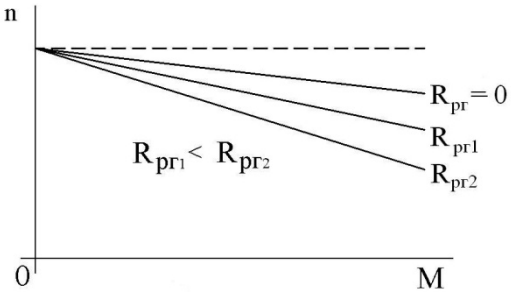


Рисунок 3.5 – Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

$$U = c_e n\Phi + I_a\left(\sum r + R_{pг}\right) \quad (3.9)$$

$$n = \frac{U}{c_e\Phi} - \frac{\sum r + R_{pг}}{c_e\Phi} I_a \quad (3.10)$$

Определив ток I_a из выражения $M = c_M I_a \Phi$ и подставив это значение тока в (3.10), получим

$$n = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{\sum r + R_{pг}}{C_e C_M \Phi^2} M. \quad (3.11)$$

Если пренебречь реакцией якоря и считать, что поток Ф не изменяется, то механические характеристики электродвигателя параллельного возбуждения можно представить в виде прямых (рисунок 3.5), наклон которых зависит от величины сопротивления $R_{рг}$ включенного в цепь якоря. При $R_{рг} = 0$ характеристика называется естественной.

Следует помнить, что при обрыве цепи возбуждения $I_в = 0$ при малых моментах сопротивления M_c на валу обороты двигателя $n \to \infty$, т.е. двигатель идет "вразнос", поэтому его необходимо немедленно отключить от сети.

3.3. Характеристики двигателей последовательного возбуждения

В двигателе последовательного возбуждения, который иногда называют сериесным, обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря (рисунок 3.6).

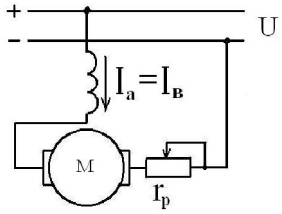


Рисунок 3.6 – Схема электродвигателя последовательного возбуждения

Для такого двигателя справедливо равенство $I_в = I_a = I$, следовательно, его магнитный поток Ф зависит от нагрузки $\Phi = f(I_a)$. В этом главная особенность двигателя последовательного возбуждения и она определяет его свойства.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

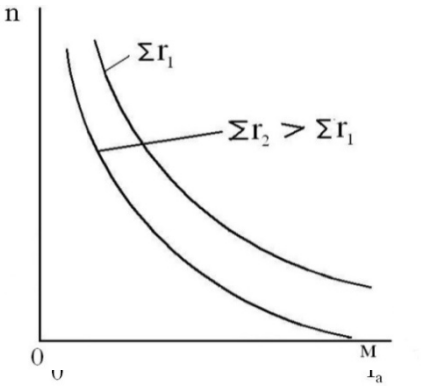


Рисунок 3.7 – Скоростные характеристики двигателя последовательного возбуждения

Скоростная характеристика представляет зависимость $n = f(I_a)$ при $U = U_н$. Она не может быть точно выражена аналитически во всем диапазоне изменения нагрузки от холостого хода до номинальной из-за отсутствия прямой пропорциональной зависимости между I_a и Ф. Приняв допущение $Ф = кI_a$, запишем аналитическую зависимость скоростной характеристики в виде

$$n = \frac{U}{c_e k I_a} - \frac{\sum r}{c_e k}. \qquad (3.12)$$

Как видно, это уравнение гиперболы.

При увеличении тока нагрузки гиперболический характер скоростной характеристики нарушается и приближается к линейному, так как при насыщении магнитной цепи машины с увеличением тока I_a магнитный поток остается практически постоянным (рисунок 3.7). Крутизна характеристики зависит от величины Σr.

Таким образом, скорость сериесного двигателя резко изменяется с изменением нагрузки и такая характеристика называется "мягкой".

При малых нагрузках (до $0{,}25I_н$) скорость двигателя последовательного возбуждения может возрасти до опасных пределов (двигатель идет "вразнос"), поэтому работа таких двигателей на холостом ходу не допускается.

Моментная характеристика - это зависимость $M = f(I_a)$ при $U = U_н$. Если предположить, что магнитная цепь ненасыщена и $Ф = кI_a$, имеем

$$M = c_м I_a Ф = c_м к I_a^2. \qquad (3.13)$$

Это уравнение квадратичной параболы.

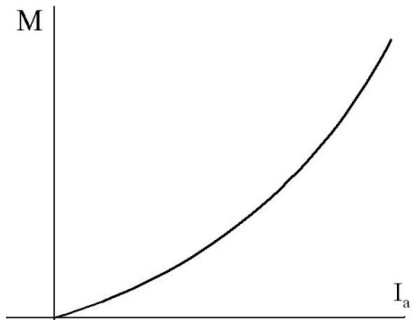


Рисунок 3.8 – Моментная характеристика двигателя последовательного возбуждения

Кривая моментной характеристики изображена на рисунке 3.8. По мере увеличения тока I_a магнитная система двигателя насыщается, и характеристика постепенно приближается к прямой. Таким образом, электродвигатель последовательного возбуждения развивает момент, пропорциональный I_a^2, и это определяет главное его преимущество. Так как при пуске $I_a = (1{,}5..2)I_н$, то двигатель последовательного возбуждения развивает значительно больший пусковой момент по сравнению с двигателями параллельного возбуждения, поэтому он широко используется в условиях тяжелых пусков и при возможных перегрузках.

Механическая характеристика представляет собой зависимость $n = f(M)$ при $U = U_н$.

Аналитическое выражение этой характеристики может быть получено только в частном случае, когда магнитная цепь машины ненасыщенна и поток Ф пропорционален току якоря I_a. Тогда можно записать

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

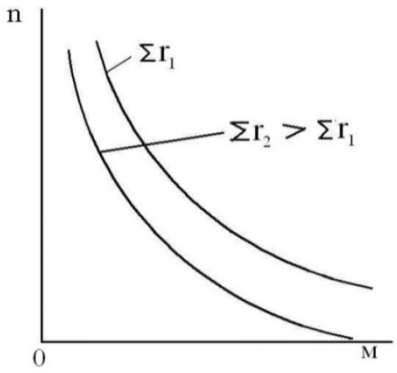


Рисунок 3.9 – Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e к I_a} - \frac{\Sigma r}{c_e к}. \quad (3.14)$$

Решая совместно уравнения (3.13) и (3.14), получаем

$$n = \frac{U\sqrt{c_м к}}{c_e к\sqrt{M}} - \frac{\Sigma r}{c_e к} = c_1 \frac{U}{\sqrt{M}} - c_2 \Sigma r, \quad (3.15)$$

т.е. механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения, также как и скоростная, имеет гиперболический характер (рисунок 3.9).

Характеристика КПД двигателя последовательного возбуждения имеет обычный для электродвигателей вид (рисунок 3.4).

3.4. Характеристики двигателей смешанного возбуждения

Принципиальная схема электродвигателя смешанного возбуждения приведена на рисунке 3.10. В этом двигателе имеются две обмотки возбуждения – параллельная (шунтовая, ШО), подключенная параллельно цепи якоря, и последовательная (сериесная, СО), подключенная последовательно цепи якоря. Также как в генераторе эти обмотки по магнитному потоку могут быть включены согласно или встречно. При согласном включении обмоток возбуждения их МДС складываются и результирующий поток Ф примерно равен сумме потоков, создаваемых обеими обмотками. При встречном включении результирующий поток равен разности потоков параллельной и последовательной обмоток. В соответствии с этим, свойства и характеристики электродвигателя смешанного возбуждения зависят от способа включения обмоток и от соотношения их МДС.

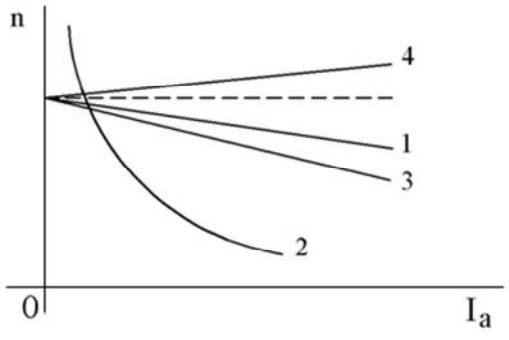


Рисунок 3.11 – Скоростные характеристики двигателя смешанного возбуждения

Скоростная характеристика $n = f(I_a)$ при $U = U_н$ и $I_в$= const (здесь $I_в$ - ток в параллельной обмотке).

С увеличением нагрузки результирующий магнитный поток при согласном включении обмоток возрастает, но в меньшей степени, чем у двигателя последовательного возбуждения, поэтому скоростная характеристика в этом случае оказывается более мягкой, чем у двигателя параллельного возбуждения, но более жесткой, чем у двигателя последовательного возбуждения.

Соотношение между МДС обмоток может меняться в широких пределах. Двигатели со слабой последовательной обмоткой имеют слабо падающую скоростную характеристику (кривая 1, рисунок 3.11). Чем больше доля последовательной обмотки в создании МДС, тем

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ближе скоростная характеристика приближается к характеристике двигателя последовательного возбуждения. На рисунке 3.11 линия 3 изображает одну из промежуточных характеристик двигателя смешанного возбуждения и для сравнения дана характеристика двигателя последовательного возбуждения (кривая 2).

При встречном включении последовательней обмотки с увеличением нагрузки результирующий магнитный поток уменьшается, что приводит к увеличению скорости двигателя (кривая 4). При такой скоростной характеристике работа двигателя может оказаться неустойчивой, т.к. поток последовательной обмотки может значительно уменьшить результирующий магнитный поток. Поэтому двигатели со встречным включением обмоток не применяются.

Механическая характеристика n = f(M) при $U = U_н$ и $I_в$= const. двигателя смешанного возбуждения показана на рисунке 3.12 (линия 2). Она располагается между механическими характеристиками двигателей параллельного (линия 1) и последовательного (кривая 3) возбуждения. Подбирая соответствующим образом МДС обеих обмоток, можно получить электродвигатель с характеристикой, близкой к характеристике двигателя параллельного или последовательного возбуждения.

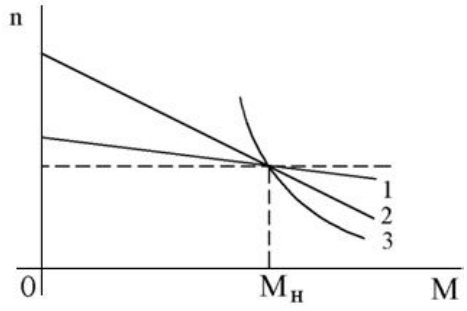


Рисунок 3.12 – Механические характеристики двигателя смешанного возбуждения

3.5. Серии судовых электродвигателей постоянного тока

В современных судовых и промышленных электроприводах находят применение судовые двигатели постоянного тока серий П, ПО, ПБ, ПР, ДПМ.

Электродвигатели серий П, ПО, ПБ, ПР предназначены для привода судовых вспомогательных механизмов продолжительного режима работы, имеют параллельное возбуждение со стабилизирующей последовательной обмоткой. По способу защиты от внешней среды они изготавливаются брызгозащищёнными (П и ПО) и водозащищенными (ПБ и ПР). По способу вентиляции двигатели изготавливаются: брызгозащищёнными с самовентиляцией (П) и обдуваемые (ПО); водозащищённые радиаторные (ПР) и без обдува (ПБ).

Наименование серий электродвигателей и последующие цифры расшифровываются следующим образом: П, ПО, ПБ, ПР- наименование серий; 4,5- порядковый номер габарита; 2- порядковая длина сердечника. Буква М- обозначает морское исполнение.

Для электродвигателей, которые могут работать также в условиях морского тропического климата в конце обозначения добавляется индекс Т.

Электродвигатели серии ДПМ предназначены для привода судовых механизмов, работающих в повторно-кратковременном и кратковременном режимах, имеют параллельное или смешанное возбуждение, изготавливаются водозащищёнными с пристроенными дисковы-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ми тормозами типа ТДП или без тормозов. Наименование серии расшифровывается так: Д-двигатель; П-постоянного тока, М-морской.

Кроме названных выше в судовых системах автоматики в качестве управляющих, преобразующих и исполнительных элементов нашли широкое применение электродвигатели малой мощности (0,05-600 Вт), которые по выполняемой функции делятся на две группы - исполнительные и вспомогательные. Исполнительные электродвигатели осуществляют регулирование заданного параметра или управление движением объекта регулирования. Вспомогательные электродвигатели предназначены для обеспечения вращательного движения с постоянной скоростью отдельных механизмов. К ним относятся, в частности, электродвигатели серии СЛ - двухполюсные машины защищённого исполнения, которые выполняются с параллельным возбуждением реверсивными и нереверсивными, с параллельным возбуждением для потенциометрических схем, с последовательным возбуждением - реверсивные и нереверсивные.

Электродвигатели серии МИ выполняются с независимым и параллельным возбуждением защищённого и закрытого исполнения.

Они могут поставляться с тахогенератором, который помещается в корпусе и крепится к торцевой части переднего подшипникового щита двигателя болтами.

Используются такие двигатели в системах автоматического регулирования в качестве исполнительных двигателей с якорным управлением, что обеспечивает линейные механические и регулировочные характеристики.

Электродвигатели серии ПЛ выпускаются защищённого исполнения с параллельным возбуждением.

Электродвигатели серии ДП предназначены для маломощных следящих автоматических систем с возможностью переключения тока якоря. Магнитный поток в них создается постоянными магнитами. Двигатели, имеющие в наименовании буквы ЦР, снабжены центробежным регулятором частоты вращения, который обеспечивает точность поддержания частоты вращения до 4%.

Электродвигатели серии СД - двухполюсные или четырехполюсные электрические машины с параллельным или последовательным возбуждением, применяются в качестве исполнительных двигателей в системах автоматики и маломощных следящих системах.

Электродвигатели серии ДРВ - двухполюсные машины с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением, снабжены вибрационно-центробежными регуляторами частоты вращения. Применяются в качестве приводных двигателей для устройств с постоянной частотой вращения.

3.6. Вопросы для самопроверки и контроля знаний

1. Как классифицируются двигатели постоянного тока по способу возбуждения ?
2. Изобразите энергетическую диаграмму ДПТ параллельного возбуждения.
3. Запишите уравнение равновесия моментов ДПТ и поясните суть его составляющих.
4. Какие свойства оценивают регулировочные характеристики ДПТ ?

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

5. Какие свойства оценивают пусковые характеристики ДПТ ?

6. Изобразите схему включения ДПТ параллельного возбуждения.

7. Покажите характеристику коэффициента полезного действия ДПТ параллельного возбуждения.

8. Запишите аналитическое выражение и покажите графическое изображение механической характеристики ДПТ параллельного возбуждения.

9. Как изменяется механическая характеристика ДПТ параллельного возбуждения при включении дополнительного сопротивления в цепь якоря ?

10. Изобразите схему включения ДПТ последовательного возбуждения.

11. Изобразите схему включения ДПТ смешанного возбуждения.

12. Запишите аналитическое выражение и покажите графическое изображение механической характеристики ДПТ последовательного возбуждения.

13. Как изменяется механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения при включении дополнительного сопротивления в цепь якоря ?

14. Изобразите на графике механическую характеристику ДПТ смешанного возбуждения.

15. Чем опасен обрыв обмотки возбуждения в ДПТ параллельного возбуждения ?

16. Чем опасна работа ДПТ последовательного возбуждения при сбросе нагрузки ?

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 4. СУДОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

4.1. Устройство и принцип действия трансформатора

4.1.1. Классификация и устройство трансформаторов

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения при неизменной частоте.

Трансформатор, как правило, состоит из стального замкнутого магнитопровода (сердечника) и двух или нескольких изолированных друг от друга обмоток, размещенных на сердечнике и электрически между собой не связанных (исключение составляют автотрансформаторы), клеммного щитка и корпуса (бака). Силовые трансформаторы мощностью свыше 20 кВ·А могут иметь масляное охлаждение, при котором сердечник с обмотками располагается в масляном баке.

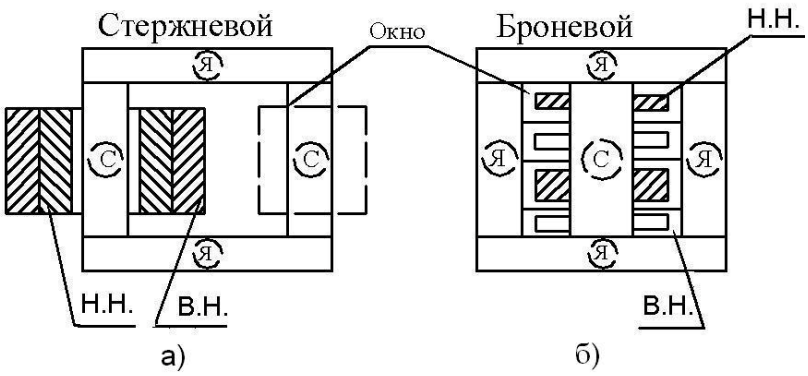


Рисунок 4.1 – Устройство трансформатора

По типу магнитопровода различают стержневые (рисунок 4.1, а) и броневые (рисунок 4.1, б) трансформаторы. Часть сердечника, которая соединяет между собой стержни и служит для замыкания магнитной цепи, называют ярмом. Пространство, ограниченное замкнутым сердечником и служащее для размещения обмотки, называют окном. Сердечник набирается (шихтуется) из изолированных листов специальной трансформаторной (электротехнической) стали толщиной 0,35 или 0,5 мм с малыми удельными потерями на гистерезис. Шихтовка сердечника позволяет в значительной степени уменьшить потери от вихревых токов.

По числу фаз трансформаторы делятся на однофазные, трехфазные и многофазные. В свою очередь однофазные трансформаторы могут быть двух- или многообмоточными.

Обмотки судового трансформатора изготовляются из медного провода круглого или прямоугольного поперечного сечения. По способу расположения на стержнях различают концентрические (рисунок 4.1, а) и чередующиеся обмотки (рисунок 4.1, б).

Обмотки, к которым энергия подводится от сети, называются первичными, другие, к которым подключаются потребители, называются вторичными. Аналогично все величины (число витков, напряжение, ток, мощность и др.), относящиеся к соответствующим обмоткам,

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

называют первичными или вторичными и обозначают символами с цифрами (соответственно W_1, U_1, I_1, P_1 или W_2, U_2, I_2, P_2 и др.)

Если вторичное напряжение меньше первичного, то трансформатор называется понижающим, если больше - повышающим. При концентрической форме обмоток ближе к стержню располагают обмотки низкого напряжения (НН), затем - обмотки высокого напряжения (ВН) (рисунок.4.I, а). По назначению трансформаторы разделяют на силовые и на специальные - сварочные, измерительные и т.п.

Все судовые трансформаторы имеют воздушное охлаждение и по исполнению делятся на водозащищенные (мощностью от 0,25 до 4,0 кВ·А при частоте 50 Гц и мощностью от 0,25 до 10 кВ·А при частоте 400 Гц), брызгозащищенные (от 6,3 до 100 кВ·А при 50 Гц и от 16 до 100 кВ·А при 400 Гц) и открытые (без защитного бака). К последним относятся однофазные трансформаторы мощностью 0,26, 0,63 и 1,0 кВ·А.

Защитный бак выполняют сварным из листовой стали. У трансформаторов водозащищенного исполнения он имеет цилиндрическую форму, у брызгозащищенного - прямоугольную. В баке предусмотрены сальники ввода кабелей и лапы для крепления трансформатора. На корпусе бака прикреплена заводская табличка, на которой приводятся следующие данные:

- завод-изготовитель, год выпуска и заводской номер трансформатора;
- тип трансформатора;
- номинальная мощность, в киловольт-амперах, число фаз, номинальное напряжение обмоток при холостом ходе, частота тока;
- схема и группа соединения обмоток трансформатора, которые необходимы для правильного включения трансформаторов на параллельную работу;
- напряжение короткого замыкания $U_к$% (в процентах от номинального напряжения), КПД при номинальной нагрузке, полная масса, исполнение корпуса, номинальные токи обмоток;
- расположение контактных зажимов, их обозначение и принципиальная схема соединения обмоток.

4.1.2. Принцип действия трансформатора

В основу работы трансформатора положен принцип электромагнитного взаимодействия двух или, в общем случае, любого числа контуров (обмоток), неподвижных друг относительно друга. Количественно это взаимодействие определяется уравнением

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -w\frac{d\Phi}{dt}, \qquad (4.1)$$

где e - мгновенное значение индуктируемой в контуре ЭДС; ψ- потокосцепление; w - число витков контура; Ф - магнитный поток взаимной индукции.

Принципиальная схема простейшего однофазного двухобмоточного трансформатора приведена на рисунке 4.2. Работает он следующим образом.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

При подключении первичной обмотки с числом витков w_1 к сети переменного тока с синусоидальным напряжением u_1 в обмотке возникает ток i_0, называемый током холостого хода и создающий магнитодвижущую силу (МДС) $F_0 = i_0 w_1$, под действием которой по сердечнику замыкается синусоидально изменяющийся во времени магнитный поток Φ_0. Этот поток называют основным магнитным потоком, или магнитным потоком взаимоиндукции.

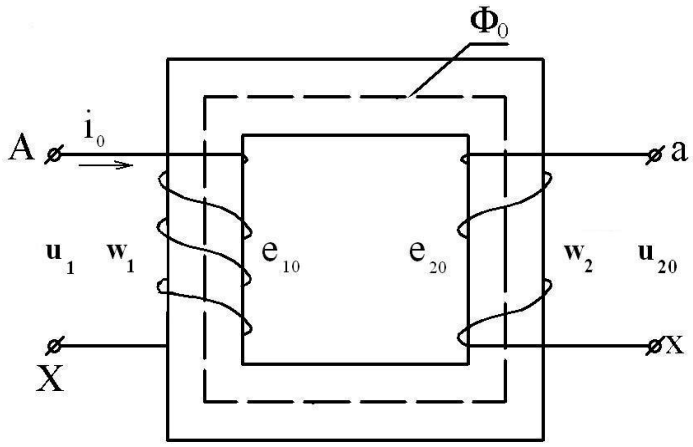


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема простейшего трансформатора

Поток Φ_0 пронизывает обе обмотки и индуктирует в них ЭДС e_{10} и e_{20} соответственно.

Этот процесс может быть представлен логической цепочкой взаимодействий

$$u_1 \rightarrow i_0 \rightarrow i_0 w_1 = F_0 \rightarrow \Phi_0 \begin{cases} \rightarrow e_{10} \\ \rightarrow e_{20} \end{cases}$$

Применение сердечника из электротехнической стали уменьшает магнитное сопротивление R_μ магнитному потоку Φ_0 и служит для усиления электромагнитной связи между обмотками. В соответствии с законом Ома для магнитной цепи

$$\Phi_o = \frac{F_o}{R_\mu} = \frac{w_1 i_o}{\ell / s\mu_o\mu_r}, \qquad (4.2)$$

где μ_0 и μ_r - магнитная постоянная и относительная магнитная проницаемость стали; ℓ и s - длина и поперечное сечение магнитопровода.

Таким образом, для создания определенного магнитного потока Φ_0 требуется тем меньшая МДС и тем меньший ток i_0, чем меньше сопротивление R_μ, т.е. чем больше магнитная проницаемость сердечника μ_r. Величина тока холостого хода в трансформаторе обычно составляет 3…5% от номинального тока нагрузки.

4.1.3. Напряжения и ЭДС в трансформаторе при холостом ходе

Если принять, что $\Phi_o = \Phi_{ом} \sin \omega t$, то величины ЭДС могут быть определены из уравнения (4.1) следующим образом

$$\left.\begin{aligned} e_{10} &= -\omega w_1 \Phi_{ом} \cos\omega t = \omega w_1 \Phi_{ом} \sin(\omega t - 90) \\ e_{20} &= -\omega w_2 \Phi_{ом} \cos\omega t = \omega w_2 \Phi_{ом} \sin(\omega t - 90) \end{aligned}\right\} \qquad (4.3)$$

Таким образом, ЭДС e_{10} и e_{20} по отношению к магнитному потоку Φ_0 сдвинуты на угол $-\pi/2$, т.е. во времени эти ЭДС отстают от Φ_0 на электрический угол 90°.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Действующие значения этих ЭДС равны

$$E_{10} = \frac{\omega w_1 \Phi_{ом}}{\sqrt{2}} = \pi\sqrt{2} f w_1 \Phi_{ом} = 4{,}44\ f w_1 \Phi_{ом}\ , \qquad (4.4)$$

$$E_{20} = \frac{\omega w_2 \Phi_{ом}}{\sqrt{2}} = \pi\sqrt{2} f w_2 \Phi_{ом} = 4{,}44\ f w_2 \Phi_{ом}. \qquad (4.5)$$

Отношение ЭДС обмотки ВН к ЭДС обмотки НН в режиме холостого хода называется коэффициентом трансформации и обозначается буквой k.

Для понижающего трансформатора

$$k = \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{W_1}{W_2}. \qquad (4.6)$$

По своему действию ЭДС E_{10} и E_{20} различны. ЭДС E_{10} является противоэдс, по отношению к приложенному напряжению U_1 она сдвинута на угол, примерно равный 180°эл. При холостом ходе трансформатора первичное напряжение U_1 почти полностью уравновешивается противоэлектродвижущей силой, т.е. $\overline{U}_1 \approx -\overline{E}_{10}$. ЭДС E_{20} является активной электродвижущей силой и при подключении вторичной обмотки к нагрузке она поддерживает ток в цепи. При холостом ходе $E_{20} = U_{20}$. Поэтому для коэффициента трансформации k можно записать

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{W_1}{W_2}. \qquad (4.7)$$

4.2. Режимы работы трансформатора

4.2.1. Холостой ход однофазного трансформатора

Приведенные при рассмотрении принципа действии трансформатора соотношения справедливы лишь для идеального трансформатора, в котором пренебрегают сопротивлениями обмоток и потерями в сердечнике и считают, что магнитный поток замыкается только по сердечику. В реальных условиях необходимо учитывать падения напряжения в обмотках и фактическую картину распределения магнитных полей.

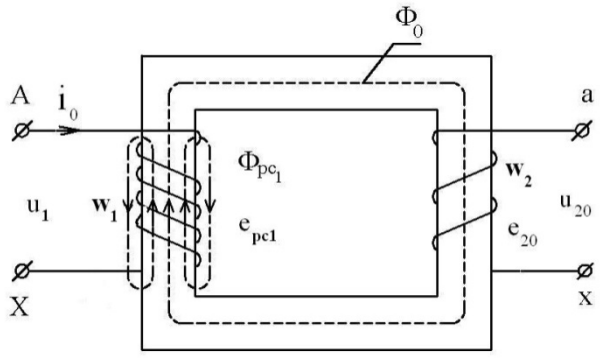


Рисунок 4.3 – Холостой ход однофазного трансформатора

В частности, при холостом ходе МДС F_0 кроме основного магнитного потока взаимоиндукции Φ_0, замыкающегося по сердечнику, создает магнитный поток рассеяния Φ_{pc1}, который замыкается, в основном, по воздуху и сцепляется только с первичной обмоткой (рисунок 4.3). Под действием этого магнитного потока в первичной обмотке индуктируется ЭДС самоиндукции e_{pc1}, действующее значение которой обычно рассчитывают по соотношению

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\mathbf{E}_{pc1} - I_0 x_{pc1} \qquad (4.8)$$

где x_{pc1} - индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки.

Для упрощения записи это сопротивление часто обозначают просто x_1. Оно равно

$$x_1 = \omega L_1, \qquad (4.9)$$

где L_1 - индуктивность рассеяния, определяемая по специальным формулам.

Таким образом, реально существующий магнитный поток рассеяния Φ_{pc1} первичной обмотки и соответствующая ему ЭДС E_{pc1} учитываются путем введения некоторого индуктивного сопротивления рассеяния x_1, падение напряжения на котором уравновешивает ЭДС E_{pc1}, т.е. в векторной форме равенство (4.8) записывают в виде

$$\bar{E}_{pc1} = -\bar{I}_0 x_1. \qquad (4.10)$$

Такой подход значительно упрощает анализ и расчет режимов работы трансформатора. Сопротивление x_1 практически постоянно, а величина E_{pc1} пропорциональна току первичной обмотки.

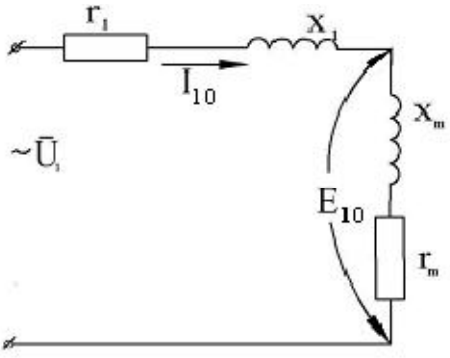


Рисунок 4.4 - Электрическая схема замещения фазы трансформатора на холостом ходу

Полное сопротивление первичной обмотки, кроме сопротивления x_1 учитывает также активное сопротивление r_1, т.е.

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} \quad . \qquad (4.11)$$

Электрическая схема замещения фазы первичной обмотки трансформатора на холостом ходу полностью аналогична схеме замещения катушки со стальным сердечником (рисунок 4.4).

Уравнение электрического равновесия трансформатора для режима холостого хода может быть записано в виде

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_{10} + \bar{I}_{10} r_1 + \bar{I}_{10} x_1$$

или

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_{10} + \bar{I}_0 z_1 \; . \qquad (4.12)$$

Таким образом, подводимое к первичной обмотке напряжение уравновешивается ЭДС самоиндукции E_{10} и падением напряжения на сопротивлениях r_1 и x_1 обмотки. Поскольку падение напряжения $\bar{I}_0 Z_1$ достаточно мало, уравнение (4.12) для режима холостого хода часто записывают в виде

$$\bar{U}_1 \approx -\bar{E}_{10} = 4{,}44 f w_1 \Phi_{0M}. \qquad (4.13)$$

Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода является графической иллюстрацией и решением уравнений (4.12). Векторы $\bar{E}_{10}$ и $\bar{E}_{20}$, как это следует из уравнений (4.3), отстают от вектора Φ_{0M} на 90° (рисунок 4.5). Величина напряжения $U_{20} = E_{20}$ и отличается от E_{10} в отношении коэффициента трансформации. Ток холостого хода I_0 несинусоидален и его представляют в виде двух составляющих: I_{0a} - активной, определяющей потери энергии в стали сердеч-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ника и в обмотке; I_{0p} - реактивной, необходимой для создания МДС F_0 и потоков Φ_0 и Φ_{pc1}.

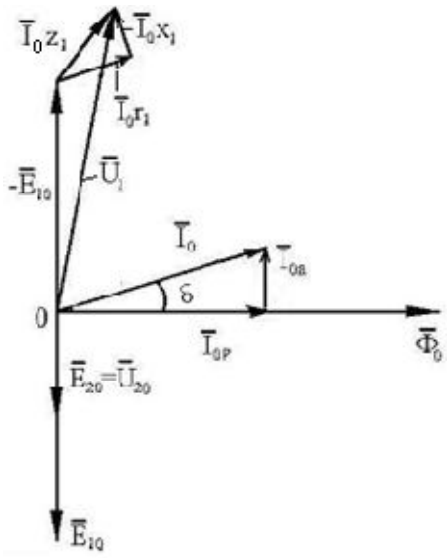


Рисунок 4.5 – Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

Таким образом, можно записать

$$\bar{I}_o = \bar{I}_{oa} + \bar{I}_{op} . \qquad (4.14)$$

Обычно $I_{oa} << I_{op}$ и приближенно считают, что в режиме холостого хода ток I_0, в основном, намагничивающий, т.е. $I_0 \approx I_{0p}$.

В целом вектор тока $\bar{I}_0$ опережает вектор Φ_o на некоторый угол δ, называемый углом потерь

$$\delta = \operatorname{arctg}\frac{r_m}{x_m}. \qquad (4.15)$$

где r_m и x_m – активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания. Следует отметить, что на рисунке 4.5 векторы $I_0 r_1$ и $I_0 x_1$ показаны для наглядности в сильно увеличенном масштабе.

4.2.2. Работа трансформатора под нагрузкой

Нагрузочным или рабочим называется режим работы трансформатора, при котором к первичной обмотке подведено напряжение U_1, а к вторичной подключены потребители Z_H (рисунок 4.6), так что $I_2 > 0$.

Это основной режим, при котором вторичный ток изменяется в пределах $0 < I_2 \le I_{2H}$, а коэффициент мощности $\cos\varphi_2$ определяется характером нагрузки и может изменяться от нуля до 1,0. Особенности взаимодействий в рабочем режиме трансформатора определяются тем, что ток I_2 создает МДС $F_2 = I_2 W_2$ и соответствующий магнитный поток Φ_2, действующие встречно по отношению к МДС F_1 и потоку Φ_0, т.е. в соответствии с принципом Ленца реакция вторичной обмотки направлена на уменьшение основного магнитного потока взаимоиндукции Φ_0, созданного при холостом ходе. Однако, поскольку подводимое к первичной обмотке напряжение не изменяется, а оно, в основном, уравновешивается ЭДС E_{10}, то поток Φ_0 не должен изменяться, что соответствует уравнению равновесия

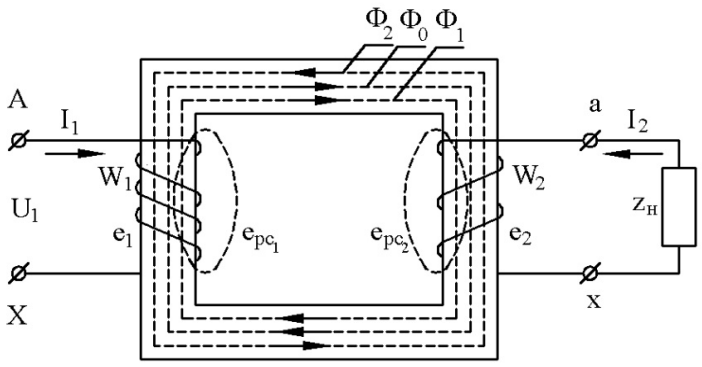


Рисунок 4.6 – Нагрузочный режим однофазного трансформатора

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\Phi_{ом} = \frac{U_1 \approx E_{10}}{4{,}44\ \mathrm{f w_1}} = \text{const.} \qquad (4.16)$$

Для поддержания неизменным магнитного потока при переходе от холостого хода трансформатора к нагрузке МДС I_0W_1 первичной обмотки увеличивается до такой величины I_1W_1, при которой компенсируется размагничивающее действие МДС вторичной обмотки I_2W_2. При этом закон Ома для магнитной цепи трансформатора в рабочем режиме записывается в виде

$$\Phi_0 = \frac{\bar{I}_1 w_1 + \bar{I}_2 w_2}{R_\mu}. \qquad (4.17)$$

Левые части соотношений (4.17) и (4.2) одинаковы, поэтому справедливо равенство

$$\bar{I}_o w_1 = \bar{I}_1 w_1 + \bar{I}_2 w_2, \qquad (4.18)$$

которое называют уравнением равновесия МДС трансформатора.

Из последнего равенства получают уравнения равновесия токов, которые записывают в виде

$$\bar{I}_o = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \frac{w_2}{w_1}, \qquad (4.19,а)$$

или

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_o + (-\bar{I}_2 \frac{w_2}{w_1}). \qquad (4.19,б)$$

При нагрузках, близких к номинальной, током холостого хода иногда пренебрегают и уравнение (4.19, б) упрощается

$$|\bar{I}_1| = \left|\bar{I}_2 \frac{w_2}{w_1}\right|, \qquad (4.20)$$

откуда следует соотношение

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}. \qquad (4.21)$$

Таким образом, соотношение токов при нагрузках, близких к номинальной, определяется соотношением числа витков, причем оно обратно пропорционально коэффициенту трансформации. Поэтому для номинального режима можно записать приближенное равенство

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2, \qquad (4.22)$$

из которого следует, что полная мощность, потребляемая трансформатором из сети, примерно равна полной мощности, отдаваемой потребителю.

Схема замещения первичной обмотки при переходе от режима холостого хода к нагрузке не изменяется, однако первичный ток увеличивается до значения I_1 (рисунок 4.7,а), что должно найти отражение в уравнении равновесия ЭДС первичной обмотки при нагрузке

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 = +\bar{I}_1 r_1 + \bar{I}_1 x_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 z_1. \qquad (4.23)$$

Ток вторичной обмотки подобно току первичной обмотки создает магнитный поток рассеяния $\Phi_{рс2}$, действие которого учитывается или величиной ЭДС самоиндукции $E_{рс2}$, или уравновешивающим ее падением напряжения I_2x_2, на индуктивном сопротивлении рассеяния

$$x_2 = \omega L_2, \qquad (4.24)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

где L_2 - индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

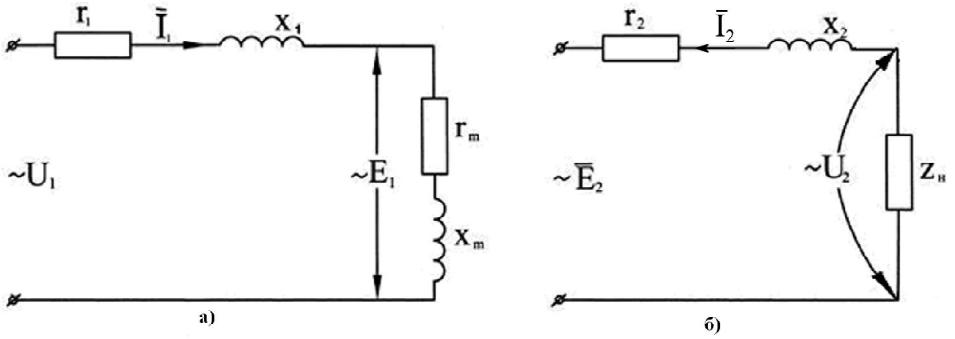


Рисунок 4.7 - Схемы замещения первичной (а) и вторичной (б) обмоток трансформатора при нагрузке

Электрическая схема замещения вторичной обмотки показана на рисунке 4.7, б, на которой r_2 - её активное сопротивление, x_2 – индуктивное сопротивление рассеяния, а $z_н = \sqrt{r_н^2 + x_н^2}$ - полное сопротивление нагрузки. Уравнение электрического равновесия вторичной обмотки при нагрузке имеет вид

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 r_2 - \bar{I}_2 x_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 z_2 . \qquad (4.25)$$

Это уравнение источника электрической энергии, что и представляет собой трансформатор по отношению к нагрузке. Как видно, при работе под нагрузкой напряжение на нагрузке отличается от ЭДС E_2 на величину падения напряжения на внутренних сопротивлениях вторичной обмотки. Следует отметить, что соотношение между ЭДС E_2 и напряжением U_2 зависит также от характера нагрузки, о чем будет сказано ниже.

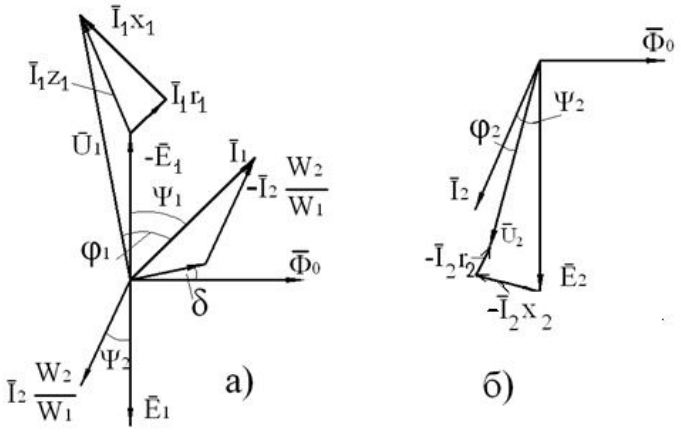


Рисунок 4.8 - Векторные диаграммы первичной (а) и вторичной (б) обмоток трансформатора

Векторные диаграммы первичной и вторичной обмоток являются графическим решением уравнений (4.19), (4.23) и (4.25).

Для вторичной обмотки (рисунок 4.8, б) сдвиг по фазе между током I_2 и напряжением U_2, (угол φ_2) определяется соотношением параметров нагрузки

$$\varphi_2 = arctg\frac{x_н}{r_н}, \qquad (4.26)$$

а угол ψ_2 - соотношением реактивных и активных сопротивлений вторичной обмотки и нагрузки, т.е.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\psi_2 = arctg\frac{x_2 + x_н}{r_2 + r_н}. \qquad (4.27)$$

На рисунке 4.8 векторные диаграммы изображены для случая активно-индуктивной нагрузки.

На векторной диаграмме первичной обмотки (рисунок 4.8, а) вектор тока $\bar{I}_1$ получают, пристраивая к вектору тока холостого хода $\bar{I}_0$ вектор тока $\bar{I}_2$, измененный в отношении $\frac{1}{к}$ и повернутый на 180°, т.е. вектор $\bar{I}_2 \frac{W_2}{W_1}$, что соответствует уравнению (4.19).

Построение вектора первичного напряжения U_1 аналогично построению для режима холостого хода, однако векторы падений напряжения $\bar{I}_1 r_1$ и $\bar{I}_1 x_1$ ориентируются по отношению к вектору тока $\bar{I}_1$.

Сдвиг по фазе между током I_1 и напряжением U_1 обозначают φ_1. Угол φ_1, определяет, как известно, при заданных значениях тока и напряжения, подводимую к трансформатору от сети активную $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1$ и реактивную $Q_1 = U_1 I_1 \sin\varphi_1$ мощности. Чем больше угол φ_1, тем меньше активная и тем больше реактивная мощности.

4.2.3. Режим короткого замыкания

Короткое замыкание (к.з.) трансформатора представляет собой такой режим его работы, когда вторичная обмотка замкнута накоротко ($Z_н = 0$) и, следовательно, вторичное напряжение U_2 равно нулю.

При внезапном коротком замыкании, когда к первичной обмотке подводится номинальное напряжение, токи в обмотках превышают номинальные значения в 10…20 раз. Такое к.з. может иметь место при эксплуатации трансформатора и является аварийным. Возникают недопустимые перегревы обмоток и значительные электродинамические усилия, которые приводят к разрушению трансформатора. Для защиты трансформатора от коротких замыканий применяются быстродействующие автоматические выключатели.

В процессе испытания трансформаторов производят опыт короткого замыкания, но при таком пониженном первичном напряжении, чтобы токи в обмотках были равны номинальным. Это напряжение, выраженное в % от номинального ($u_к$, %), заносится на заводскую табличку трансформатора. Измерения при таком испытательном коротком замыкании, также как и измерения при холостом ходе позволяют определить ряд важных параметров трансформатора.

4.3. Приведенный трансформатор

4.3.1. Приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной

Для упрощения анализа и расчета режимов работы трансформатора пользуются способом, при котором одна из его обмоток приводится к другой. Смысл приведения состоит в том, чтобы сделать ЭДС первичной и вторичной обмоток одинаковыми, электромагнитную связь между обмотками заменить электрической связью и получить

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

единую электрическую схему замещения трансформатора, построить другую, более простую и наглядную векторную диаграмму.

Чаще всего вторичную обмотку приводят к первичной. Для этого условно заменяют реальную вторичную обмотку некоторой фиктивной обмоткой с числом витков $w_2 = w_1 = kw_2$, т.е. увеличивают число ее витков в k раз. Таким образом, коэффициент приведения вторичной обмотки к первичной равен коэффициенту трансформации. Все параметры приведенной обмотки обозначают со штрихами (E_2', U_2', r_2' и т.д.). В приведенной обмотке в соответствии с новым числом витков увеличиваются все ЭДС, напряжения и падения напряжения, т.е.

$$E_2' = kE_2 = E_1; \quad E_{pc2}' = kE_{pc2};$$
$$I_2'x_2' = kI_2x_2; \quad I_2'r_2' = kI_2r_2; \quad U_2' = kU_2. \qquad (4.28)$$

Важным условием приведения является то, чтобы мощности и потери энергии во вторичной обмотке не изменялись. Для этого должны выполняться равенства $E_2'I_2' = E_2I_2$ и $I_2'^2r_2' = I_2^2r_2$, из которых получаются соотношения для тока и активного сопротивления приведенной вторичной обмотки

$$I_2' = \frac{E_2}{E_2'}I_2 = I_2\frac{1}{k}; \qquad (4.29)$$

$$r_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)r_2^2 = k^2r_2. \qquad (4.30)$$

Аналогично соотношению (4.30) изменяются индуктивное сопротивление рассеяния приведенной вторичной обмотки и параметры нагрузки

$$x_2' = k^2x_2; \; r_н' = k^2r_н; \; x_н' = k^2x_н, \qquad (4.31)$$

Для полных сопротивлений справедливы соотношения

$$\left.\begin{aligned} \underline{Z}'_2 &= r_2' + jx_2' = k^2r_2 + jk^2x_2 = k^2\underline{Z}_2 \\ \underline{Z}'_н &= r_н' + jx_н' = k^2r_н + jk^2x_н = k^2\underline{Z}_н \end{aligned}\right\} \qquad (4.32)$$

Если таким образом изменить (условно конечно) все электрические величины вторичной обмотки, то энергетические соотношения в реальном и приведенном трансформаторе сохраняются без изменений и поэтому приведение правомерно. При этом необходимо помнить, что приведение - это чисто аналитический прием, позволяющий упростить расчеты и анализ физических процессов в реальном трансформаторе.

4.3.2. Схема замещения и уравнения электрического равновесия приведенного трансформатора

Поскольку в приведенной вторичной обмотке ЭДС E_2' равна ЭДС E_1, то оказывается возможным схемы замещения первичной обмотки (рисунок 4.7,а) и вторичной обмотки (рисунок 4.7,б) с измененными параметрами объединить в одну схему замещения, соединив электрически точки равного потенциала. Такая полная двухконтурная схема замещения показана на рисунке 4.9. Ее часто называют Т-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

образной схемой замещения приведенного трансформатора.

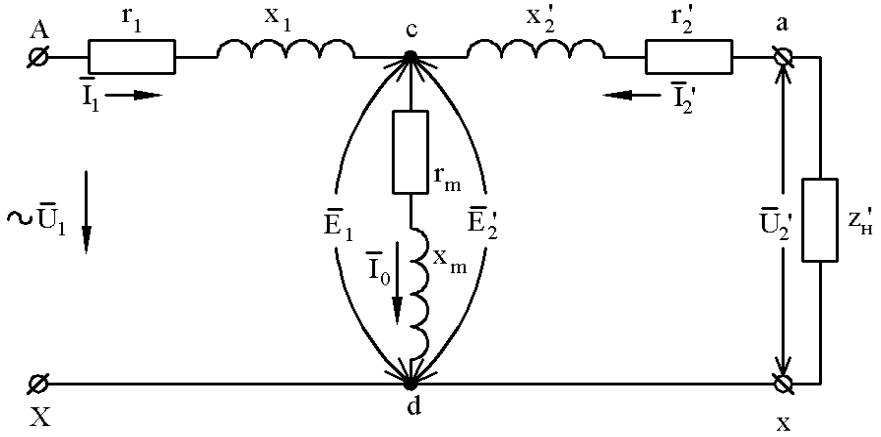


Рисунок 4.9 – Т-образная схема замещения приведенного трансформатора

На этой схеме ветвь c – d с сопротивлениями r_m и x_m и током I_0 называют ветвью намагничивания, ветвь A – c с током I_1 - первичной ветвью, ветвь c – a– x – d с током I_2' - вторичной ветвью или вторичным контуром.

Параметры схемы имеют строго определенные наименования: r_m - активное сопротивление ветви намагничивания, учитывающее потери в стали магнитопровода на перемагничивание и вихревые токи $(\Delta P_{cm} \approx I_0^2 r_m)$; x_m - индуктивное сопротивление взаимоиндукции (ветви намагничивания). Величина $x_m \gg r_m$, поэтому принимают, что $E_1 \approx I_0 x_m$; r_1 и r_2 - активные сопротивления первичной и приведенной вторичной обмоток; x_1 и x_2' - индуктивные сопротивления рассеяния первичной и приведенной вторичной обмоток; $z_н' = \sqrt{r_н'^2 + x_н'^2}$ - приведенное сопротивление нагрузки. Уравнения равновесия токов и ЭДС приведенного трансформатора записываются на основании 1 и 2 законов Кирхгофа

$$\left.\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{I}_0 + \left(-\bar{I}_2'\right) \\ \bar{U}_1 &= -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 r_1 + \bar{I}_1 x_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 z_1 \\ \bar{U}_2' &= \bar{E}_2' - \bar{I}_2' r_2' - \bar{I}_2' x_2' = \bar{E}_2' - \bar{I}_2' z_2' \end{aligned}\right\}. \quad (4.33)$$

Полная векторная диаграмма приведенного трансформатора (рисунок 4.10) является графическим решением приведенных уравнений электрического равновесия 4.33.

Она объединяет векторные диаграммы первичной и вторичной обмоток, показанные на рисунке 4.8, при этом векторы ЭДС $\bar{E}_1'$ и $\bar{E}_2'$ равны между собой, а все построения для вторичной обмотки производятся для приведенных параметров.

Как отмечалось выше, в режимах номинальной нагрузки ток холостого хода I_0 очень мал по сравнению с током $I_{1н}$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Тем более он несоизмеримо мал по сравнению с током короткого замыкания, поэтому в этих режимах им можно пренебречь и в расчетах пользоваться упрощенной схемой замещения (рисунок 4.11).

Сопротивления $r_k = r_1 + r_2'$ и $x_k = x_1 + x_2'$ называют сопротивлениями короткого замыкаия.

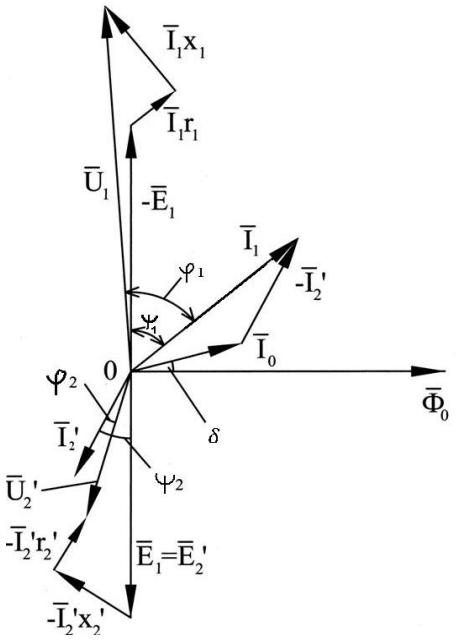


Рисунок 4.10 – Векторная диаграмма приведенного трансформатора

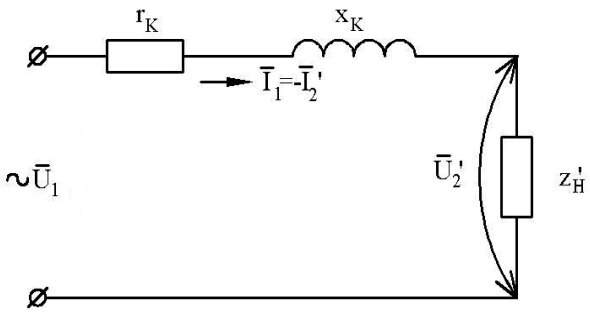


Рисунок 4.11 – Упрощенная схема замещения приведенного трансформатора

Уравнения электрического равновесия для упрощенной схемы имеют вид

$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2'$$
$$\bar{U}_2' = \bar{U}_1 - \bar{I}_1 r_K - \bar{I}_1 x_K = \bar{U}_1 - \bar{I}_1 z_K \qquad (4.34)$$

4.3.3. Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора

Для определения параметров схемы замещения трансформатора проводят его испытания в режиме холостого хода и опытного короткого замыкания.

Схема опыта холостого хода приведена на рисунке 4.12.

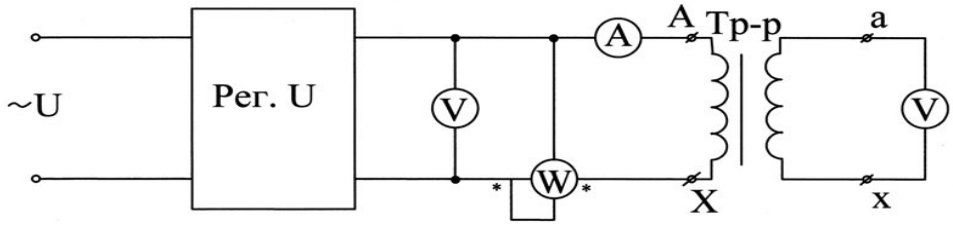


Рисунок 4.12 – Схема опыта холостого хода

Первичную обмотку подключают на номинальное напряжение и измеряют ток холостого хода I_0 , мощность P_0, напряжение на разомкнутой вторичной обмотке U_{20} .

Мощность P_0, потребляемая из сети, расходуется на потери в меди $\Delta P_{m1} = I_0^2 r_1$ и потери в стали $\Delta P_{ст} = I_0^2 r_m$ при этом, поскольку $r_m \gg r_1$, потерями в первичной обмотке ΔP_{m1} пренебрегают и считают, что вся потребляемая из сети мощность расходуется на потери в стали, т.е.

$$P_0 \approx \Delta P_{cm} = I_0^2 r_m , \qquad (4.35)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

откуда $r_m = P_0 / I_0^2$.

Исходя из схемы замещения (рисунок 4.7, а) пренебрегая величиной z_1 по сравнению с z_m, можно определить величину z_m из соотношения

$$z_m = \sqrt{r_m^2 + x_m^2} = U_{10} / I_0, \quad (4.36)$$

откуда $x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}$.

Коэффициент мощности при холостом ходе определяется из соотношения

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_0}. \quad (4.37)$$

Коэффициент трансформации равен

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}}. \quad (4,38)$$

Схема опыта короткого замыкания приведена на рисунке 4.13.

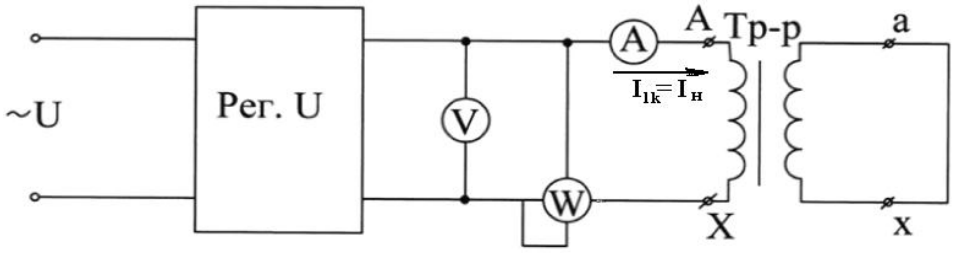


Рисунок 4.13 – Схема опыта короткого замыкания трансформатора

В этом опыте вторичная обмотка замыкается накоротко, а на первичной обмотке с помощью регулятора устанавливают такое напряжение U_{1k}, при котором ток в первичной обмотке равен номинальному $I_{1k} = I_{1н}$. Величина U_{1k} имеет весьма важное эксплуатационное значение и всегда указывается на щитке трансформатора. Обычно она указывается в процентах от номинального напряжения и для однофазных трансформаторов составляет 3…5%.

Поскольку в рассматриваемом режиме $U_2 = 0$, то трансформатор не отдает потребителю полезной мощности и вся мощность P_{1k}, потребляемая из сети, расходуется на потери. Т.к. потери в стали $\Delta P_{ст}$ пропорциональны квадрату магнитной индукции $\Delta P_{ст} \approx B^2 \approx E^2 \approx U_1^2$, то, ввиду малости напряжения U_{1k}, этими потерями пренебрегают и считают, что вся потребляемая мощность расходуется на потери в обмотках, т. е.

$$P_{1k} = \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} = I_{1K}^2 r_K,$$

откуда получаем

$$r_к = \frac{P_{1к}}{I_{1К}^2}. \quad (4.39)$$

Полное сопротивление короткого замыкания равно

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = {}^{U_{1K}}/_{I_{1k}}, \qquad (4.40)$$

поэтому $$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

Принимая далее, что $r_1 \approx r_2' = r_k/2$ и $x_1 \approx x_2' = x_k/2$ получаем все параметры Т-образной схемы замещения трансформатора.

4.3.4. Упрощенная векторная диаграмма приведенного трансформатора

Упрощенная векторная диаграмма, построенная на основании упрощенной схемы замещения (рисунок 4.11) и уравнений (4.34), показана на рисунке 4.14. Обычно параметры r_k, x_k, z_k, ток нагрузки $I_{2н}$ и ее характер известны, первичное напряжение U_1 - задано. Цель построения векторной диаграммы заключается в том, чтобы графически определить величину U_2 и угол φ_1. Порядок построения этой диаграммы следующий.

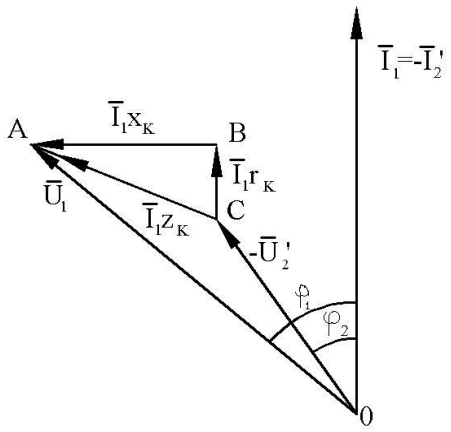


Рисунок 4.14 – Упрощенная векторная диаграмма приведенного трансформатора

1. От исходной точки О в произвольном направлении (обычно вверх) откладывают в определенном масштабе вектор $\bar{I}_1 = -\bar{I}_2'$.

2. Под углом $\varphi_2 = arctg\frac{x_н}{r_н}$ к вектору тока проводится направление вектора $-\bar{U}_2'$. Угол φ_2 положительный (откладывается влево) при активно-индуктивной нагрузке и отрицательный (откладывается вправо) при активно-емкостной нагрузке.

3. В масштабе напряжения строится прямоугольный треугольник АВС с катетами $I_1 r_k$, $I_1 x_k$ и гипотенузой $I_1 z_k$.

Треугольник АВС называют треугольником короткого замыкания и изображают так, чтобы его вершина С лежала на линии U_2', а величина отрезка ОА была равна в принятом масштабе первичному напряжению U_1. Треугольник короткого замыкания должен быть ориентирован на векторной диаграмме таким образом, чтобы сторона АВ = $I_1 x_k$ была перпендикулярна, а ВС - параллельна вектору $\bar{I}_1 = -\bar{I}_2'$.

Отрезок ОС дает величину U_2', а действительное напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки реального трансформатора получается из соотношения $U_2 = \frac{U_2'}{k}$.

4.4. Рабочие характеристики трансформатора

4.4.1. Зависимость вторичного напряжения трансформатора от величины и характера нагрузки

Изменением напряжения двухобмоточного трансформатора при заданной нагрузке называется выраженная в процентах от номинального вторичного напряжения разность

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

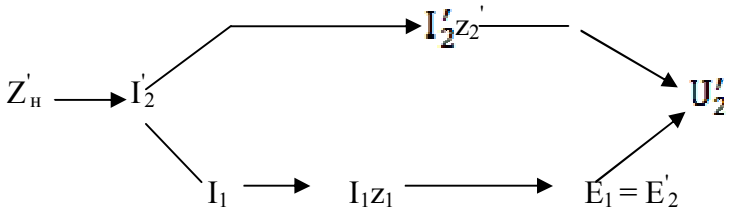
$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_{2н}}{U_{20}} 100\% \quad \text{или} \quad \Delta U = \frac{U_{1н} - U_2'}{U_{1н}} 100\%, \qquad (4.41)$$

где U_{2o} и $U_{2н}$ - вторичные напряжения при холостом ходе и при нагрузке.

Существуют определенные ГОСТом допустимые нормы изменения напряжения трансформатора при номинальной нагрузке. Часто в конструкции трансформатора предусматривается возможность в небольших пределах регулировать вторичное напряжение путем изменения числа витков первичной или вторичной обмоток, имеющих дополнительные выводы.

Физически влияние величины нагрузки на вторичное напряжение объясняется изменением (увеличением) падения напряжения на сопротивлениях обмоток трансформатора при увеличении тока нагрузки I_2 (или I_2').

Логическая цепочка этого процесса такова



При возрастании тока I_2' увеличивается и ток I_1, вызывая увеличение падения напряжения в сопротивлениях первичной обмотки. Поскольку $U_1 - const$, то это приводит к некоторому снижению ЭДС E_1, и соответствующему изменению магнитного потока взаимоиндукции, а это влечет за собой уменьшение E_2'. В свою очередь падение напряжения на сопротивлениях вторичной обмотки создают дополнительные изменения напряжения U_2'.

Влияние характера нагрузки (отношения $x_н / r_н$) на величину вторичного напряжения при неизменном токе нагрузки удобно проследить, пользуясь упрощенной векторной диаграммой (рисунок 4.15), на которой показаны режимы работы трансформатора для случаев $\varphi_2 > 0$, $\varphi_2 = 0$ и $\varphi_2 < 0$, а также геометрическое место концов вектора $\overline{U}_2'$ при изменении угла φ_2 пределах $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_2 \leq +\frac{\pi}{2}$.

Построение упрощенных диаграмм производятся следующим образом: из точки 0 как из центра проводится дуга окружности радиусом, равным в принятом масштабе величине напряжения U_1; под углом φ_2 проводятся направления вектора вторичного напряжения - $\overline{U}_2'$; во всех случаях нагрузки треугольник короткого замыкания располагается таким образом, чтобы вершина А была на дуге U_1, вершина С - на направлении вектора -$\overline{U}_2'$; а катет ВС совпадал с направлением вектора тока $\overline{I}_2'$.

Точки С, C_1 и C_2 определяют величину приведенного вторичного напряжения при соответствующем значении φ_2. Если треугольник АВС поместить в положение 0 В' С', то дуга, проведенная из вершины С’ радиусом, равным U_1, пройдет через точки С, C_1 и C_2 и является, таким образом, геометрическим местом конца вектора напряжения - $\overline{U}_2'$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

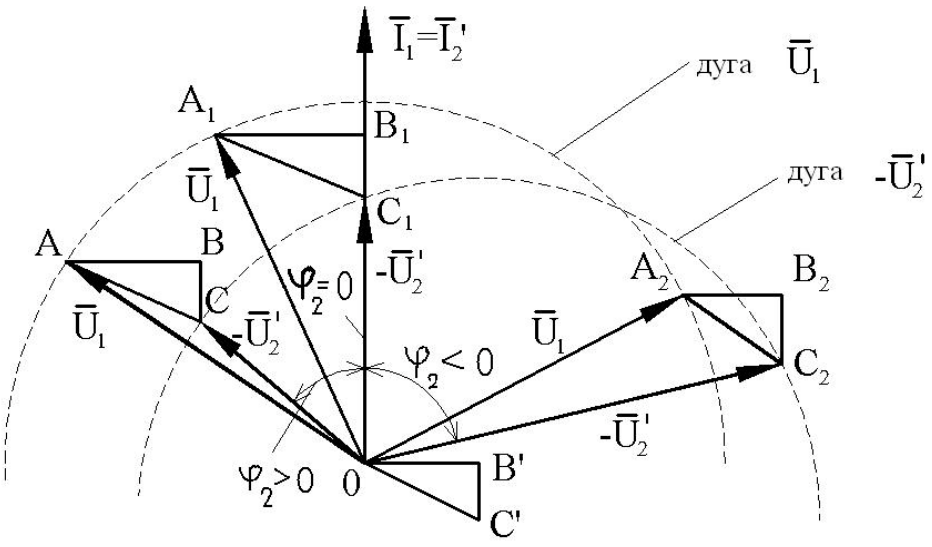


Рисунок 4.15 – Упрощенная векторная диаграмма приведенного трансформатора при различных по характеру нагрузках

Из рисунка 4.15 хорошо видно, что при активно-индуктивной ($\varphi_2 > 0$) и чисто активной нагрузке ($\varphi_2 = 0$) приведенное вторичное напряжение $\bar{U}_2'$ меньше первичного напряжения $\bar{U}_1$. При активно-емкостной нагрузке ($\varphi_2 < 0$) вторичное напряжение может стать даже больше первичного.

Физически это объясняется следующим образом. Реактивная мощность, необходимая для создания магнитного поля взаимоиндукции определяется, главным образом, реактивным сопротивлением рассеяния x_k. При активно-емкостной нагрузке эта реактивная мощность может забираться от нагрузки и при определенной величине емкости в нагрузке избыток реактивной мощности отдается в первичную сеть. При этом растет ЭДС $E_1 = E_2'$, что приводит к перевозбуждению трансформатора, т.е. к возрастанию потока и увеличению напряжения U_2'.

4.4.2. Внешняя характеристика трансформатора

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость $U_2 = f(I_2)$ при U_1 и $\cos\varphi_1 = \text{const}$ (рисунок 4.16).

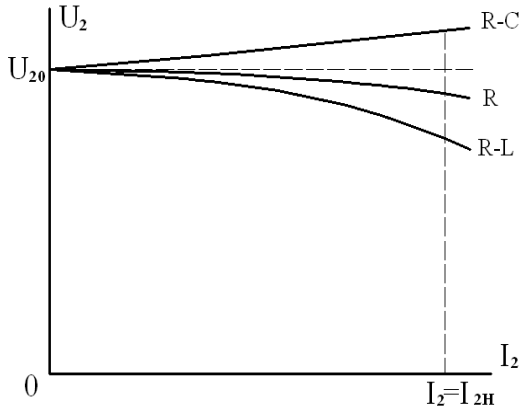


Рисунок 4.16 – Внешняя характеристика трансформатора

Из рисунка 4.16 следует, что внешняя характеристика трансформатора при увеличении тока нагрузки до номинального является достаточно жесткой. Изменение напряжения составляет всего несколько процентов и зависит от харак-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

тера нагрузки, что находится в соответствии с векторной диаграммой (рисунок 4.15).

При активной и активно-индуктивной нагрузке напряжение U_2 уменьшается, при активно-емкостной нагрузкет оно может несколько возрастать.

На практике величина изменения напряжения обычно рассчитывается по приближенной формуле

$$\Delta U \approx \beta\left(U_{ak}\cos\varphi_2 + U_{pk}\sin\varphi_2\right), \qquad (4.42)$$

где $\beta = I_2/I_{2н}$ нагрузка трансформатора в относительных единицах;
$U_{ak} - U_k cos\varphi_2$, $U_{pk} - U_k sin\varphi_2$ - активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %.

4.4.3. Потери в трансформаторе и его КПД

Трансформатор потребляет из сети мощность

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1, \qquad (4.43)$$

где m_1 – число фаз.

Часть этой мощности, как отмечалось, теряется в виде потерь в обмотках $\Delta P_{м1}$ и $\Delta P_{м2}$, другая часть - в виде потерь в сердечнике на гистерезисе и вихревые токи.

Электромагнитная мощность

$$\Delta P_{эм} = P_1 - \Delta P_{м1} - \Delta P_{ст} = m E_2' I_2' \cos\Psi_2 \qquad (4.44)$$

передается во вторичную обмотку посредством магнитного поля.

Полезная мощность равна

$$P_2 = \Delta P_{эм} - \Delta P_{м1} = m U_2 I_2 \cos\varphi_2 \qquad (4.45)$$

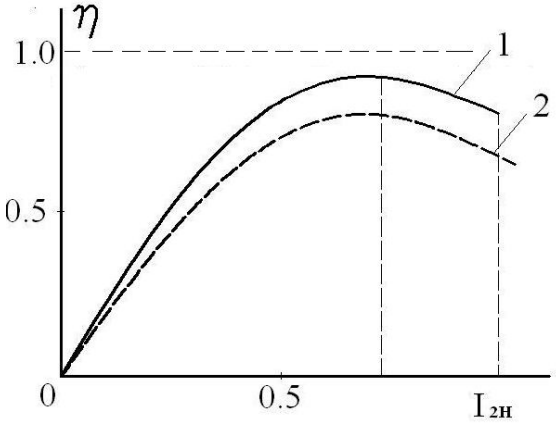


Рисунок 4.17 – Коэффициент полезного действия трансформатора

Потери в стали $\Delta P_{ст}$ мало изменяются при изменении нагрузки и относятся к категории постоянных потерь. Потери в обмотках $\Delta P_м = \Delta P_{м1} + \Delta P_{м2}$ являются переменными, т.к. изменяются при изменении тока. Коэффициент полезного действия трансформатора показывает соотношение между мощностью, которая передается потребителям, и мощностью потребляемой из сети. КПД определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}100\% = \frac{P_2}{P_2 + \sum\Delta P}100\%. \qquad (4.46)$$

КПД силовых трансформаторов обычно достигает 94…98%.

Рассчитывают трансформаторы таким образом, чтобы КПД имел наибольшее значение при нагрузке β = 0,5…0,7 от номинальной. Обычно

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

трансформаторы работают с некоторой недогрузкой - в области максимального значения КПД (рисунок 4.17, кривая 1).

При передаче значительной реактивной мощности (при уменьшении $\cos\varphi_2$) КПД уменьшается, что показано на рисунке 4.17, кривая 2.

4.5. Понятие о трехфазных и специальных трансформаторах

4.5.1. Трехфазные трансформаторы

Для преобразования переменного тока в трехфазных цепях применяются трехфазные трансформаторы, имеющие, как правило, трехстержневой магнитопровод (рисунок 4.18, б).

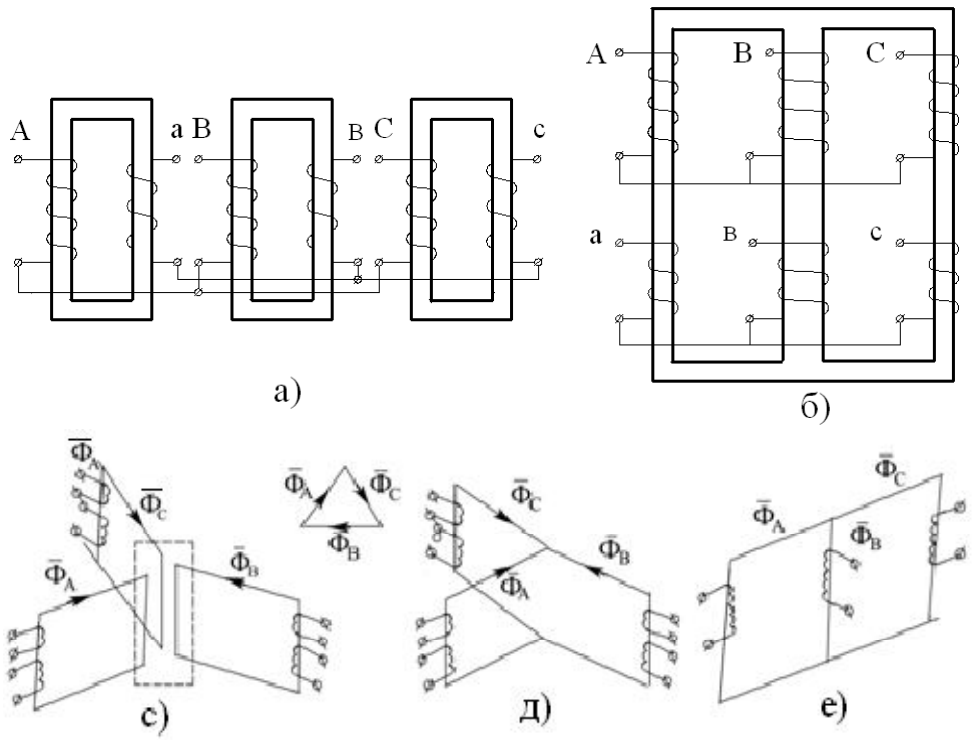


Рисунок 4.18 – Групповой (а) и стержневой (б) трехфазные трансформаторы

Обмотки фаз трансформатора соединяются звездой (Y) или треугольником (Δ). Первичные и вторичные обмотки каждой фазы размещаются на одном и том же сердечнике и сцеплены с одним магнитным потоком.

Присущая таким трансформаторам небольшая магнитная несимметрия из-за того, что фаза, расположенная на среднем стержне, находится в несколько иных условиях, чем фазы на крайних стержнях, при эксплуатации не имеет большого значения. Намагничивающие токи обмоток фаз, размещенных на крайних сердечниках, больше, чем в средней, на 10…15%.

Трехфазный трансформатор был получен путем объединения трех однофазных (рисунок 4.18, а), поэтому рабочие процессы в нем протекают также, как в трех однофазных, и для каждой фазы трехфазного трансформатора справедливы уравнения электрического равновесия, векторная диаграмма и схема замещения однофазного трансфор-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

матора.

Возможность трансформирования трехфазных токов с помощью магнитных систем с тремя стержнями и двумя ярмами можно обосновать. Так, если расположить три однофазных трансформатора так, как показано на рисунке 4.18,с, то три стержня, обведенные пунктиром, можно конструктивно объединить в один. Действительно, в трехфазной системе сумма магнитных потоков $\bar{\Phi}_A$, $\bar{\Phi}_B$ и $\bar{\Phi}_C$, сдвинутых по фазе на 120˚, равна нулю

$$\bar{\Phi}_A + \bar{\Phi}_B + \bar{\Phi}_C = 0.$$

Поэтому в объединенном стержне магнитный поток всегда будет равен нулю и надобность в этом стержне отпадает вообще (рисунок 4.18,д).

Если теперь сократить длину ярма фазы В, то получим трехфазную систему со стержнями, расположенными в одной плоскости (рисунок 4.18,е). Именно этот тип манитной системы был предложен в 1891 г. М.П Доливо-Добровольским и получил наибольшее распространение.

При использовании трансформаторов предельной мощности используется трехфазная группа однофазных трансформаторов (рисунок 4.18,а), т.к. на большую мощность изготовление однофазных трансформаторов технологически проще, хотя при этом расход активных материалов (меди, стали) увеличивается.

4.5.2. Автотрансформатор

У автотрансформатора (АТ) (рисунок 4.19) обмотка низкого напряжения является частью обмотки высокого напряжения, т.е. обмотки имеют не только магнитную, но и электрическую связь.

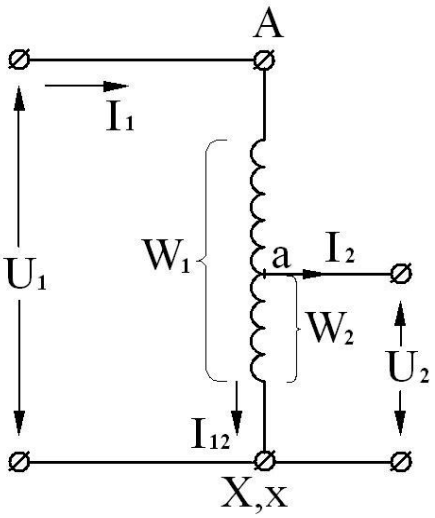


Рисунок 4.19 – Схема понижающего автотрансформатора

Так же как и обычные трансформаторы, автотрансформаторы могут быть повышающие и понижающие, однофазные и трехфазные.

Применяются автотрансформаторы чаще всего при необходимости изменить напряжение в небольших пределах при коэффициенте трансформации К = 1,0…1,5 - при пуске синхронных и асинхронных двигателей, для регулирования напряжения нагревательных печей, в электротермии и в лабораторных установках. Мощные автотрансформаторы изготовляются для подстанций, связывающих электроэнергетические системы с различным номинальным напряжением. Практически везде, где необходимо преобразовывать близкие напряжения (110 и 220, 220 и 330, 330 и 500, 500 и 750 кВ) используются только автотрансформаторы. Их применение взамен обычных трансформаторов дает выигрыш в КПД, массе и габаритах, расходе активных материалов.

Автотрансформаторы применяются также в низковольтных се-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

тях в качестве лабораторных регуляторов напряжения (ЛАТР). В таких автотрансформаторах регулирование напряжения осуществляется при перемещении скользящего контакта по виткам обмотки. При замыкании соседних витков в ЛАТР не происходит витковых замыканий, так как токи сети и нагрузки в совмещенной обмотке автотрансформатора близки друг другу и направлены встречно.

В конструктивном отношении автотрансформаторы не отличаются от обычных трансформаторов. На стержнях магнитопровода располагаются две обмотки, а выводы берутся от двух обмоток и общей точки.

На один виток обмотки АТ приходится ЭДС

$$E_в = 4{,}44 f \Phi_{ом}$$

так что при холостом ходе выходное напряжение равно

$$U_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_{ом} = U_1 \frac{w_2}{w_1} = \frac{U_1}{k}.$$

Различают расчетную мощность АТ, передаваемую электромагнитным путем

$$S_{расч} = U_2 I_{12} \qquad (4.47)$$

и проходную мощность, передаваемую из первичной обмотки во вторичную

$$S_{пр} \approx U_1 I_1 \approx U_2 I_2.$$

Векторы токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ имеют сдвиг 180°, а ток в общем участке обмотки I_{12} определяется векторной суммой

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2, \text{ или по модулю } I_{12} = I_1 + I_2.$$

Таким образом, проходная мощность может быть записана в виде

$$S_{пр} = U_2 I_2 = U_2 (I_{12} + I_1) = U_2 I_{12} + U_2 I_1, \qquad (4{,}48)$$

причем составляющая $S_{эл} = U_2 I_1$ передается электрическим путем.

Учитывая, что $I_1 = I_2' = {I_2}/{k}$, получаем $I_{12} = I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right)$

откуда $S_{расч} = U_2 I_{12} = U_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right)$..

Отношение расчетной и проходной мощностей определяет коэффициент выгодности АТ

$$k_{выг} = \frac{S_{расч}}{S_{пр}} = 1 - \frac{1}{k},$$

по которому легко определить мощность, передаваемую электрическим путем

$$S_{эл} = U_2 I_1 = U_2 I_2' = \frac{U_2 I_2}{к} = \frac{S_{пр}}{к}.$$

Таким образом, расчетная мощность автотрансформатора меньше мощности такого же двухобмоточного трансформатора; чем ближе коэффициент k к единице, тем меньше расчетная мощность, тем выгоднее применение АТ. Например, при k = 1,1 $S_{расч}$ примерно в 10 раз меньше $S_{эл}$, а при k = 8 соотношение примерно такое же, как в обычном трансформаторе.

Из соотношения для токов

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$I_{12} = I_2\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right)$$

следует, что для меньших значений k сечение части обмотки с числом витков w_2 может быть уменьшено в $\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right)$ раз, что предполагает существенное снижение расхода меди и уменьшение габаритов трансформатора, а также уменьшение потерь и повышение КПД.

4.5.3. Сварочные трансформаторы

Сварочные трансформаторы (рисунок 4.20,а) предназначены для обеспечения сварочных работ. Поскольку сопротивление сварочной дуги весьма мало, то при работе трансформатор находится в режиме, близком к короткому замыканию и поэтому должен иметь мягкую внешнюю характеристику с ограниченным током короткого замыкания (рисунок 4.20,б). Получение такой внешней характеристики достигается за счет больших индуктивных сопротивлений или в самом трансформаторе, или во внешних устройствах. Для этого последовательно со вторичной обмоткой включают дроссель с регулируемым воздушным зазором

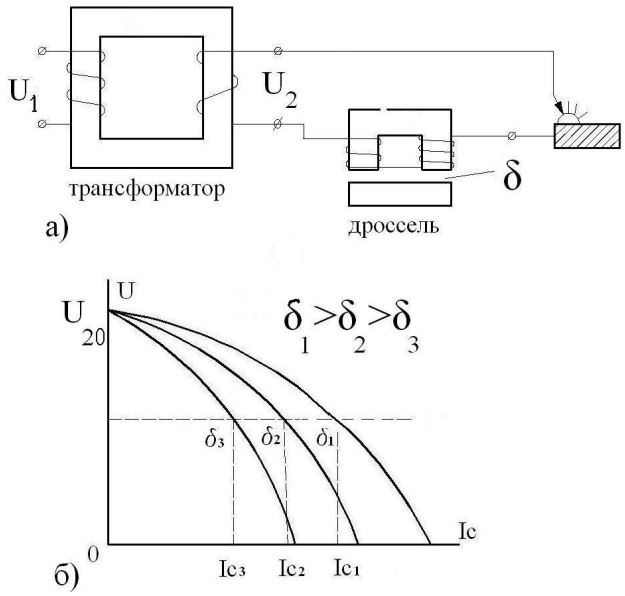


Рисунок 4.20 – Сварочный трансформатор (а) и его внешние характеристики (б)

Регулирование величины сварочного тока достигается изменением индуктивного сопротивления дросселя за счет изменения воздушного зазора. Чем меньше воздушный зазор δ (рисунок 4.20 а и б) в сердечнике дросселя, тем больше его индуктивное сопротивление и тем меньше сварочный ток – ток нагрузки трансформатора.

4.5.4. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы применяются для расширения пределов измерения токов и напряжений в схемах переменного тока. Кроме того, они позволяют изолировать измерительные приборы от сети, в которой производится измерение. Различают измерительные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН).

Трансформатор тока понижает величину измеряемого тока. Его первичная обмотка состоит из одного или нескольких витков провода большого сечения и включается последовательно в цепь, ток который необходимо измерить. Вторичная обмотка наматывается из большого

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

числа витков сравнительно малого сечения и замыкается на приборы с малым сопротивлением - амперметры, последовательные обмотки ваттметров, фазометров и т.п.

Таким образом, рабочий режим трансформатора тока – это режим короткого замыкания. При отключенном измерительном приборе трансформатор тока переходит в режим холостого хода и во вторичной обмотке возникают высокие напряжения, представляющие опасность и для самой обмотки и для обслуживающего персонала. Поэтому трансформатор тока запрещается включать в цепь при разомкнутой вторичной обмотке.

Трансформаторы напряжения используются для включения вольтметров, частотомеров и параллельных цепей ваттметров, счетчиков и других приборов, имеющих большое сопротивление. Рабочий режим трансформатора напряжения – режим холостого хода, поэтому его обмотки имеют значительно меньшее сечение по сравнению с силовыми трансформаторами и малую номинальную мощность.

Схемы включения в однофазную сеть переменного тока амперметра, ваттметра и вольтметра при помощи измерительных трансформаторов показаны на рисунке 4.21.

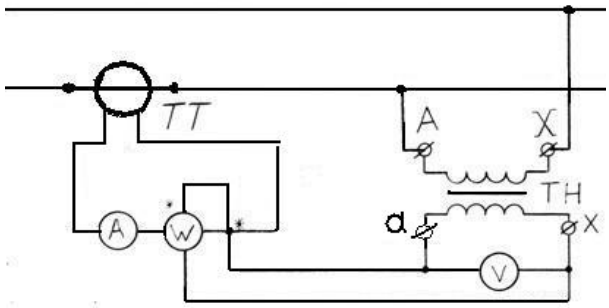


Рисунок 4.21 – Схема измерений с использованием измерительных трансформаторов

Показания обычных измерительных приборов, включенных в сеть через внешние измерительные трансформаторы тока и напряжения, следует определять с учетом коэффициентов трансформации. В некоторых случаях на шкале прибора указывается, что он должен включаться в цепь только при помощи трансформаторов тока или напряжения, имеющих определенный коэффициент трансформации.

Номинальное значение тока (или напряжения) первичной обмотки указывают на табличке трансформатора.

4.6. Обозначения выводов и группы соединения трансформаторов

Согласно ГОСТ 11677-85 начала обмоток двухобмоточного однофазного трансформатора обозначают буквами А и а, концы – Х и х. В трехфазных двухобмоточных трансформаторах начала и концы обмоток обозначают соответственно буквами: начала - А, В, С; а, в, с; концы - Х, Y, Z; x, y, z. Прописные буквы относятся к обмоткам высшего напряжения, а строчные – к обмоткам низшего напряжения. Понятия начала и конца обмоток условны. В трехфазных трансформаторах возможны следующие схемы соединений: Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z, Y/Δ, Δ/Y, Y/Z (Y-соединение звездой, Δ – треугольник, Z – зигзаг, (в числителе указаны соединения обмотки высшего напряжения, в знаменателе – низшего). Эти схемы образуют 12 различных групп соединений.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Говоря о работе трансформатора, следует иметь в виду возможность их параллельной работы. Поэтому одного указания на схему соединения трансформаторов недостаточно. Необходимо еще знать угол сдвига фаз между векторами первичных и вторичных линейных напряжений трансформаторов. Величина этого угла определяет группу соединения трансформатора и зависит от направления, в котором намотана обмотка, от способа соединения обмоток трехфазного трансформатора. Для наглядности и лучшего понимания принятого обозначения пользуются циферблатом часов. Вектор напряжения обмотки высшего напряжения совмещают с минутной стрелкой и всегда устанавливают на цифре 12.

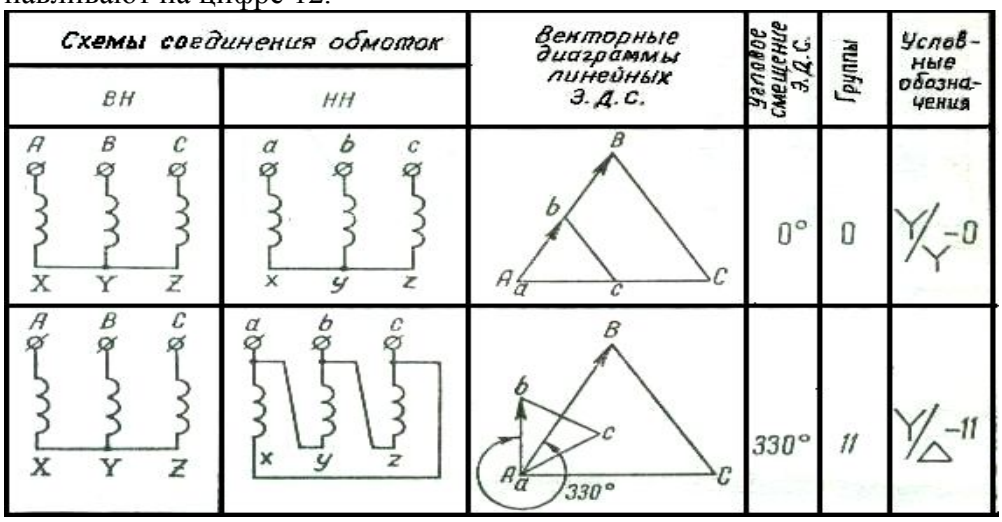


Рисунок 4.22 - Группы соединения трансформаторов

Вектор напряжения обмотки низшего напряжения соответствует часовой стрелке и его положение зависит от сдвига фаз напряжений обеих обмоток. Вектора могут быть сдвинуты на углы, кратные 30 градусам.

В судовых силовых трансформаторах применяются следующие группы соединений: Y/Y -0, Y/Δ - 11, Δ/Δ - 0. Для примера на рисунке 4.22 представлены группы соединений Y/Y -0, Y/Δ - 11.

На судах используются однофазные трансформаторы типов ОСКО, ОСВ, ОСЗ, ОВ, ОО, ОЗ и трехфазные – ТСВ, ТСЗ, ТВ, ТЗ. Название типа трансфор матора состоит из букв и цифр, которые обозначают: первая буква – число фаз (О – однофазный, Т – трехфазный); буквы С и К – сухой и комплектуемый; последняя буква перед цифрами указывает на исполнение корпуса (О – открытый, З – брызгозащитный, В – водозащищенный); цифры, стоящие после буквенного обозначения, указывают мощность кВА; буква Т в конце – тропическое исполнение. Выводы первичной обмотки трансформатора тока маркируются буквой Л, с добавлением к ней цифр 1 для начала и 2 для конца. Выводы вторичной обмотки трансформатора тока маркируются как И1 и И2.

4.7. Параллельная работа трансформаторов

Параллельная работа трансформаторов возможна лишь в том случае, если в обмотках трансформаторов не возникают уравнительные токи, а нагрузка распределяется пропорционально номинальным

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

мощностям трансформаторов. Практически это сводится к выполнению следующих условий:

1. Напряжения обмоток высшего и низшего напряжения, указанные на заводских табличках, должны быть соответственно равны, т.е. должны быть равны коэффициенты трансформации $k_1 = k_2 \ldots k_n$.

2. Напряжения короткого замыкания $u_к$, указываемые на заводских табличках трансформаторов, должны быть также равны; при параллельной работе трансформаторов допускают отклонения u_k в пределах ±10 %.

3. Мощности параллельно работающих трансформаторов не должны значительно отличаться одна от другой. Допускается различие мощностей не больше, чем в 3 раза.

4. Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов, предназначенных для параллельной работы, должны быть одинаковыми. Это требование может быть выполнено, если условные обозначения схем и групп соединений, указанные на заводских табличках, будут одинаковыми.

5 Обмотки фаз трансформаторов, включенных для параллельной работы, должны совпадать, т. е. одинаково обозначенные выводы обмоток фаз должны быть присоединены к одной, а не к разным шинам.

Рассмотрим последствия нарушения названных условий.

Допустим, что не выполнено первое условие ($k_1 < k_2$). Это значит, что при одном и том же напряжении на первичных обмотках трансформаторов U_1, вторичные ЭДС трансформаторов будут неодинаковы $E_1 > E_2$. Под действием возникшей разности потенциалов в замкнутом контуре вторичных обмоток пойдет уравнительный ток, который создаст падение напряжения в обмотках. В трансформаторе 1 это вызовет уменьшение напряжения на зажимах вторичной обмотки, в трансформаторе 2 – увеличение вторичного напряжения. В результате напряжение на внешних шинах будет иметь среднее значение. При нагрузке уравнительный ток накладывается на ток нагрузки, вследствии чего трансформатор 1 будет перегружен, а трансформатор 2 – недогружен. ГОСТ допускает расхождение в коэффициентах трансформации не больше ±0,5% от их среднего значения.

Если трансформаторы имеют неодинаковые номинальные напряжения короткого замыкания $u_{1K} \neq u_{2K}$, значит неодинаковы сопротивления короткого замыкания $Z_{1K} \neq Z_{2K}$. При работе трансформаторов в параллель напряжения вторичных обмоток одинаковы т. е. $I_{12}Z_{1K} = I_{22}Z_{2K}$, а это возможно лишь при неодинаковых токах трансформаторов. Это значит, что при параллельной работе трансформаторов нагрузка между ними будет распределяться непропорционально их номинальным мощностям. Чтобы не вызвать аварии трансформатора, имеющего меньшее значение u_K, необходимо снижать общую нагрузку. Это ведет к неполному использованию трансформаторов. Согласно ГОСТ необходимо, чтобы разница напряжений короткого замыкания не превышала ±10% от их среднего значения, а соотношение номинальных мощностей параллельно работающих трансформаторов было не больше, чем 3:1.

Несоблюдение четвертого условия вызывает настолько большой уравнительный ток, что трансформаторы могут выйти из строя из-за перегрева обмоток. Даже при минимальном расхождении групп соеди-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

нения трансформаторов (например, у одного группа Y/Y – 0, а у другого Y/Δ – 11) уравнительный ток будет примерно в 5 раз больше номинального, что равносильно короткому замыканию.

Во избежание ошибок присоединение трансформаторов к сети без нулевого провода (пятое условие) производят следующим образом. Включают оба трансформатора со стороны высшего напряжения, затем один из них присоединяют к шинам низкого напряжения выводами обмоток всех фаз, а другой — выводами обмотки одной фазы, например С. Затем между выводами обмоток фаз В и А второго трансформатора и шинами низкого напряжения, к которым соответственно присоединены выводы обмоток фаз В и А первого трансформатора, включают вольтметр или лампу. Если обозначения выводов обмоток фаз на трансформаторах нанесены правильно, то между всеми парами одноименных выводов напряжение равно нулю (лампа не горит или вольтметр показывает нуль) и выводы В и А второго трансформатора могут быть соединены с шинами, к которым соответственно присоединены выводы В и А первого трансформатора.

Контрольные лампы или вольтметры при указанной проверке должны быть взяты на двойное рабочее напряжение трансформатора со стороны низкого напряжения.

4.8. Вопросы для самопроверки и контроля знаний

1. Назовите основные части трансформатора и расскажите об их назначении и устройстве.
2. Представьте схему простейшего однофазного двухобмоточного трансформатора и поясните принцип его работы.
3. Покажите картину распределения магнитных полей в реальном однофазном трансформаторе при холостом ходе.
4. Запишите уравнения электрического равновесия однофазного трансформатора для режима холостого хода.
5. Изобразите электрическую схему замещения и векторную диаграмму для режима холостого хода трансформатора.
6. Покажите картину распределения магнитных полей при работе трансформатора под нагрузкой.
7. Запишите уравнения электрического равновесия для первичной и вторичной обмоток трансформатора при нагрузке.
8. Изобразите схемы замещения первичной и вторичной обмоток трансформатора при нагрузке.
9. Нарисуйте векторные диаграммы первичной и вторичной обмоток трансформатора при нагрузке.
10. Поясните с какой целью производится приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной.
11. Приведите Т – образную схему замещения приведенного трансформатора.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 5. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.I. Основные элементы конструкции электрических машин переменного тока

5.1.1. Общие законы электромеханики

Машины переменного тока делятся на две основные группы – синхронные (СМ) и асинхронные (АМ) машины. Кроме того, находят применение многие типы специальных электрических машин - коллекторные, гистерезисные, индукторные, шаговые, линейные и т.п.

Синхронной называют машину переменного тока, у которой скорость вращения ротора с обмоткой (индуктора) находится в строго постоянном отношении к частоте сети и не зависит от нагрузки, а именно

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p},$$

где f_1 - частота сети; p - число пар полюсов ротора.

Асинхронной называют машину, у которой скорость вращения ротора при заданной частоте сети f_1 зависит от нагрузки, т.е.

$$n_2 \neq \frac{60 f_1}{p}.$$

Процессы преобразования энергии во всех машинах электромеханического типа, в том числе и в машинах переменного тока, подчиняются трем основным законам, получившим название законов электромеханики.

Первый закон касается энергетических соотношений и устанавливает, что преобразование энергии в электрических машинах не может происходить с КПД, равным или большим 100%, т.е. процесс преобразования во всех случаях сопровождается потерями энергии, которые имеют место в электрических контурах или в конструктивных элементах машин.

Второй закон электромеханики касается закономерностей взаимодействия магнитных полей, создаваемых обмотками вращающихся и неподвижных частей машины. Этот закон формулируется следующим образом. Магнитные поля, создаваемые вращающимися обмотками, и обмотками, расположенными на неподвижных элементах электромеханических преобразователей, перемещаются в одном направлении и с одинаковыми скоростями, или неподвижны друг относительно друга. Так, в машинах постоянного тока основное магнитное поле, создаваемое неподвижными обмотками возбуждения, неподвижно и поле, создаваемое вращающим якорем, так же неподвижно. В асинхронных и синхронных машинах магнитные поля статора и ротора вращаются с одинаковыми скоростями в одном направлении и таким образом также неподвижны друг относительно друга.

Третий закон определяет принцип обратимости электромеханических преобразователей. Подобно машинам постоянного тока синхронные и асинхронные машины обратимы, т.е. могут работать как в генераторном, так и в двигательном режимах.

В судовых электроэнергетических системах СМ применяются, главным образом, в качестве генераторов - основных и вспомогатель-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ных источников электроэнергии, АМ - преимущественно в качестве двигателей. В промышленности широкое применение находят и синхронные двигатели (СД). Асинхронные генераторы используются, как правило, в специальных установках. В последние годы они нашли применение в мощных ветроустановках.

5.1.2. Конструктивная схема синхронной машины

В большинстве случаев СМ выполняют с неподвижным статором (якорем), а питание на обмотку возбуждения подводят через щетки с помощью двух колец.

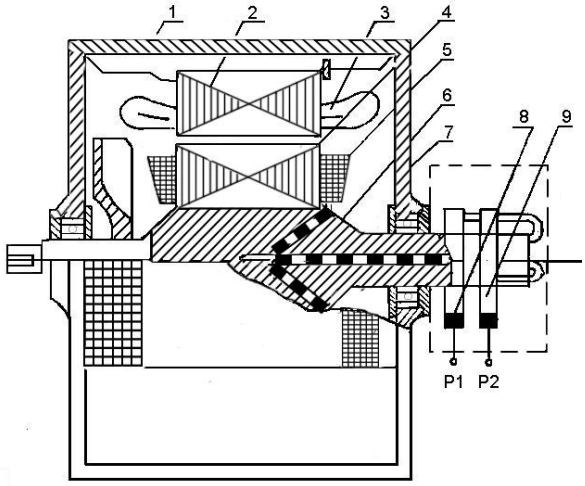


Рисунок 5.1 – Конструктивная схема синхронной машины

На статоре СМ (рисунок 5.1), включающем корпус 1 и сердечник статора 2, расположена трехфазная обмотка 3, подключаемая к сети. Обмотка возбуждения 5 располагается на полюсе 4 ротора 6 и получает питание от источника постоянного тока посредством контактных колец 9 и щеток 8. Вращение ротора 6 обеспечивается в подшипниковых щитах 7, в которые встроены подшипники. Ротор может иметь явно выраженные (рисунок 5.2, а) или неявно выраженные полюса (рисунок 5.2, б). Явнополюсный ротор обычно применяют в тихоходных СМ с большим числом полюсов (четыре и более), неявнополюсный - в быстроходных машинах (на 3000 или реже на 1500об/мин), имеющих на роторе два или четыре полюса.

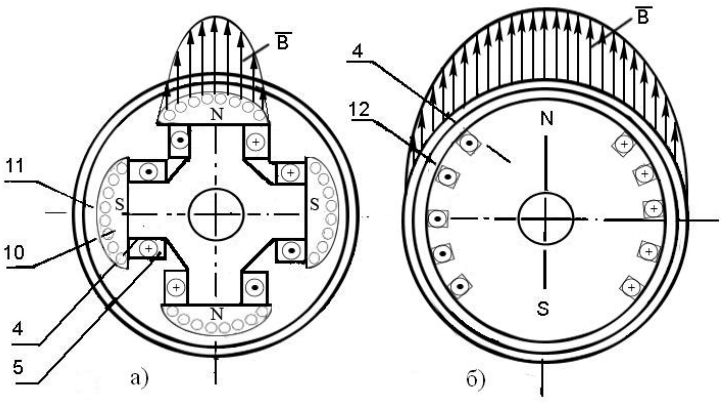


Рисунок 5.2 – Конструктивная схема ротора синхронной машины:
а – явнополюсного; б - неявнополюсного

В первом случае обмотку возбуждения 5 выполняют в виде катушек прямоугольного сечения, которые размещают на сердечниках полюсов и укрепляют с помощью полюсных наконечников 10. В неявнополюсном роторе обмотку возбуждения размещают в пазах 12 сердечника, выполненного в виде массивной стальной поковки, и укрепляют в них при помощи немагнитных клиньев. Лобовые части обмоток, на которые воздействуют большие динамические усилия, крепят с помощью цилиндрических стальных бандажей. В полюс-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ных наконечниках явнополюсных роторов СМ размещают демпферную (успокоительную) обмотку, необходимую для улучшения переходных процессов.

Назначение обмотки возбуждения в СМ заключается в создании магнитного поля, синусоидально распределенного на ширине полюса. Для этого полюсным наконечникам в явнополюсных роторах придают такую конфигурацию, чтобы под серединой полюса воздушный зазор между полюсным наконечником и статором был минимальным, а по краям - увеличенным (рисунок 5.2, а). Эта же цель в неявнополюсном роторе достигается за счет того, что пазы для укладки обмотки возбуждения занимают примерно 2/3 каждого полюсного деления (рисунок 5.2, б).

В настоящее время все более широкое применение находят бесщеточные синхронные машины, не имеющие контактных колец на роторе и щеточных устройств. В таких машинах обмотка возбуждения получает питание от выпрямителя, вращающегося вместе с ротором. Выпрямитель, в свою очередь, получает питание от возбудителя, который имеет на вращающемся роторе трехфазную обмотку, возбуждаемую неподвижными постоянными магнитами, расположенными на статоре.

5.1.3. Устройство асинхронного двигателя

Устройство асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором показано на примере двигателя серии АМ (рисунок 5.3).

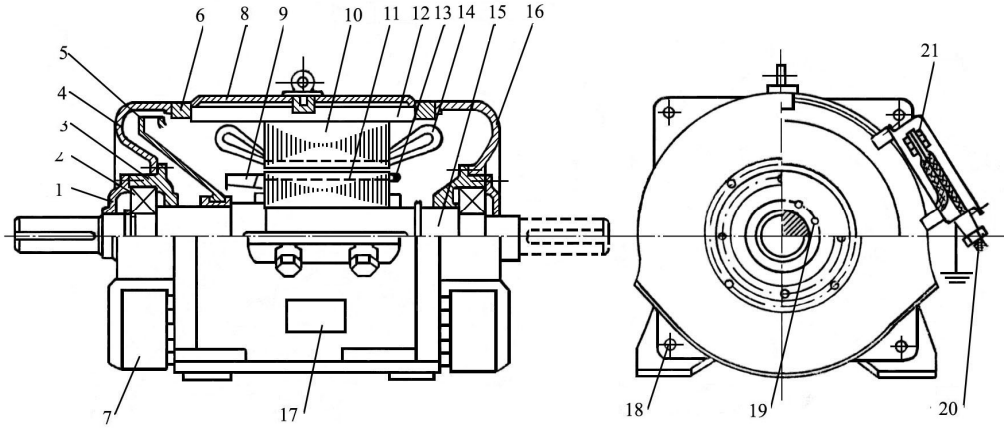


Рисунок 5.3 - Устройство АД с короткозамкнутым ротором

Основными частями АД являются неподвижный статор 10 и вращающийся внутри него ротор, отделенный от статора воздушным зазором.

Для уменьшения вихревых токов сердечники ротора и статора набираются из отдельных листов, отштампованных из электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Листы оксидируются (подвергаются термической обработке), что увеличивает их поверхностное сопротивление.

Сердечник статора встраивается в станину 12, являющуюся внешней частью машины. На внутренней поверхности сердечника имеются пазы, в которых уложена обмотка 14. Статорную обмотку чаще всего делают трехфазной двухслойной из отдельных катушек с

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

укороченным шагом из изолированного медного провода. Начала и концы фаз обмотки выводят на зажимы коробки выводов.

Обмотку статора можно соединить звездой (Y) или треугольником (Δ), что дает возможность применять один и тот же двигатель при двух различных линейных напряжениях, находящихся в отношении $\sqrt{3}$, например, 127/220 В или 220/380 В. При этом соединению Y соответствует включение АД на высшее напряжение.

Сердечник ротора в собранном виде напрессовывается на вал 15 горячей посадкой и предохраняется от проворачивания при помощи шпонки. На внешней поверхности сердечник ротора имеет пазы для укладки обмотки 13. Обмотка ротора в наиболее распространенных АД представляет собой ряд медных или алюминиевых стержней, расположенных в пазах и замкнутых по торцам кольцами. В двигателях мощностью до 100 кВт и более обмотка ротора выполняется заливкой пазов расплавленным алюминием под давлением. Одновременно с обмоткой отливаются и замыкающие кольца вместе с вентиляционными крылатками 9. По форме такая обмотка напоминает «беличью клетку».

Для специальных двигателей обмотка ротора может выполняться подобно статорной. Ротор с такой обмоткой помимо указанных частей имеет три укрепленных на валу контактных кольца, предназначенных для соединения обмотки с внешней цепью. АД в этом случае называется двигателем с фазным ротором или с контактными кольцами.

Вал ротора 15 объединяет все элементы ротора и служит для соединения АД с исполнительным механизмом.

Воздушный зазор между ротором и статором составляет от 0,4…0,6 мм для машин малой мощности и до 1,5 мм у машин большой мощности. Подшипниковые щиты 4 и 16 двигателя служат опорой для подшипников ротора. Охлаждение двигателя осуществляется по принципу самообдува вентилятором 5. Подшипники 2 закрыты крышками 1 и 3, имеющими лабиринтовые уплотнения. На корпусе статора устанавливается коробка 21 с выводами 20 обмотки статора. На корпусе укрепляется табличка 17, на которой указываются основные данные АД. На рисунке обозначено также: 6 – посадочное гнездо щита; 7 – кожух; 8 – корпус; 18 – лапа; 19 – вентиляционный канал.

5.2. Трехфазные обмотки электрических машин переменного тока

5.2.1. Принцип построения обмотки

По принципу образования трехфазные обмотки статоров синхронных и асинхронных машин практически одинаковы. В сущности они не отличаются и от обмоток якоря машин постоянного тока (МПТ), только наличие механического выпрямителя (коллектора) вносит особенности в изготовление обмоток якоря МПТ.

Для примера на рисунке 5.4, а условно показана кольцевая обмотка якоря для числа полюсов $2p = 2$, которая представляет собой намотанную на тороид (1) замкнутую обмотку (2). Если поставить между полюсами щетки (3) так, чтобы они скользили по неизолированным верхним частям обмотки, то со щеток можно снять ток.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Чтобы в такой же схеме получить трехфазное переменное напряжение, необходимо от обмотки вывести на кольца напряжения от трех точек, отстоящих друг от друга на электрический угол, равный 120° (рисунок 5.4, б).

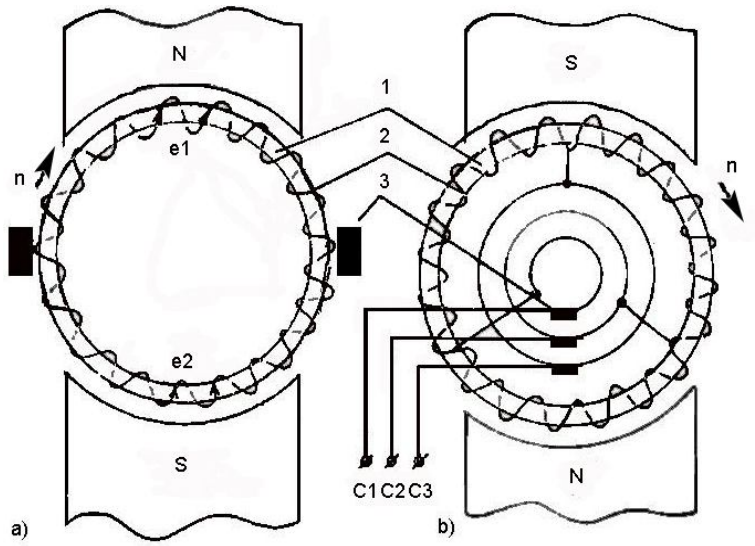


Рисунок 5.4 – Принцип образования обмоток:
а – якорных машин постоянного тока;
б – трехфазных машин переменного тока

Кольцевые обмотки применялись в электротехнике на заре развития электрических машин, однако они отличались малой эффективностью, т.к. ЭДС в них наводится только в тех частях витков, которые лежат на поверхности тороида и пересекаются магнитными силовыми линиями внешнего поля.

В применяемых в настоящее время барабанных обмотках стороны катушек размещены в пазах, расположенных на поверхности якоря (статора) под полюсами разной полярности, как и в машинах постоянного тока. Катушки состоят из одинакового числа последовательно соединенных витков, а по способу соединения между собой они могут быть петлевыми или волновыми, катушечными или стержневыми (рисунок 5.5, а и б). По ширине они могут быть с полным или укороченным шагом. Несколько последовательно соединенных катушек одной фазы образуют катушечную группу (рисунок 5.5, в). Катушечные группы, в свою очередь, могут соединяться в фазе последовательно или параллельно.

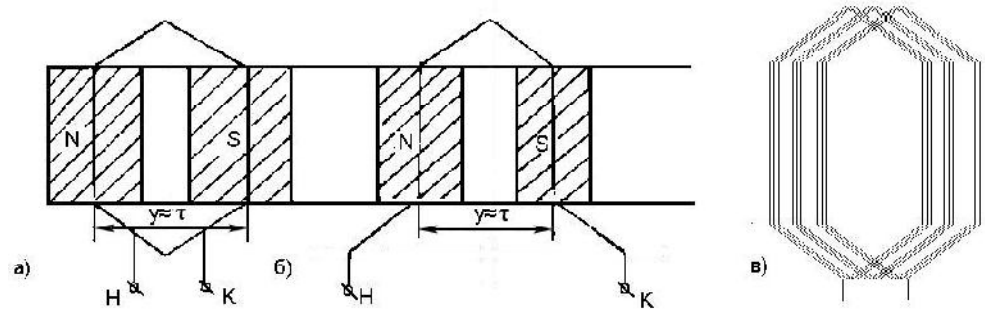


Рисунок 5.5 – Построение обмоток машин переменного тока:
а) катушечная секция; б) стержневая; в) катушечная группа

На рисунке 5.6 (а) показано расположение простейшей трехфазной обмотки в пазах статора синхронного генератора.

Направление ЭДС, индуктируемой в каждой стороне одного витка, определяется по правилу правой руки. При расположении активных частей витка под полюсами разной полярности эти ЭДС скла-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

дываются, что увеличивает эффективность использования барабанных обмоток по сравнению с кольцевыми.

Естественно, что общая ЭДС фазы определяется как числом витков в отдельной катушке, так и числом последовательно соединенных катушек с учетом их распределения по пазам и симметричности расположения по отношению к полюсам разной полярности. Распределение катушек по пазам, укорочение или удлинение шага катушки по отношению к полюсному делению приводит к уменьшению ЭДС, что учитывается соответствующими коэффициентами.

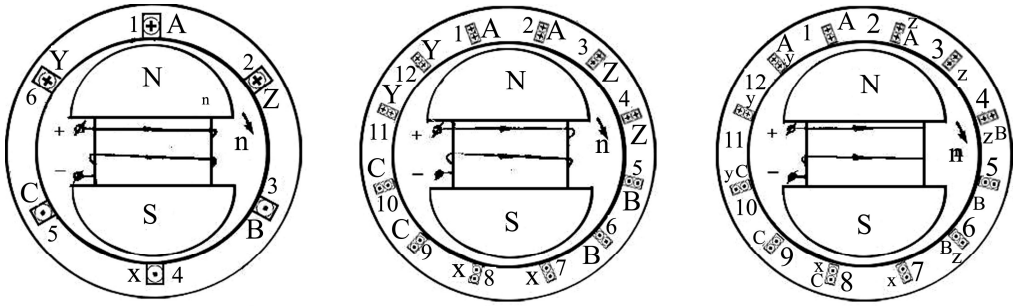


Рисунок 5.6 – Расположение трехфазной обмотки в пазах статора синхронного генератора

При выполнении трехфазных обмоток наряду с обеспечением достаточной механической и электрической прочности, нагревостойкости и надежности соблюдают следующие основные условия:

- все фазы должны находиться в одинаковых условиях по отношению к магнитному полю;
- во всех фазах должны наводиться одинаковые ЭДС;
- электродвижущие силы трех фаз должны быть сдвинуты на электрический угол 120°.

5.2.2. Параметры обмоток

Распределенные обмотки машин переменного тока делятся на простые и сложные, однослойные и двухслойные, причем в двухслойных обмотках, как и в машинах постоянного тока, одна сторона катушки лежит в верхней части пазов, другая – в нижней (рисунок 5.6, б и в).

К основным параметрам обмоток машин переменного тока относятся:

m – число фаз (m = 3 - трехфазная обмотка) ;

z_1 – число пазов статора ;

2p – число полюсов (p – число пар полюсов) ;

y_1 – шаг обмотки, обозначающий расстояние между началом и концом катушки ;

τ – полюсное деление, обозначающее расстояние между центрами полюсов противоположной полярности;

q – число пазов на полюс и фазу (q = 1 – обмотка сосредоточенная, q > 1 – обмотка распределенная);

$W_к$ – число последовательно соединенных витков в катушке;

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$n_к$ – общее число катушек в обмотке ;
$n_{кг}$ – общее число катушечных групп ;
W_1 – число последовательно соединенных витков в фазе ;
$k_р$ – коэффициент распределения ;
$k_у$ – коэффициент укорочения;
$k_{об} = k_р\, k_у$ – обмоточный коэффициент.

Шаг обмотки y и полюсное деление τ могут измеряться или в линейных размерах, или в числах пазов.

Для обмоток с диаметральным шагом величина шага и полюсного деления рассчитывается в числах пазов по соотношению

$$y = \tau = \frac{z_1}{2p}. \qquad (5.1)$$

Под одним полюсом всегда располагаются проводники всех трех фаз обмотки, поэтому каждая фазная зона занимает по одной трети полюсного деления, что составляет 60 электрических градусов. Порядок чередования фаз под каждым полюсом должен быть одинаковым. На каждую фазную зону одного полюса приходится определенное число пазов q, которое определяют по формуле

$$q = \frac{z_1}{2pm}. \qquad (5.2)$$

Для обмоток с укороченным шагом вводится параметр $\beta = y/\tau$, характеризующий относительный шаг обмотки (укорочение).

Угол между соседними пазами, позволяющий учитывать фазовый сдвиг ЭДС в соседних катушках, определяют по соотношению

$$\alpha = \frac{360^\circ p}{z_1}. \qquad (5.3)$$

5.2.3. Двухслойные обмотки

Наибольшее применение в машинах переменного тока получили двухслойные обмотки, которые дают возможность выбора более благоприятного шага, позволяют уменьшить расход обмоточного провода и изоляции. Для улучшения формы кривой ЭДС и МДС в машинах переменного тока двухслойные обмотки выполняют с укороченным шагом, $y < \tau$. При $y \approx 0{,}8\,\tau$ достигается экономия меди, а уменьшение основной гармоники ЭДС или МДС по сравнению с обмоткой с диаметральным шагом, составляет несколько процентов.

На рисунке 5.6 показаны сечения статора СМ с расположением в пазах двухслойных обмоток с диаметральным (рисунок 5.6, б)) и с укороченным (рисунок 5.6, в)) шагами. Развернутые схемы обмоток, соответствующих рисунку 5.6 с катушками петлевого типа, приведены на рисунке 5.7.

Для упрощения на рисунке 5. 7, б и в показаны катушки только одной фазы А. Обозначения выводов фазы сделаны в соответствии с требованиями ГОСТ 183-74.

По распределению фазных зон обмотки с укороченным шагом видно, что фазные зоны нижнего слоя смещаются относительно фазных зон верхнего слоя на величину (в пазах) $\tau - y_1$. Число катушек двухслойной обмотки всегда равно числу пазов, $n_к = z_1$.

В рассмотренных схемах петлевых обмоток число параллельных ветвей a = p. При p = 1, a = 1, при 2p = 4 петлевые обмотки дают возможность получить две параллельные ветви, при 2p = 6 - три и т.д.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В многополюсных машинах переменного тока петлевые обмотки имеют большое число соединений между катушечными группами, что увеличивает расход меди и усложняет технологию их изготовления. Если число параллельных ветвей можно выбрать равным одной или двум, целесообразно в многополюсных машинах применять волновую обмотку, в которой лобовые части обеспечивают межкатушечные соединения.

5.3. Электродвижущая сила в обмотках машин переменного тока

Электродвижущая сила в обмотке электрической машины индуктируется только при условии изменения потокосцепления магнитного поля с витками катушки, что находит отражение в известном соотношении

$$e = -\frac{d\Psi_k}{dt} = -w_k \frac{d\Phi_k}{dt}, \qquad (5.4)$$

отражающем закон электромагнитной индукции. Потокосцепление может изменяться под действием различных причин.

При вращении витка в магнитном поле или при перемещении магнитного поля относительно неподвижного витка в нем индуктируется ЭДС, которую называют ЭДС вращения. При изменении во времени потока, сцепленного с неподвижным витком, в нем индуктируется так называемая трансформаторная ЭДС. Во всех случаях величина и характер изменения индуктируемой ЭДС определяется величиной и характером изменения потокосцепления и также параметрами витка.

Определим ЭДС в одной катушке обмотки статора синхронного генератора, имеющей число витков $W_к$ и диаметральный шаг (рисунок 5.6).

Частота индуктируемой в витке ЭДС определяется скоростью вращения и числом пар полюсов ротора. Одному повороту двухполюсного ротора соответствует один период изменения ЭДС. Для того чтобы в двухполюсном СГ получить частоту ЭДС 50 Гц, необходимо вращать ротор со скоростью 50 оборотов в секунду или 3000 оборотов в минуту. При увеличении числа полюсов скорость вращения ротора будет пропорционально уменьшается. В общем случае, если ротор имеет 2p полюсов и вращается со скоростью *n* об/мин, то частота ЭДС равна

$$f = \frac{pn}{60}. \qquad (5.5)$$

Величину ЭДС вращения удобно определить по соотношению

$$e = B\ell v, \qquad (5.6)$$

из которого ясно видна зависимость формы кривой ЭДС от характера распределения магнитной индукции на полюсном делении.

Одно из основных требований, предъявляемых к генераторам переменного тока, заключается в обеспечении синусоидальности изменения во времени ЭДС, индуктируемой в обмотке статора, т.е. в обеспечении зависимости

$$e = E_m \sin \omega t. \qquad (5.7)$$

Как отмечалось выше, в СГ это достигается за счет создания в воздушном зазоре между статором и ротором синусоидального (или

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

близкого к синусоидальному) распределения магнитной индукции по ширине полюсного деления.

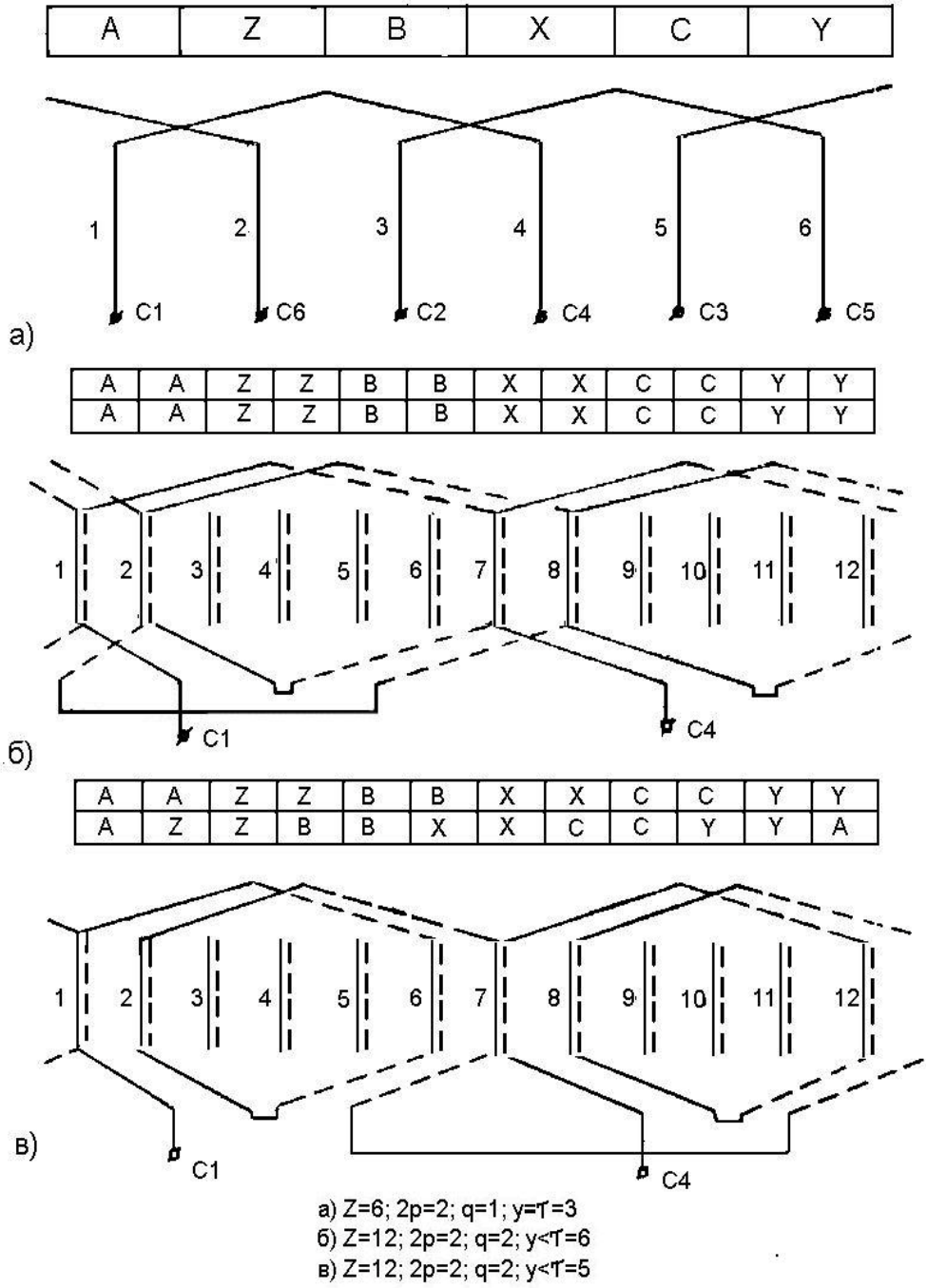


Рисунок 5.7 – Принцип построения трехфазных обмоток машин переменного тока: а,б) – двухполюсная обмотка с диаметральным шагом; в) – двухполюсная обмотка с укороченным шагом;

Практически распределение поля в зазоре всегда отличается от синусоидального, что связано как с несинусоидальностью распределения МДС (особенно в неявнополюсном роторе, так и с наличием зубцов на статоре, насыщением и т.д. Следовательно, и ЭДС в обмотках также несинусоидальна. Для упрощения расчетов и анализа физических процессов в электрических машинах несинусоидальную кривую магнитной индукции представляют в виде гармонического ряда синусоидальных кривых, в который кроме первой (основной) гармоники B_1 входят высшие гармонические порядка 3, 5, 7 (B_3, B_5, B_7) и т.д. (рису-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

нок 5.8) и считают, что каждая из этих гармоник индуктирует в обмотке синусоидальную ЭДС соответствующего порядка.

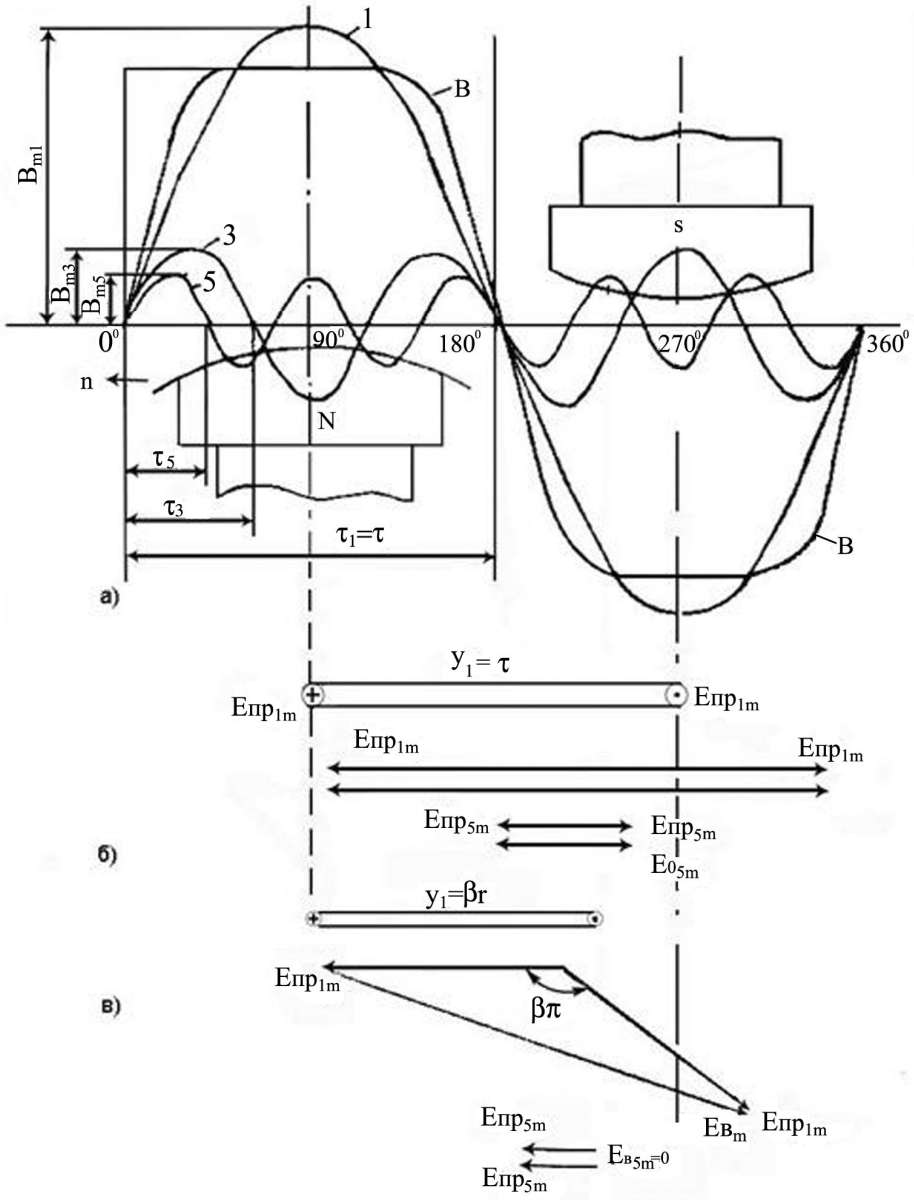


Рисунок 5.8 – Распределение магнитной индукции под полюсом:
а – разложение индукции на гармонические;
б – ЭДС витка с диаметральным шагом;
в – ЭДС витка с укороченным шагом

Рассмотрим величину ЭДС в проводнике от первой гармоники магнитной индукции

$$e_{пр1} = E_{пр1m}\sin\omega t, \qquad (5.8)$$

где в соответствии с соотношением (5.6)

$$E_{пр1m} = B_{1m}\ell v. \qquad (5.9)$$

Полный магнитный поток от 1-й гармоники магнитной индукции равен (рисунок 5.8,а)

$$\Phi_m = \frac{2}{\pi}B_{1m}\ell\tau, \qquad (5.10)$$

откуда получаем

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$B_{1m} = \frac{\pi \Phi_m}{2\ell\tau}. \quad (5.11)$$

Окружная скорость вращения ротора равна

$$v = \frac{\pi Dn}{60} = \frac{\pi Dn60f}{60p} = 2\tau f. \quad (5.12)$$

Подставляя (5.11) и (5.12) в (5.9), получаем

$$E_{пр1m} = \pi f \Phi_m. \quad (5.13)$$

Практический интерес представляет действующее значение ЭДС первой гармоники

$$E_{пр1} = \frac{E_{пр1m}}{\sqrt{2}} = 2{,}22 f \Phi_{1m}. \quad (5.14)$$

ЭДС для витка с диаметральным шагом (рисунок 5,8,б) складывается из ЭДС двух проводников, находящихся под полюсами разной полярности

$$E_{e1} = 2E_{пр1} = 4{,}44 f \Phi_{1m}, \quad (5.15)$$

а ЭДС катушки с диаметральным шагом равна

$$E_{k1} = 4.44 w_k f \Phi_{1m}. \quad (5.16)$$

ЭДС, индуктируемые в катушке высшими гармониками магнитной индукции, рассчитываются по аналогичным соотношениям

$$E_{kv} = 4{,}44 f_v w_k \Phi_{vm}, \quad (5.17)$$

где ν - порядок пространственной гармоники.

Магнитный поток Φ_{vm} определяется из соотношения

$$\Phi_{vm} = \frac{2}{\pi} B_{vm} \ell \tau_v. \quad (5.18)$$

Для пространственных гармоник магнитного поля $f_v = f_1$.

Для катушки с укороченным шагом (как на рисунке 5.6,в) ЭДС уменьшается, что связано с уменьшением магнитного потока Ф (рисунок 5.8,в). Коэффициент укорочения k_y определяется отношением геометрической суммы ЭДС двух проводников (рисунок 5.8,в)

$$E_{в1} = 2E_{пр1} \sin\beta \frac{\pi}{2} \quad (5.19)$$

к арифметической сумме, определяемой по (5.15), т.е.

$$k_y = \sin\beta \frac{\pi}{2}, \quad (5.20)$$

где $\beta = \frac{y}{\tau}$ - характеризует относительный шаг обмотки.

Следовательно, ЭДС катушки с укороченным шагом рассчитывается по формуле

$$E_{k1} = 4{,}44 f w_k k_y \Phi_m. \quad (5.21)$$

Укорочение обмотки помимо экономии обмоточных материалов позволяет существенно уменьшить действие высших гармоник магнитной индукции, что показано на рисунке 5.8,в.

Выбирая, например, укорочение $\beta = \frac{4}{5}$ можно добиться полного устранения действия пятой гармоник магнитной индукции, т.к. ЭДС в

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

противоположных проводниках витка от этой гармоники поля равны по величине, но направлены навстречу друг другу.

На практике чаще всего применяют укорочение $\beta = \frac{5}{6}$, что позволяет существенно уменьшить одновременно и пятую, и седьмую гармоники, наиболее проявленные в общей кривой ЭДС.

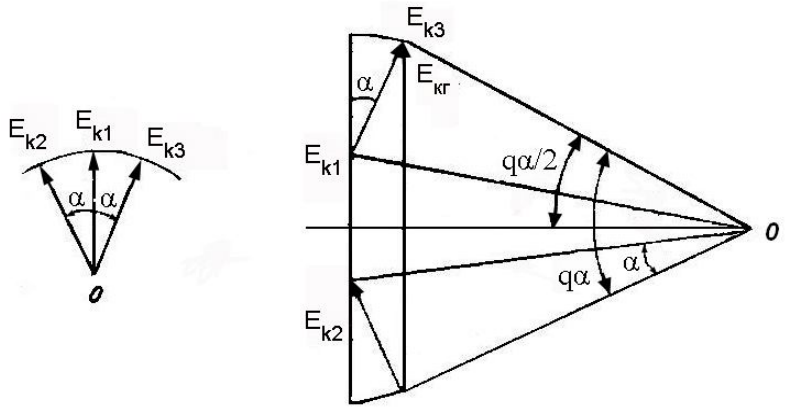


Рисунок 5.9 – ЭДС катушечной группы

ЭДС катушечной группы, состоящей из *q* последовательно соединенных и расположенных в соседних пазах катушек определяется как геометрическая сумма векторов ЭДС отдельных катушек, сдвинутых в пространстве на угол $\alpha = \frac{\pi}{mq} = \frac{360p}{z_1}$.

Например, при q=*3*, 2p=*2* и *z =18,* угол *α* составляет 20°. На рисунке 5.9 эти ЭДС показаны тремя векторами, каждый из которых представляет собой действующее значениеЭДС одной катушки.

Из построения следует, что геометрическая сумма рассматриваемых ЭДС, равная

$$E_{k2} = qE_k \frac{sin\frac{q\alpha}{2}}{qsin\frac{\alpha}{2}}, \qquad (5.22)$$

меньше арифметической суммы ЭДС отдельных катушек $qE_к$. Таким образом, распределение катушек, составляющих фазу обмотки, по пазам приводит к уменьшению результирующей ЭДС, что учитывается коэффициентом распределения, равным

$$k_{p1} = \frac{E_{кг}}{qE_k} = \frac{sin\frac{q\alpha}{2}}{qsin\frac{\alpha}{2}}. \qquad (5.23)$$

Выражение для ЭДС фазы обмотки статора (для первой гармоники) записывается в виде

$$E_{ф1} = 4{,}44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_{1m}, \qquad (5.24)$$

где $k_{об1} = k_{y1} k_{p1}$ – обмоточный коэффициент для первой гармоники;

$$w_1 = \frac{w_k z_1}{\alpha m} \qquad (5.25)$$

число последовательно соединенных витков фазы.

Для определения высших гармоник ЭДС фазы используют соотношение

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$E_{\phi v} = 4{,}44 f_v w_1 k_{обv} \Phi_{vm} , \quad (5.26)$$

где $k_{об1} = k_{yv} k_{pv}$; $k_{yv} = v\beta\frac{\pi}{2}$; $k_{pv} = \frac{\sin v\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{v\alpha}{2}}$. (5.27)

Результирующая ЭДС фазы с учетом высших гармония определяется из соотношения

$$E_{\Phi} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + ... + E_v^2} . \quad (5.28)$$

Как отмечалось выше высшие гармоники искажают ЭДС и форма напряжения на зажимах СГ становится несинусоидальной. Это отрицательно сказывается как на работе самого генератора, так и потребителей электроэнергии - асинхронных двигателей, систем управления, вычислительных комплексов, навигационных приборов и т.д. Снижаются КПД и коэффициент мощности потребителей, увеличиваются потери энергии, появляются погрешности в измерениях, повышаются шумы и вибрации электрических машин.

Требованиями Морского Регистра коэффициент несинусоидальности кривой напряжения судовых СГ, под которым понимают отношение

$$\kappa_u = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{v} E_{vm}^2}}{E_{1m}} \quad (5.29)$$

не должен превышать 10 %.

Укорочение шага обмотки, ее распределение по пазам способствуют улучшению формы кривой ЭДС и напряжения. Кроме того, для этих же целей часто применяют скос пазов на статоре (или на роторе) на одно зубцовое деление.

На форму кривой ЭДС также оказывает влияние способ соединения фаз - "звезда" (Y), или "треугольник" (Δ). В трехфазных системах первые гармоники ЭДС отдельных фаз сдвинуты на 120°относительно друг друга, а ЭДС третьих и кратных трем гармоник - на 360°, т.е. совладают по фазе, и при соединении фаз в "звезду", в линейных напряжениях эти гармоники отсутствуют. При соединении фаз обмотки в "треугольник" ЭДС этих гармоник по контуру "треугольника" складываются и создают ток тройной частоты. В линейных напряжениях и в этом случае гармоник, кратных трем, не содержится.

Все эти особенности необходимо учитывать при эксплуатации электрических машин.

5.4. Вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки машин переменного тока

На рисунке 5.8 показано распределение первой гармоники магнитного поля, создаваемого обмотками возбуждения явнополюсного или неявнополюсного роторов синхронной машины. При вращении ротора это поле индуктирует в обмотке статора СМ ЭДС, синусоидально изменяющуюся во времени. В трехфазном синхронном генераторе ЭДС отдельных фаз обмотки статора смещены на электрический угол 120°, что достигается пространственным сдвигом фаз, Под действием этих ЭДС в замкнутой на нагрузку обмотке протекают токи, которые создают магнитодвижущую силу (МДС) и круговое вращаю-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

щееся магнитное поле, причем скорость вращения этого поля точно равна скорости вращения ротора.

В синхронных и асинхронных двигателях уложенные в пазы статора трехфазные обмотки подключаются к трехфазной сети и также создают круговое вращающееся магнитное поле, обеспечивающее в преобразовании электрической энергии в механическую.

Принцип образования вращающегося магнитного поля рассмотрим на примере простейшей трехфазной обмотки, фазы которой сдвинуты в пространстве на 120°, имеют по одному витку, соединены в звезду и подключены к симметричной трехфазной системе со сдвигом фаз напряжений и токов на 120°, так что для токов отдельных фаз можно записать

$$\begin{cases} I_A = I_m \sin\omega t \\ I_B = I_m \sin(\omega t - 120°) \\ I_C = I_m \sin(\omega t - 240°) \end{cases} \qquad (5.30)$$

На рисунке 5.10,а показаны кривые мгновенных значений этих токов, а на рисунке 5.10, б, в, г условно показано распределение результирующего магнитного поля трех фаз для трех различных моментов времени.

В момент времени t_1 ток в фазе А положителен и равен максимальному $i_A = I_m$, токи в фазах В и С отрицательны и равны

$$i_B = i_C = \frac{1}{2} I_m.$$

Положительное направление тока условно принято от начала фазы к ее концу, что на схеме рисунок 5.10, б обозначено крестиком $\oplus$ для начала фазы и точкой для ее конца. Соответственно в фазах В и С токи отрицательны и направлены от Y к В и от Z к С.

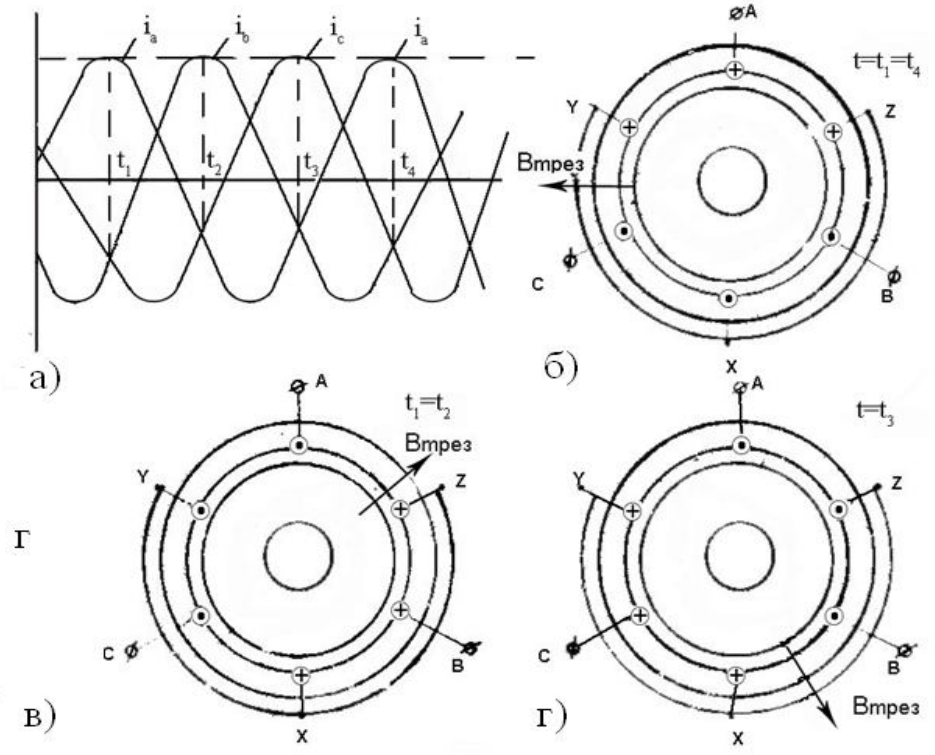


Рисунок 5.10 – Образование вращающегося магнитного поля трехфазной обмотки машин переменного тока

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Пользуясь правилом "буравчика" легко найти картину распределения результирующего магнитного потока трех фаз для момента времени t_1. Ось результирующего магнитного поля ($B_{mрез}$) направлена горизонтально справа налево.

Величина результирующей магнитной индукции составляет $B_{mрез}=1,5 \cdot B_{mф}$ ($B_{mф}$ - максимальная индукция пульсирующего магнитного поля фазы).

При изменении фазы токов в витках на 120° (момент времени t_2) ось результирующего магнитного поля поворачивается в пространстве на 120° (рисунок 5.10, в) в направлении чередования фаз (от фазы А к фазе В). При изменении фазы токов в витках еще на 120° (момент времени t_3) ось результирующего магнитного поля поворачивается еще на 120° (рисунок 5.10, г). Через время, равное периоду изменения тока в одной фазе T (момент времени t_4 на рисунке 5.10, а) магнитное поле делает полный оборот.

Для изменения направления вращения поля необходимо изменить порядок чередования тока в фазах, для чего на практике меняют местами выводы двух любых фаз, например В и С, что соответствует обратному порядку следования фаз. Направление вращения поля в этом случае будет против часовой стрелки, в чем нетрудно убедиться, произведя построения, аналогичные рисунку 5.10 с чередованием фаз А-С-В.

В рассмотренном случае число полюсов результирующего магнитного поля 2p=2 и оно вращается со скоростью $n = \frac{60 f_1}{p}$, что при частоте тока f_1=50 Гц составляет 3000 об/мин. Изменение скорости вращения магнитного поля возможно только за счет изменения числа пар полюсов обмотки или частоты питающей сети. Для основной судовой силовой сети, имеющей частоту 50 Гц, асинхронные двигатели имеют стандартные значения скорости вращения магнитного поля, кратные числу полюсов: для 2p=2, n_1=3000 об/мин; для 2p=4, n_1=1500 об/мин; для 2p=6, n_1=1000 об/мин и т.д.

Рассмотрим форму кругового вращающегося магнитного поля, создаваемого трехфазной обмоткой. Естественно, что форма этого поля определяется, главным образом, характером распределения МДС обмотки. Кроме того, на форме поля сказывается неравномерность воздушного зазора, насыщение магнитопровода и некоторые другие факторы.

МДС одной катушки с числом витков $W_к$ и током $I_A = I_m sin\omega t$ имеет прямоугольное распределение (рисунок 5.11,а) и численно равна

$$2F_k = w_k i_k . \qquad (5.31)$$

Величина МДС, приходящаяся на один полюс, равна половине суммарной МДС

$$F_k = \frac{w_k i_k}{2} . \qquad (5.32)$$

Эта МДС изменяется во времени в соответствии с изменением тока в катушке, а создаваемый ею магнитный поток является пульсирующим.

Прямоугольную волну МДС можно разложить в ряд Фурье, включающий нечетные гармоники (ν = 1, 3, 5, 7...), каждая из которых

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

изменяется по гармоническому закону в пространстве (*cosvα*) и во времени (*cosωt*), т.е.

$$F_k = \Sigma_v F_{kvm} cos\omega t cosv\alpha \qquad (5.33)$$

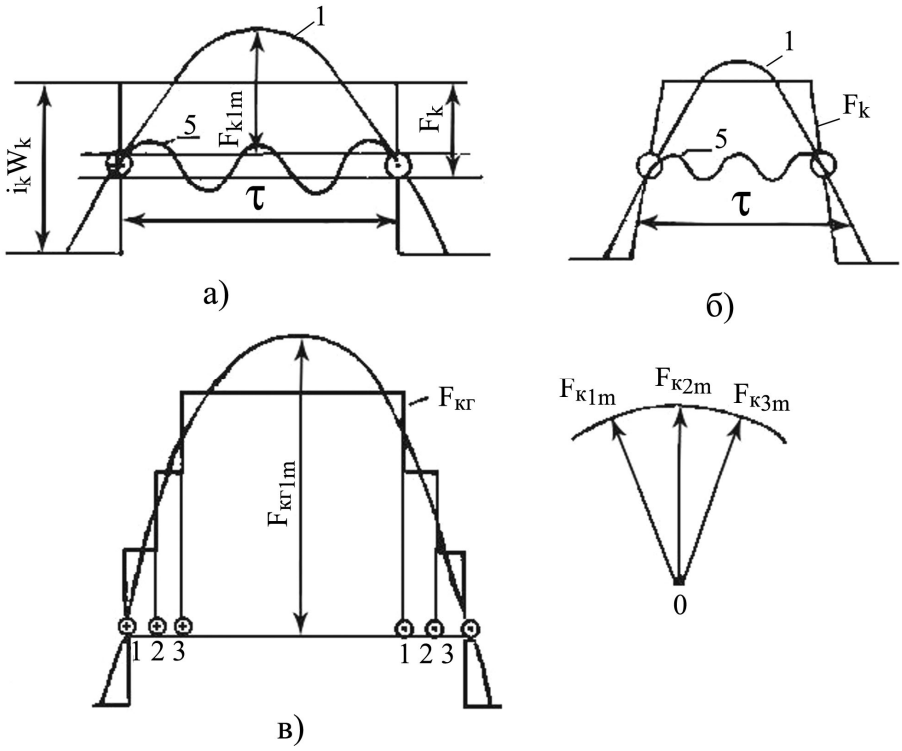


Рисунок 5.11 – Магнитное поле в зазоре, содаваемое: а – катушкой с полным шагом; б – катушкой с укороченным шагом; в – катушечной группой

Амплитуда первой гармоники МДС катушки равна

$$F_{k1m} = \frac{4W_k I_m}{\pi 2} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi 2} w_k I = 0{,}9 w_k I, \qquad (5.34)$$

где $\frac{4}{\pi}$ – множитель ряда Фурье; I_m и I - амплитудное и действующее значения токов в катушке.

МДС катушки с укороченным шагом $y<\tau$ (рисунок 5.11, б) имеет трапецеидальное распределение и при ее разложении в гармонический ряд амплитуды высших гармоник меньше, чем при прямоугольной МДС.

МДС катушечной группы имеет ступенчатый вид, что еще больше приближает ее к синусоиде (рисунок 5.11, в).

Синусоидальные гармонические составляющие МДС подобно гармоническим составляющим ЭДС могут изображаться в виде векторов, а их сложение, например, для отдельных катушек катушечной группы, производится по правилам векторного сложения как и для составляющих ЭДС (см. рисунок 5.11, в). Поэтому коэффициенты укорочения k_y и распределения k_p при определении МДС фазы рассчитываются по таким же соотношениям, что и при определении ЭДС фазы. Для первой гармоники они равны

$$k_{y1} = \sin\beta\frac{\pi}{2}; \quad k_{p1} = \frac{\sin v\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Для высших гармоник МДС эти коэффициенты рассчитываются по соотношениям (5.27).

Амплитудное значение первой гармоники МДС фазы определяется по формуле

$$F_{\Phi 1m} = \frac{0{,}9 W_{\Phi} k_{об1}}{p} I_{\Phi} \qquad (5.35)$$

где $w_{\Phi} = \frac{pqw_k}{a}$ – число последовательно соединенных витков фазы; $k_{об1} = k_{y1} k_{p1}$ – обмоточный коэффициент для первой гармоники; p – число пар полюсов.

МДС катушки, катушечной группы и фазы обмотки создают пульсирующее магнитное поле. МДС трех фаз, сдвинутых в пространстве на 120° и подключенных к симметричной трехфазной системе напряжений создает круговое вращающееся магнитное поле, амплитуда которого не изменяется (или изменяется весьма незначительно), что качественно было показано на рисунке 5.10.

Для примера на рисунке 5.12 построена МДС трехфазной обмотки, имеющей параметры $z_1 = 12$, $q = 2$, $2p = 2$, $y_1 = \frac{5}{6}\tau = 5$, что соответствует обмотке, показанной на рисунке 5.6, в. Построение приведено для момента времени, когда токи в фазах равны

$$I_A = I_m, \quad I_B = I_C = \frac{1}{2} I_m$$

Амплитудное значение МДС первой гармоники трехфазной обмотки определяется по формуле

$$F_{3\phi} = \frac{3}{2} F_{\phi 1m} = 1{,}35 \frac{W_{\phi} K_{об1}}{p} I. \qquad (5.36)$$

A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y
A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	A

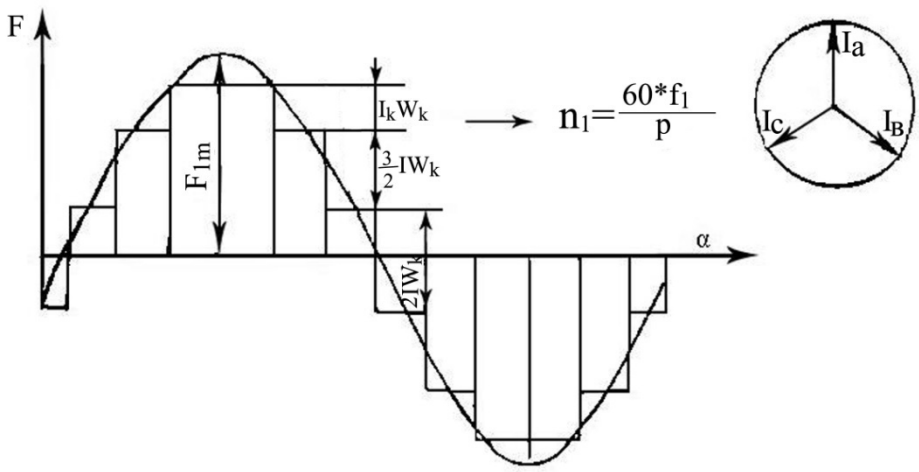


Рисунок 5.12 – МДС трехфазной обмотки с параметрами $z_1 = 12$, $q = 2$, $2p = 2$, $y_1 = \frac{5}{6}\tau = 5$

Круговое вращающееся магнитное поле, создаваемое вращающейся МДС трехфазной обмотки, сложным образом распределяется по участкам магнитной цепи машины, однако главное значение имеет распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Поэтому для

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

упрощения анализа магнитным сопротивлением стальных участков магнитопровода можно пренебречь и считать, что вся МДС обмотки статора расходуется на проведение магнитного потока через воздушный зазор.

На основании закона полного тока можно записать

$$F_{3\phi} = H\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}\delta, \qquad (5.37)$$

откуда

$$B_\delta = F_{3\phi}\frac{\mu_0}{\delta}. \qquad (5.38)$$

Величина μ_0/δ называется удельной магнитной проводимостью воздушного зазора; чем больше воздушный зазор, тем большую МДС должна создавать обмотка статора для обеспечения заданного значения магнитной индукции B_δ.

Распределение кривой магнитной индукции B_δ на полюсном делении определяется формой МДС; каждая гармоника МДС определяет соответствующую гармонику магнитной индукции. Кроме того, распределение магнитной индукции B_δ искажается из-за неравномерности воздушного зазора. Часто для упрощения анализа и расчетов поле в зазоре принимают синусоидальном, т.е. ограничиваются рассмотрением первых (основных) гармоник МДС и магнитной индукции, а наличие открытий пазов на статоре и роторе учитывают введением коэффициента воздушного зазора $к_\delta \approx 1{,}1\ldots1{,}2$, называемого коэффициентом Картера.

5.5. Обозначения выводов машин переменного тока

Выводы обмоток трехфазных машин обозначаются в соответствии с ГОСТ 26772 - 85 прописными буквами латинского алфавита (например: U, V, W) в соответствии с таблицей 5.1.

Таблица 5.1. Выводы трехфазных машин

Наименование и схема соединений обмоток	Число выводов	Наименование выводов	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
Обмотки статора (якоря) открытая схема	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	U1(C1) V1(C2) W1(C3)	U2(C4) V2(C5) W2(C6)
соединение звездой	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нейтраль	U(C1) V(C2) W(C3) N(0)	
соединение треугольником		Первый зажим Второй зажим Третий зажим	U(C1) V(C2) W(C3)	
Обмотки возбуждения (индукторов) синхронных машин	2		F1(И1)	F2(И2)

Обозначения выводов вторичных обмоток трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором приведены в таблице 5.2

Таблица 5.2. Выводы трехфазных АД

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Число выводов на контактных кольцах	Наименование выводов	Обозначения начала и конца выводов
3	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	R(P1) L(P2) M(P3)
4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нейтраль	K(P1) L(P2) M(P3) (Q)00

Для машины с одним направлением вращения порядок чередования обозначений выводов должен соответствовать порядку следования фаз для данного вращения.

Выводы обмоток однофазных машин обозначают в соответствии с таблицей 5.3.

Таблица 5.3 Выводы однофазных машин.

Наименование обмоток	Обозначение выводов	
	начало	конец
Обмотка статора : главная пусковая	 U1(C1) Z1(П1)	 U2(C2) Z2(П2)

Обмотки машин малой мощности с диаметром корпуса 40мм и менее, где буквенное обозначение применять затруднительно, допускается обозначение выводом цветным кодом (проводами с разноцветной изоляцией, краской и пр):

- для трехфазных машин в соответствии с таблицей 5.4;
- для однофазных двигателей в соответствии с таблицей 5.5;
- для коллекторных двигателей постоянного и переменного тока в соответствии с таблицей 5.4;

Таблица 5.4. Выводы трехфазных машин малой мощности

Схема соединения	Число выводов	Название выводов	Цвет выводов	
			Начало	Конец
Открытая	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	Желтый Зеленый Красный	Желтый с черным Зеленый с черным Красный с черным
Звездой	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нулевая точка	Желтый Зеленый Красный Черный	Желтый с черным Зеленый с черным Красный с черным Черный
Треугольником	3	Первый зажим Второй зажим Третий зажим	Желтый Зеленый Красный	Желтый с черным Зеленый с черным Красный с черным

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Таблица 5.5. Выводы однофазных машин малой мощности

Число выводов	Обмотка	Цвет выводов	
		Начало	Конец
4	Главная Вспомогательная	Красный Синий	Красный с черным Синий с черным
3	Главная Вспомогательная Общая точка	Красный Синий Черный	

Выводы машин переменного тока, имеющие одинаковые буквенные обозначения, следует обозначать дополнительной цифрой, стоящей впереди букв.

Выводы обмоток ранее разработанных машин и установленных на судах, находящихся в эксплуатации, обозначены согласно ГОСТ 183 – 74 и в представленных таблицах указаны в скобках.

5.6. Вопросы для самопроверки и контроля знаний

1. Сформулируйте три основные закона электромеханики.
2. Изобразите конструктивную схему синхронной машины СМ.
3. Изобразите конструктивную схему явнополюсного ротора синхронной машины.
4. Изобразите конструктивную схему неявнополюсного ротора синхронной машины.
5. Представьте конструктивную схему асинхронного двигателя .
6. Покажите конструкцию катушек трехфазных обмоток.
7. Какими параметрами характеризуются обмотки машин переменного тока ?
8. Как образуется вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки ?
9. Назовите обозначения выводов машин переменного тока.
10. Напишите формулу для расчета ЭДС фазы машин переменного тока.
11. Напишите формулу для расчета коэффициента укорочения обмотки.
12. Напишите формулу для расчета коэффициента распределения обмотки.
13. Напишите формулу для определения удельной магнитной проводимости воздушного зазора.
14. Напишите формулу для расчета МДС фазы машин переменного тока.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 6. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

6.I. Принцип действия асинхронного двигателя

Исходя из конструктивной схемы асинхронного двигателя (АД) (рисунок 5.3) и принципа получения кругового вращающегося магнитного поля (рисунок 5.10), работу АД можно проиллюстрировать схемой, показанной на рисунке 6.1. В электромеханическом преобразовании энергии в АД участвуют трехфазная обмотка 1, расположенная на неподвижном статоре 2 и создающая круговое вращающееся магнитное поле, и обмотка 3 вращающегося ротора 4, вал 5 которого соединен с исполнительным механизмом. Между статором и ротором предусматривается воздушный зазор 6.

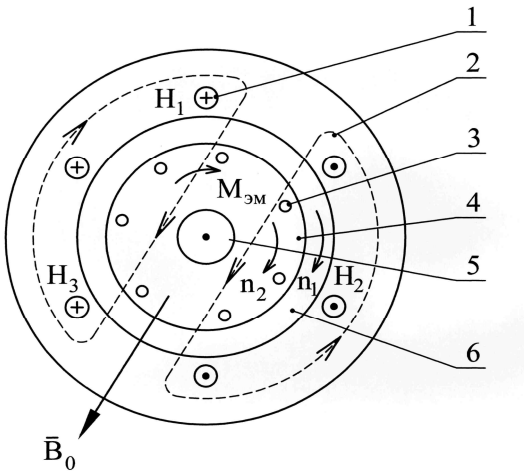


Рисунок 6.1 – Принцип действия асинхронного двигателя

При вращении магнитного поля со скоростью

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

линии магнитной индукции $\bar{B}_0$ пересекают проводники обмотки ротора и в них индуктируется ЭДС e_2 и протекает ток I_2. Направление ЭДС определяется по правилу "правой руки", а ее величина равна

$$e_{2пр} = B\ell v_1 , \qquad (6.1)$$

где ℓ – активная длина проводника обмотки ротора; $v_1 = \frac{\pi D}{60} n_1$ – линейная скорость движения магнитного поля статора; D – диаметр расточки статора.

Направление тока I_2 совпадает с направлением ЭДС $e_{2пр}$. В результате взаимодействия проводников с током и магнитного поля на каждый проводник действует электромагнитная сила

$$F_{пр} = B\ell I_2 \qquad (6.2)$$

направление, которой определяется по правилу "левой руки".

Совокупность этих сил создает на роторе результирующую силу $F_{рез}$ и электромагнитный момент $M_{эм}$, приводящий ротор во вращение со скоростью n_2 в ту же сторону, что и вращение поля статора. Вращение ротора через вал передается исполнительному механизму. Таким образом, электрическая энергия, поступающая в обмотку статора из сети, преобразуется в механическую энергию.

С началом движения ротора ЭДС в проводниках ротора определяются разностью скоростей v_1 и v_2

$$E_{2вр} = B\ell(v_1 - v_2) , \qquad (6.3)$$

где $v_2 = \frac{\pi D}{60} n_2$ – линейная скорость движения проводника ротора.

Чем выше скорость вращения ротора n_2, тем меньшая ЭДС в нем индуктируется, тем меньше ток I_2, тем меньше сила $F_{пр}$. При достижении ротором скорости вращения $n_2 = n_1$, $e_2 = 0$, действие электро-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

магнитных сил прекращается и вращение ротора замедляется под действием сил трения (на холостом ходу) или под действием момента сопротивления исполнительного механизма (при работе под нагрузкой). Но когда n_2 станет меньше n_1, опять начнет действовать электромагнитная сила.

Следовательно, в рассматриваемой системе возможно только асинхронное (несинхронное) вращение ротора относительно вращающегося магнитного поля статора.

Электромагнитный момент $M_{эм}$ уравновешивается моментом сопротивления M_c исполнительного механизма. Чем больше M_c, тем больше должен быть вращающий момент $M_{эм}$, который может возрасти, в первую очередь, за счет тока в проводниках ротора. Ток при постоянстве сопротивления проводника пропорционален ЭДС, которая зависит от скорости пересечения проводников ротора вращающимся магнитным полем.

Следовательно, чем больше момент сопротивления, тем меньше скорость вращения ротора и наоборот.

Отношение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{или} \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\% \tag{6.4}$$

называется скольжением асинхронной машины.

При неподвижном роторе ($n_2 = 0$) скольжение равно $s = 1{,}0$. Это для АД режим короткого замыкания. При холостом ходе, когда скорость ротора максимально приближается к синхронной ($n_2 \approx n_1$) скольжение минимально и очень близко к нулю. Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке АД, называется номинальным скольжением $s_н$ и составляет единицы процента, в зависимости от типа и назначения двигателя.

С учетом (6.4) скорость вращения ротора может быть выражена через n_1 и скольжение s

$$n_2 = n_1(1 - s) . \tag{6.5}$$

В рабочем режиме АД вращающееся магнитное поле статора пересекает обмотку ротора со скоростью

$$n = n_1 - n_2 = (n_1 - n_2)\frac{n_1}{n_1} = n_1 s . \tag{6.6}$$

Частота ЭДС и токов, наводимых этим полем в обмотке ротора, равна

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{pn_1}{60} s = f_1 s . \tag{6.7}$$

Таким образом, частота ЭДС и токов в роторе зависит от скольжения. Так, при s=1 (при пуске) $f_2 = f_1$, при номинальном режиме нагрузки $s_н = (0{,}02\ldots0{,}04)$, и $f_2 = 1\ldots2$Гц.

Протекающие в обмотке ротора токи создают МДС и магнитное поле ротора, которые вращаются относительно ротора со скоростью

$$n_2' = \frac{60 f_2}{p} = \frac{60 f_1}{p} s = n_1 s . \tag{6.8}$$

С учетом (6.5) скорость вращения этого поля относительно неподвижного статора составляет

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$n_2' + n_2 = n_1 s + n_1(1 - s) = n_1, \quad (6.9)$$

т.е. магнитное поле ротора вращается в расточке статора с той же скоростью и в ту же сторону, что и поле статора. Стало быть, они неподвижны друг относительно друга, образуют единое магнитное поле, созданное совместным действием МДС статора и ротора. Таким образом, вектор $\overline{B}_0$ на рисунке. 6.1 необходимо рассматривать как вектор результирующего магнитного поля.

Условие неподвижности друг относительно друга магнитных полей статора и ротора означает, что число пар полюсов обмоток статора и ротора должно быть обязательно одинаково, $p_1 = p_2 = p$, что нашло отражение в соотношениях (6.7) и (6.8). В короткозамкнутом роторе это действие выполняется автоматически, в двигателе с фазным ротором оно должно быть обеспечено при проектировании. В то же время соотношение между числом фаз обмоток статора и ротора может быть произвольным.

Асинхронная машина обратима, т.е. может работать как в двигательном, так и в генераторном режимах. Если ротор с помощью постороннего двигателя разогнать до скорости вращения $n_2 > n_1$, то изменится направление ЭДС и тока в проводниках ротора, изменит свое направление и электромагнитный момент, который станет тормозящим. Асинхронная машина механическую энергию, получаемую от приводного двигателя, преобразует в электрическую и отдает в сеть, т.е. переходит в генераторный режим.

В процессе эксплуатации асинхронного двигателя возможен режим работы при $s > 1.0$, когда ротор вращается в сторону, противоположную направлению вращения поля статора. В этом режиме, называемом режимом электромагнитного торможения (или режимом противовключения), ЭДС и ток в роторе направлены также как в двигательном режиме, однако электромагнитный момент направлен против движения ротора, т.е. является тормозящим. В машине происходит преобразование как электрической энергии, поступающей из сети, так и механической энергии, передаваемой с вала.

6.2. Режимы работы асинхронного двигателя

6.2.1. Режим холостого хода при заторможенном роторе

В этом режиме, когда обмотка статора подключена к сети, обмотка ротора разомкнута, а ротор заторможен, физические процессы в АД полностью подобны процессам в трансформаторе при холостом ходе. Отличие заключается только в том, что обмотки статора и ротора распределены по пазам и сопротивление магнитной цепи АД больше, чем в трансформаторе ввиду наличия достаточно большого (0,5 мм и более) воздушного зазора.

Поэтому ток холостого хода I_o в АД значительно больше, чем в трансформаторе и может достигать 20…40% и даже более от номинального тока. Этот ток вызывает увеличение потерь в обмотке статора и уменьшение коэффициента мощности двигателя. Поскольку тока в роторе в рассматриваемом режиме нет, то и электромагнитный момент $M_{эм}$ равен нулю.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Часть картины вращающегося магнитного поля статора, созданного током холостого хода статора I_o , показана на рисункн 6.2,а.

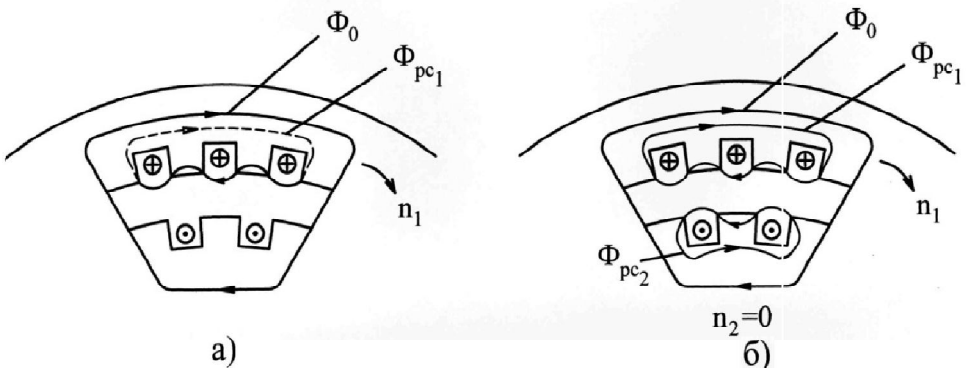


Рисунок 6.2 – Распределение магнитных полей заторможенного асинхронного двигателя при холостом ходе (а) и коротком замыкании (б)

Магнитный поток взаимоиндукции Φ_o сцепляется с обмотками ротора и статора и индуктирует в них ЭДС E_1 и E_2. Поток рассеяния Φ_{pc1} сцепляется только с обмоткой статора и индуктирует в ней ЭДС рассеяния E_{pc1}.

Значения ЭДС E_1 и E_2 равны

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= 4{,}44 f_1 W_1 k_{об1} \Phi_{om} \\ E_2 &= 4{,}44 f_2 W_2 k_{об2} \Phi_{om} \end{aligned}\right\} \qquad (6.10)$$

где Φ_{om} – полный основной магнитный поток; W_1 и W_2 число витков обмотки статора и ротора.

В соотношениях (6.10) имеются ввиду первые гармоники ЭДС статора и ротора.

Поскольку ротор в рассматриваемом режиме неподвижен s=1, то

$$f_2 = f_1 s = f_1.$$

Отношение

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1 k_{об1}}{W_2 k_{об2}} \qquad (6.11)$$

называется коэффициентом трансформации ЭДС АД.

ЭДС рассеяния уравновешивается, как и в трансформаторе, равным по величине падением напряжения

$$\overline{E}_{pc1} = -x_1 \bar{I}_0, \quad \overline{E}_{pc1} = -x_1 \bar{I}_0 \ , \qquad (6.12)$$

где x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора.

Падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора равно

$$\overline{U}_{r1} = r_1 \bar{I}_0.$$

Уравнение равновесия ЭДС цепи статора для холостого хода при неподвижном роторе имеет вид

$$\overline{U}_1 = -\overline{E}_1 + \bar{I}_0 x_1 + \bar{I}_0 r_1 = -\overline{E}_1 + \bar{I}_0 z_1 . \qquad (6.13)$$

Падение напряжения при холостом ходе весьма мало, поэтому можно записать, что

$$\overline{U}_1 \approx -\overline{E}_1 \text{ или } U_1 \approx 4{,}44 f_1 W_1 k_{об1} \Phi_{om}. \qquad (6.14)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Схема замещения обмотки статора в рассматриваемом режиме целиком подобна схеме замещения трансформатора на холостом ходу и представлена на рисунке 6.3(а).

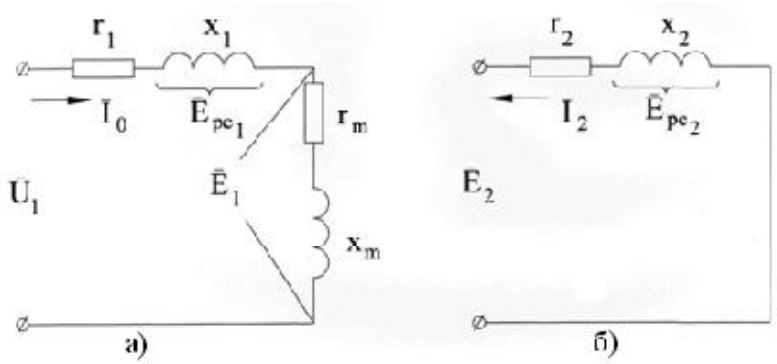


Рисунок 6.3 – Схемы замещения обмотки статора (а) асинхронного двигателя и вторичной цепи (б) при неподвижном роторе

6.2.2. Режим короткого замыкания АД

Если теперь ротор оставить неподвижным, а его обмотку замкнуть, то будет иметь место короткое замыкание АД, подобное короткому замыканию трансформатора. Этот режим имеет место в первый момент пуска АД, когда ротор еще не пришел во вращение. Ток статора АД при коротком замыкании составляет (4…7) $I_н$, поэтому во избежание чрезмерного нагревания и повреждения изоляции обмоток двигатель нельзя длительно оставлять при коротком замыкании под полным напряжением.

Часть картины распределения магнитных полей АД при коротком замыкании показана на рисунок 6.2, (б).

Основной магнитный поток $Φ_o$ создается в этом режиме совместным действием МДС статора F_1 и ротора F_2,

$$F_1 = m_1 \frac{0{,}45 W_1 k_{об1}}{p} I_1;\ F_2 = m_2 \frac{0{,}45 W_2 k_{об2}}{p} I_2,$$

т.е. выполняется равенство

$$m1 W_1 k_{об1} \bar{I}_1 + m_2 W_2 k_{об2} \bar{I}_2 = m_1 W_1 k_{об1} \bar{I}_o, \qquad (6.15)$$

где m_1 и m_2 – число фаз обмотки статора и ротора соответственно, p – число пар полюсов.

Равенство (6.15) можно преобразовать к виду

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \left(-\bar{I}_2 \frac{W_2 k_{об2} m_2}{W_1 k_{об1} m_1} \right) \qquad (6.16)$$

Уравнение (6.16) носит название уравнения равновесия токов и справедливо для любого режима работы АД.

Если величиной тока I_o пренебречь, то будет иметь равенство

$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2 \frac{W_2 k_{об2} m_2}{W_1 k_{об1} m_1}$$

Отношение

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{W_2 k_{об2} m_2}{W_1 k_{об1} m_1} \qquad (6.18)$$

называется коэффициентом трансформации тока.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Магнитный поток рассеяния Φ_{pc2} создает в обмотке ротора ЭДС рассеяния E_{pc2}, величина которой определяется равенством

$$\overline{E}_{pc2} = -\overline{I}_2 x_2 \ , \qquad (6.19)$$

где x_2 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора.

Падение напряжения на активном сопротивлении обмотки ротора равно $I_2 r_2$.

Уравнения равновесия ЭДС для обмоток статора и ротора в этом режиме имеет вид

$$\overline{U}_1 = -\overline{E}_1 + \overline{I}_1 r_1 + \overline{I}_1 x_1$$
$$\overline{E}_2 = \overline{I}_2 r_2 + \overline{I}_2 x_2 \qquad (6.20)$$

Схема замещения вторичной цепи при неподвижном роторе представлена на рисунке 6.3,б.

Ток ротора I_2 определяется из выражения

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} \ . \qquad (6.21)$$

Если в асинхронной машине с заторможенным ротором в цепь обмотки фазного ротора включить сопротивление нагрузки, то ее можно использовать в качестве трансформатора.

6.2.3. Рабочий режим асинхронного двигателя

Если ротор двигателя растормозить, а его обмотку оставить замкнутой, то он будет вращаться со скоростью n_2, всегда меньшей, чем скорость вращения поля статора n_1. Поскольку при этом величина напряжения сети не изменяется, то ЭДС E_1 и магнитный поток Φ_o будут иметь приблизительно те же значения, что и при неподвижном роторе.

Во вращающемся роторе в связи с изменением частоты $f_2 = f_1 s$ изменяются и зависящие от нее величины E_{2s}, x_{2s}, I_{2s}.

Они равны

$$E_{2s} = 4{,}44 f_2 W_2 k_{об2} \Phi_{om} = E_2 s \ , \qquad (6.22)$$
$$x_{2s} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2 = x_2 s, \qquad (6.23)$$

где E_2 и x_2 – соответствуют неподвижному ротору.

Как видно, ЭДС, индуктированная во вращающемся роторе, равна ЭДС неподвижного ротора, умноженной на скольжение. Аналогично, индуктивное сопротивление вращающегося ротора равно индуктивному сопротивлению неподвижного ротора, умноженному на скольжение.

Активное сопротивление ротора АД нормального исполнения мало зависит от частоты, поэтому принимают $r_2 = const$.

Уравнения равновесия ЭДС статора и вращающегося ротора записываются следующим образом

$$\overline{U}_1 = -\overline{E}_1 + \overline{I}_1 r_1 + \overline{I}_1 x_1$$
$$\overline{E}_{2s} = \overline{I}_{2s} r_2 + \overline{I}_{2s} x_2 \ . \qquad (6.24)$$

Эквивалентная схема замещения вращающегося ротора показана на рисунке 6.4(а).

Ток ротора равен

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$I_{2s} = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2{}^2 + (x_2 s)^2}} \qquad (6.25)$$

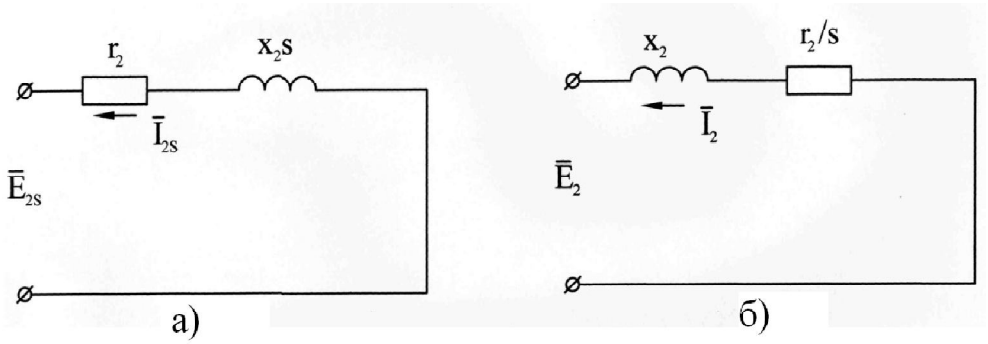


Рисунок 6.4 – Эквивалентная схема замещения ротора

С увеличением нагрузки на валу скольжение s возрастает, так как для создания большего вращающего момента необходимо увеличение тока I_{2S}, для чего должна увеличиться ЭДС $E_{2s} = E_2 s$, индуктируемая во вращающемся роторе. Вместе с током I_{2S} увеличивается ток I_1, увеличиваются падения напряжения на сопротивлениях r_1 и x_1, а следовательно несколько уменьшается ЭДС E_1, магнитный поток Φ_{om} и ток I_{10}.

Однако уменьшение основного потока Φ_{om} при изменении скольжения от $s \approx 0$ до $s_н$ составляет лишь несколько процентов, поэтому при приближенных расчетах при U_1=const принимается также Φ_{om} = const, что и было отмечено в начале данного параграфа.

6.3. Приведение вращающегося ротора к эквивалентному неподвижному ротору. Схема замещения и векторная диаграмма приведенного АД

Анализ режимов работы АД и его расчет значительно упрощаются, если объединить схемы замещения статора (рисунок 6.3,а) и ротора (рисунок 6.4,а) в единую схему замещения и таким образом формально свести явления во вращающемся двигателе к явлениям в неподвижном трансформаторе. Это объединение возможно, если, во-первых, добиться, чтобы частота тока в роторе f_2 была равна частоте f_1, во-вторых, чтобы ЭДС в роторе E_{2S} была равна ЭДС E_1.

Первое условие выполняется путем формального преобразования соотношения (6.25).

Действительно если разделить все члены правой части этого уравнения на скольжение s то оно преобразуется к виду

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2/s)^2 + x_2{}^2}} \quad . \qquad (6.26)$$

По формуле (6.26) ток I_2 зависит от ЭДС E_2 неподвижного ротора, имеющей частоту f_1 питающей сети. Сопротивление x_2 также соответствует неподвижному ротору, т.е. частоте f_1, тогда как активное сопротивление обмотки ротора становится равным r_2/s.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

При таком переходе ток I_2, вычисленный по формуле (6.26), по сравнению с током I_{2S} формулы (6.25) не изменится ни по величине, ни по фазе, но будет иметь частоту питающей сети. В соответствии с этим эквивалентная схема для вращающегося ротора (рисунок 6.4,а), может быть заменена эквивалентной схемой неподвижного ротора (рисунок 6.4,б).

Таким образом, путем формальных преобразований схему замещения вращающегося ротора можно заменить эквивалентной схемой замещения, в которой величины E_2 и x_2 не зависят от скольжения, а изменится лишь параметр r_2/s, учитывающий изменение нагрузки двигателя.

Второе условие достигается путем приведения обмотки неподвижного ротора к обмотке статора, т.е. замены ее такой обмоткой, которая имеет одинаковые с обмоткой статора число фаз, число витков и тот же обмоточный коэффициент. При этом у приведенного ротора, также как и у приведенной вторичной обмотки трансформатора мощности и фазовый угол между векторами $\bar{E}_2'$ и $\bar{I}_2'$ должны оставаться такими же как и до приведения.

Пересчет реальных параметров обмотки ротора на приведенные производится по следующим формулам

$$E_2' = E_1 = k_e E_2; \quad I_2' = I_2/k_i;$$

$$r_2' = k_e k_i r_2; \quad x_2' = k_e k_i x_2. \qquad (6.27)$$

Схема замещения приведенного АД показана на рисунке 6.5.

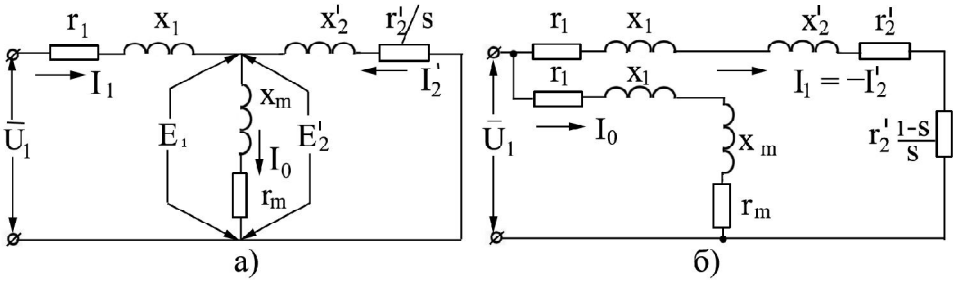


Рисунок 6.5 – Схемы замещения приведенного асинхронного двигателя: а – Т-образная; б – Г-образная

Она подобна схеме замещения приведенного трансформатора. Единственным отличием является зависимость активного сопротивления от скольжения, которое учитывает изменение нагрузки двигателя.

Схему замещения на рисунке 6.5,а называют Т-образной схемой замещения.

Уравнения равновесия ЭДС и токов приведенного АД записывают в виде

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 x_1 + \bar{I}_1 r_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 z_1; \\ \bar{E}_2' &= \bar{I}_2' \frac{r_2'}{s} + \bar{I}_2' x_2' = \bar{I}_2' z_2'; \\ \bar{I}_1 &= \bar{I}_0 + (-\bar{I}_2') \end{aligned} \qquad (6.28)$$

Приведенное активное сопротивление ротора r_2'/s можно представить в виде двух составляющих

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\frac{r_2'}{s} = r_2' + r_2' \frac{1-s}{s} \quad , \qquad (6.29)$$

при этом составляющая $r_2' \frac{1-s}{s}$ учитывает полную механическую мощность на валу двигателя подобно тому, как в трансформаторе сопротивление $z_н'$ определяет полную мощность, передаваемую нагрузке.

В схеме замещения, показанной на рисунке 6,5,а, без большой погрешности можно вынести контур намагничивания с током I_0 на зажимы схемы замещения и получить упрощенную Г-образную схему замещения (рисунок 6.5,б), для которой справедливо соотношение

$$I_1 \approx I_2' \approx \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2}} \quad .(6.30)$$

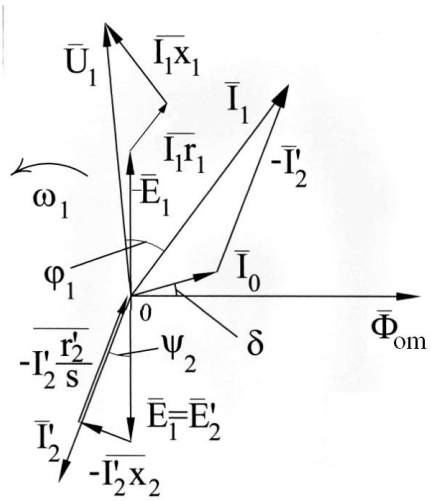


Рисунок 6.6 – Векторная диаграмма приведенного асинхронного двигателя

Замена реального вращающегося ротора эквивалентным ему неподвижным с приведенной обмоткой приводит к возможности изображения статорных и роторных величин на одной векторной диаграмме приведенного АД, представленной на рисунке 6.6.

Эта векторная диаграмма является графическим решением уравнений (6.28).

Порядок построения:

1. Отложить вправо от центра 0 по горизонтали вектор основного магнитного потока взаимоиндукции $\bar{\Phi}_{om}$ в произвольном масштабе. По вертикали вниз, то есть под углом 90° к вектору $\bar{\Phi}_{om}$, провести направление векторов ЭДС $\bar{E}_1 = \bar{E}_2'$, а вверх по вертикали направление вектора $-\bar{E}_1$.

2. Из начала координат под углом $\delta = arctg \frac{r_m}{x_m}$ к вектору $\bar{\Phi}_{om}$ в сторону опережения отложить вектор тока холостого хода $\bar{I}_0$ в принятом масштабе токов.

3. Имея в виду, что параметры r_2' и x_2' могут быть рассчитаны или определены опытным путем, а скольжение s – задано, необходимо через начало координат под углом $\Psi_2 = arctg \frac{x_2}{\left(r_m / s\right)}$

к вертикальной оси отложить вектор тока $\bar{I}_2'$ и затем векторы падений напряжения $\bar{I}_2' r_2' / s$ и $\bar{I}_2' x_2'$, геометрическая сумма которых определяет величину вектора $\bar{E}_2' = \bar{E}_1$.

4. Сложить геометрически векторы $\bar{I}_0$ и $-\bar{I}_2'$, определив тем самым величину и положение вектора $\bar{I}_1$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

5. Радиусом $|E_2'|$ сделать засечку на вертикальной оси вверх от центра О и определить величину вектора $-\bar{E}_1$. Из конца этого вектора отложить вектор падения напряжения на активном сопротивлении $\bar{I}_1 r_1$, (в фазе с током $\bar{I}_1$) и прибавить к нему вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния $\bar{I}_1 x_1$ (с опережением вектора тока $\bar{I}_1$ на угол $\frac{\pi}{2}$). Геометрическая сумма всех векторов определит величину и положение вектора первичного напряжения $\overline{U_1}$.

Угол φ_1 между векторами тока $\bar{I}_1$ и напряжения $\overline{U_1}$ определяет коэффициент мощности, а значит и активную мощность двигателя при заданном скольжении и параметрах обмоток статора и ротора. В частности, активная мощность

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1 \qquad (6.3I)$$

при этом положительна, что соответствует потреблению ее из сети.

Векторная диаграмма позволяет наглядно представить физические процессы и соотношения в асинхронной машине при различных режимах их работы, провести анализ, в чем можно будет убедиться при анализе электромагнитного момента АД. Практическое применеие она находит при построении так называемых круговых диаграмм.

6.4. Энергетическая диаграмма и механическая характеристика асинхронного двигателя

6.4.I Энергетическая диаграмма. Коэффициент полезного действия АД

Преобразование энергии и потери в АД наглядно иллюстрирует энергетическая диаграмма, которая изображается в виде потока энергии с ответвлениями, символизирующими те или иные потери (рисунок 6.7).

АД потребляет из сети мощность $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1$.

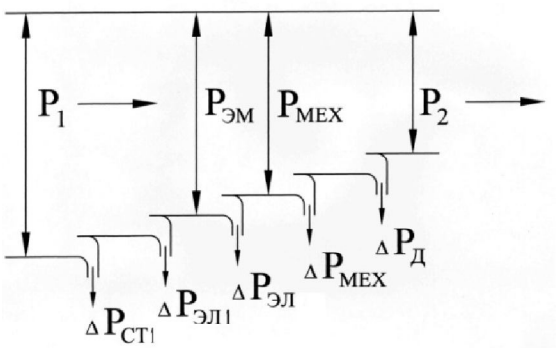


Рисунок 6.7 - Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Часть этой мощности расходуется на покрытие магнитных потерь в сердечнике статора на гистерезис и вихревые токи $\Delta P_{СТ1}$.

Поскольку в рабочем режиме частота перемагничивания ротора мала, то потерями в стали ротора обычно пренебрегают. Кроме того, необходимо учитывать электрические потери в обмотке статора, которые равны

$$\Delta P_{эл1} = 3I_1^2 r_1 . \qquad (6.32)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Оставшаяся часть мощности передается через воздушный зазор в ротор электромагнитным путем и поэтому называется электромагнитной мощностью

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{ст1} + \Delta P_{эл1}. \quad (6.33)$$

На основании схемы замещения приведенного АД электромагнитная мощность, передаваемая в ротор, может быть записана выражением

$$P_{эм} = 3E'_2 I'_2 \cos\Psi_2 \quad (6.34)$$

или

$$P_{эм} = 3I'^2_2 \frac{r'_2}{s}. \quad (6.35)$$

Часть электромагнитной мощности расходуется в виде электрических потерь в обмотке ротора

$$\Delta P_{эл2} = 3I'_2 r'_2. \quad (6.36)$$

Исходя из формулы (6.35), эти потери могут быть записаны также через мощность $P_{эм}$ и скольжение s

$$\Delta P_{эл2} = P_{эм} s, \quad (6.37)$$

т.е. электрические потери в обмотке ротора пропорциональны скольжению.

Оставшаяся часть электромагнитной мощности преобразуется в полную механическую мощность АД

$$P_{мех} = P_{эм} - \Delta P_{эл2} = 3I'^2_2 r'_2 \frac{1-s}{s}. \quad (6.38)$$

Полезная механическая мощность на валу АД меньше мощности $P_{мех}$ на величину механических $\Delta P_{мех}$ и добавочных $\Delta P_{доб}$ потерь

$$P_2 = P_{мех} - (\Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}). \quad (6.39)$$

Механические потери обусловлены трением в подшипниках и трением вращающихся частей о воздух. Добавочные потери вызваны наличием в двигателе магнитных полей рассеяния и полей высших гармоник.

Коэффициент полезного действия АД определяется отношением полезной мощности на валу к мощности, потребляемой им из сети, т.е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum\Delta P}{P_1}, \quad (6.40)$$

где $\sum\Delta P = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}$.

6.4.2. Вращающий момент АД

Электромагнитный вращающий момент $M_{эм}$АД создается в результате взаимодействия проводников с током обмотки ротора и вращающегося с угловой скоростью $\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$ магнитного потока. Величина этого момента определяется из соотношения

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = P_{эм} \frac{60}{2\pi n_1} = P_{эм} \frac{p}{2\pi f_1}. \quad (6.41)$$

где $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$.

С учетом формул (6.35) и (6.30) имеем

$$M_{эм} = \frac{3p(I'^2_2) r'_2/s}{2\pi f_1} \quad (6.42)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

или

$$M_{эм} = \frac{3p(U_1^2)r'_2/s}{2\pi f_1\left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]}. \qquad (6.43)$$

Таким образом, вращающий электромагнитный момент АД пропорционален квадрату подводимого к двигателю напряжения фазы, зависит от скольжения и параметров статора и ротора.

В соответствии с векторной диаграммой (рисунок 6.6) для вторичной цепи справедливо соотношение

$$I'_2 \frac{r'_2}{s} = E'_2 \cos\Psi_2.$$

Поскольку $E'_2 = 4.44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_{om}$ формула (6.42) для вращающего момента может быть записана в виде

$$M_{эм} = c_м \Phi_{от} I'_2 \cos\Psi_2, \qquad (6.44)$$

где $c_м = \frac{3}{\sqrt{2}} w_1 k_{об1} p_1$ постоянный коэффициент.

Из (6.44) следует, что вращающий момент АД пропорционален активной составляющий тока ротора $I'_2 \cos\Psi_2$ и магнитному потоку пары полюсов $\Phi_{от}$.

Напоминаем здесь соотношение для электромагнитного момента машины постоянного тока $M_{эм} = C_м \Phi I_a$ (6.44,а)

6.4.3. Механическая характеристика АД

Механической характеристикой АД называется зависимость $M = f(s)$, построенная при $U_1 = const$, $f_1 = const$ и при условии, что параметры r_1, r'_2, x_1, x'_2 при изменении скольжения s не меняются.

Проанализируем зависимость $M = f(s)$ для момента включения АД в сеть, когда s =1,0.

При s =1,0 АД развивает пусковой момент, равный

$$M_п = \frac{3pU_1^2 r'_2}{2\pi f_1\left[(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]}, \qquad (6.45)$$

откуда следует, что пусковой момент АД зависит от подводимого напряжения во второй степени и соотношения параметров $r_1 + r'_2 = r_k$ и $x_1 + x'_2 = x_k$.

Если момент при пуске больше момента сопротивления, то ротор АД начнет вращаться и скольжение уменьшается. Так как обычно $x_k > r_k$ то при уменьшении s одновременно увеличиваются и числитель и знаменатель формулы (6.43). Сначала, при больших s, преобладающее значение имеет числитель, вследствие чего $M_{эм}$ растет, а затем, при скольжениях $s_{кр} = 0{,}2\ldots0{,}12$ преобладающее значение получает знаменатель, куда параметр r'_2/s входит в квадрате. Момент $M_{эм}$, достигнув максимального значения M_{max} при $s_{кр}$ начнет уменьшаться и при s = 0 становится равным нулю.

Формула (6.43) справедлива для любого режима работы АД. При переходе в генераторный режим работы скольжение меняет знак на обратный (s < 0), соответственно чему момент $M_{эм}$ становится отрицательным, т.е. тормозящим.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Механическая характеристика асинхронной машины показана на рисунке 6.8. В соответствии с изложенным участок кривой в диапазоне $0 \leq s \leq 1{,}0$ соответствует двигательному режиму работы, а при $s < 0$ машина работает в режиме генератора. Когда $s > 1{,}0$, ротор вращается против направления вращения поля статора. Этот режим называют режимом противовключения или электромагнитного торможения.

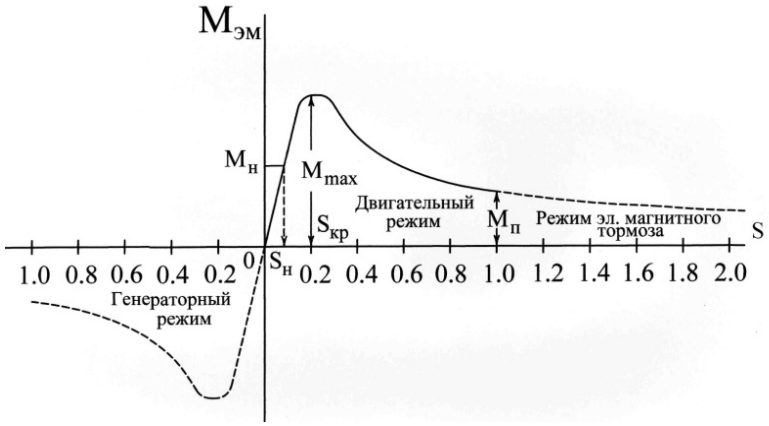


Рисунок 6.8 – Механическая характеристика асинхронной машины

Для того, чтобы найти величину критического скольжения $s_{кр}$, при котором электромагнитный момент достигает наибольшего значения, необходимо решить уравнение $\frac{dM_{эм}}{ds} = 0$. После упрощения получаем выражение

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_к^2}} \quad . \tag{6.46}$$

Здесь знак (+) – соответствует двигательному режиму, а знак (-) – генераторному. Так как $r_1^2 \ll x_к^2$, то им можно пренебречь и соотношение для $s_{кр}$ записывается в виде

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r_2'}{x_к} \quad . \tag{6.47}$$

Подставляя выражение для $s_{кр}$ в формулу (6.43), находим величину M_{max}

$$M_{\max} = \pm \frac{3pU_1{}^2}{4\pi f_1 \left(\pm r_1 \sqrt{r_1{}^2 + x_k{}^2} \right)} \quad , \tag{6.48}$$

или приближенно

$$M_{\max} = \pm \frac{3pU_1{}^2}{4\pi f_1 x_k} \quad . \tag{6.49}$$

Из выражений (6.48) и (6.49) следует, что максимальный момент M_{max}:

- при заданной частоте и заданных параметрах двигателя пропорционален квадрату напряжения U_1^2;
- не зависит от активного сопротивления ротора r_2';
- при заданной частоте тем меньше, чем больше индуктивные сопротивления рассеяния $x_1 + x_2' = x_к$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Критическое скольжение $s_{кр}$ тем больше, чем больше сопротивление обмотки ротора r_2'.

Эти выводы имеют очень важное значение для анализа поведения АД при различных режимах работы.

Номинальный режим работы АД на механической характеристике определяется точкой с координатами $M_н$ (номинальный момент) и $s_н$ (номинальное скольжение) (рисунок 6.8) .

6.4.4. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от сопротивления цепи ротора

Выше было показано, что величина M_{max} не зависит от активного сопротивления r_2', а критическое скольжение пропорционально r_2'.

Таким образом, при изменении сопротивления ротора r_2' изменяется вид механической характеристики АД.

Конечно, изменять сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора в процессе эксплуатации АД не представляется возможным. Это сопротивление изменяется только в определенных пределах при изменении скольжения и соответствующего изменения частоты тока в обмотке ротора, что связано с эффектом вытеснения. Только при изготовлении ротора для короткозамкнутой обмотки могут быть использованы материалы с различными удельными сопротивлениями в зависимости от назначения двигателя.

Добавочное активное сопротивление $r_д$ можно вводить в цепь ротора АД с контактными кольцами. На рисунке 6.9 показано семейство кривых $M_{эм} = f(s)$ при различных значениях $r_д$ в цепи обмотки фазного ротора. Кривая I соответствует величине $r_д = 0$ и называется естественной механической характеристикой. Кривая 3 может быть получена при такой величине $r_д$, при которой выполняется условие $r_2' + r_{д2}' = x_к$, а следовательно, при пуске двигатель развивает максимальный момент. Кривая 2 соответствует промежуточному значению добавочного сопротивления, $0 < r_{д1} < r_{д2}$.

Из рисунка 6.9 следует, что введение в цепь фазного ротора добавочного сопротивления увеличивает пусковой момент $M_п$. При этом в соответствии с (6.30) одновременно снижается пусковой ток $I_п$.

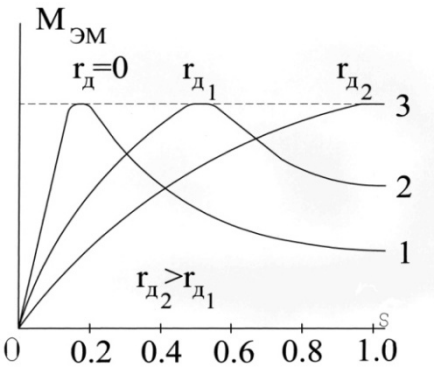


Рисунок 6.9 -- Характеристики M = f(s) при различных значениях сопротивления цепи ротора

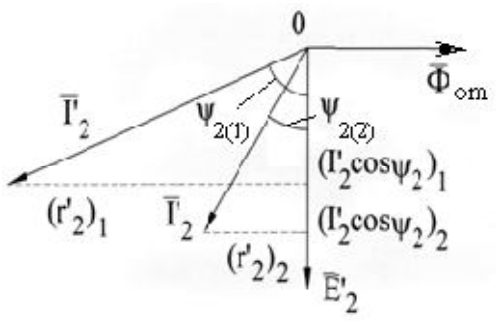


Рисунок 6.10 - Векторная диаграмма при различных значениях сопротивления цепиротора

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Рассмотренное влияние сопротивления ротора r_2' на вид механической характеристики легко пояснить при помощи векторной диаграммы рисунок (6.10).

При увеличении сопротивления ротора от $(r_2')_1$ до $(r_2')_2 < x_k$ уменьшается угол сдвига по фазе между током I_2' и ЭДС E_2' и $tg\,\Psi_2 = \frac{r_2}{x_2'}$ растет. Несмотря на уменьшение общего тока I_2', его активная составляющая $I_2' \cos\Psi_2$, входящая в формулу (6.44), увеличивается, вследствие чего вращающий момент растет.

6.5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Номинальные данные АД, указанные на заводской табличке, не всегда дают полное представление об эксплуатационных свойствах машины. Кроме этих сведений необходимо знать рабочие характеристики, к которым относят зависимости скорости вращения n_2, вращающего момента $M_{эм}$, КПД η и коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ от полезной мощности P_2 при неизменных напряжении сети и ее частоте f_1. Часто вместо зависимости $n = f(P_2)$ строят кривую $s = f(P_2)$

Кроме того, к важным показателям АД относят коэффициент перегрузочной способности k_m, а для короткозамкнутых двигателей коэффициенты кратности пускового тока k_i и пускового момента $k_м$.

Рабочие характеристики АД обычного исполнения показаны на рисунке 6.11.

Скольжение двигателя численно может быть определено отношением

$$S = \frac{\Delta P_{эл2}}{P_{эм}} \qquad (6.50)$$

в соответствии с формулой (6.37).

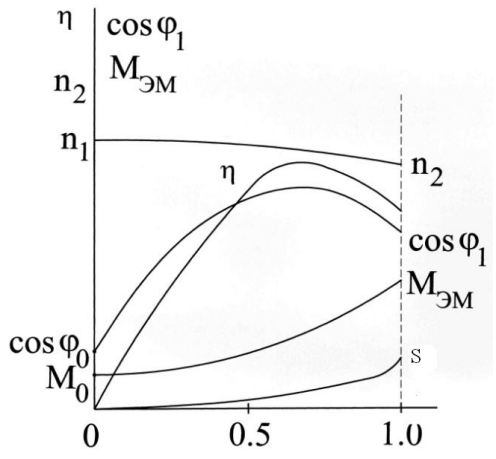


Рисунок 6.11 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

При холостом ходе потери $\Delta P_{эл2}$ очень малы и $s \approx 0$. Скорость вращения ротора при этом $n_2 \approx n_1$.

Для получения достаточно высокого КПД АД потери в роторе должны быть такими, чтобы при номинальной нагрузке скольжение не превышало 1….4%.

Скорость вращения ротора определяется соотношением (6.5) и зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абцисс. Поэтому скоростную характеристику АД называют жесткой.

Зависимость $M_{эм} = f(P_2)$, называемая моментной характеристикой, почти прямолинейна, так как скорость вращения ротора при

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

изменении нагрузки от холостого хода до номинальной остается почти постоянной.

При установившемся режиме работы вращающий момент равен

$$M_{эм} = M_2 + M_0, \quad (6.51)$$

где M_2 – полезный момент, определяемый исполнительным механизмом; M_0 – момент холостого хода.

Коэффициент мощности cosφ АД всегда меньше единицы, так как двигатель потребляет из сети значительный намагничивающий ток I_μ, почти не зависящий от нагрузки. При холостом ходе $\cos\varphi_1$ обычно не превышает 0,2, но по мере увеличения нагрузки довольно быстро растет и достигает наибольшего значения при мощности, близкой к номинальной. Значения $\cos\varphi_1$ обычных АД находятся в пределах 0,75….0,85, причем большие значения $\cos\varphi_1$ относятся к АД большей мощности.

Кривая $\eta = f(P_2)$ имеет типичный для электрических машин вид, КПД достигает наибольшего значения примерно при 75% номинальной нагрузки.

КПД современных АД при номинальной нагрузке составляет 80…95%, причем большие значения относятся к машинам большей мощности.

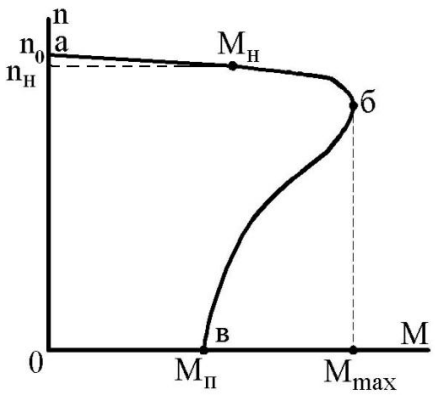


Рисунок 6.12 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

К рабочим характеристикам АД относят также механическую характеристику, которую часто выражают в виде зависимости $n = f(M_{эм})$. Эта характеристика показана на рисунке 6.12.

Отношение $\kappa_м = \frac{M_{max}}{M_н}$ (6.52)

называется перегрузочной способностью и составляет 1,6….2,5 в зависимости от мощности двигателя. В двигателях специального исполнения $\kappa_м$ достигает 2,8….3,0 и более.

Коэффициент $\kappa_П = \frac{M_П}{M_н}$ (6.53)

называется кратностью пускового момента. Значение $\kappa_П$ составляет 0,8….1,7.

Под кратностью пускового тока АД κ_I понимают отношение

$$\kappa_I = \frac{I_П}{I_н}. \quad (6.54)$$

Эта величина лежит в пределах 5….7,0.

6.6. Проблемные режимы работы судовых асинхронных двигателей

К проблемным режимам работы АД относятся пуск, обрыв фазы, реверс АД и работа с «вывернутой фазой».

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

6.6.1. Проблемы пуска АД

Пусковые свойства асинхронного двигателя определяются зависимостями вращающего момента и тока от частоты вращения. К этим свойствам относятся и другие показатели - длительность пуска, потери энергии в обмотках и их нагрев. Для уменьшения времени пуска, потерь энергии в обмотках двигателя и их нагрева стремятся к увеличению пускового момента и снижению пускового тока.

Величина пускового тока не должна быть выше определённых для данной сети значений; большой ток при пуске мощных двигателей может вызвать значительные провалы напряжения судовой сети, а это отрицательно сказывается как на условиях пуска самого двигателя, так и на устойчивости работы других потребителей, подключённых к судовой сети. В некоторых неблагоприятных условиях, особенно при пуске от генератора соизмеримой мощности, из-за значительного снижения напряжения запуск двигателя может оказаться вообще невозможным.

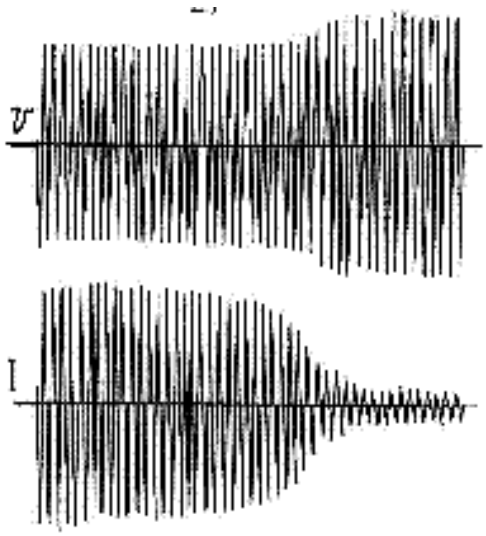


Рисунок 6.13 – Изменение тока и напряжения сети при пуске АД

Большие пусковые токи могут создавать опасные электродинамические усилия в лобовых частях обмотки статора и стержнях беличьей клетки; электромагнитные переходные моменты, возникающие при переходных процессах, достигают при пуске I0…15-ти кратного значения статического начального пускового момента, что наряду с большими температурными напряжениями ограничивает срок службы асинхронных двигателей и может привести к перегоранию обмоток статора или выплавлению клетки ротора.

В первый момент пуска, когда n = 0 и s = 1, в обмотке ротора вследствие большой частоты ($f_2 = f_1$) индуктируется ЭДС такой величины, что пусковой ток в 5…7 раз больше номинального значения (рисунок 6.13). Однако коэффициент мощности цепи ротора при пуске мал и поэтому пусковой вращающий момент АД не превышает, как правило, 0,9…1,2 от номинального.

Статический вращающий момент АД, принимаемый в расчетах, во всех случаях пропорционален квадрату напряжения, что приводит к существенному снижению момента и затрудняет пуск АД отдельных судовых электроприводов со значительным маховым моментом, или большим моментом сопротивления исполнительного механизма. Реальный вращающий момент АД в переходных режимах имеет знакопеременный характер, что приводит к дополнительным потерям энергии, повышает нагрев и затрудняет пусковую операцию (рисунок 6.14). В практике эксплуатации судовых ЭП имели место случаи массового выхода из строя АД грузоподъемных и якорно-швартовных механизмов, пожарных насосов, компрессоров и др. из-за выплавления клетки ротора.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

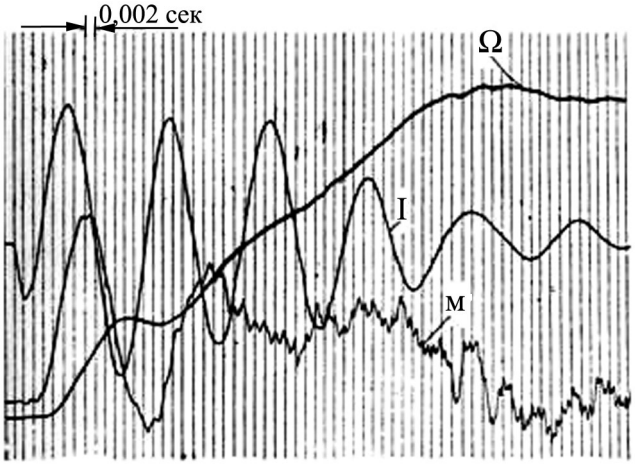


Рисунок 6.14 – Осциллограммы процесса пуска АД

6.6.2. Способы пуска судовых АД

Прямой пуск. На современных судах весьма распространенным является прямой пуск АД. При малом моменте сопротивления и малой инерционности исполнительного механизма скорость АД при прямом пуске быстро возрастает и ток падает до установившихся значений. В этих условиях большой пусковой ток не представляет опасности для АД, так как при малой длительности пуска (менее одной секунды) и редких пусках он не вызывает перегрева обмоток.

В то же время прямой пуск АД не применяется в электроприводах с частыми пусками и в установках с редкими, но тяжелыми условиями пуска. В этих случаях требуется применение специальных средств увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока.

Пуск переключением со звезды на треугольник. Улучшение условий пуска возможно либо изменением сопротивления в цепи обмотки ротора, либо уменьшением фазного напряжения. Одним из вариантов второго способа является пуск переключением со «звезды» на «треугольник», сущность которого заключается в следующем.

В момент пуска статорную обмотку двигателя, включаемую в нормальном режиме работы по схеме «треугольник», включают с помощью переключателя на «звезду», а затем, когда ротор разгонится до некоторой скорости, переключают на «треугольник».

Сравнивая этот способ с прямым пуском по схеме «треугольник», можно видеть, что он дает меньшие броски тока. Действительно, если $U_л$ – линейное напряжение сети, а $Z_к$ – полное сопротивление фазы обмотки двигателя, то при пуске «звездой» напряжение на зажимах фазы и пусковой линейный ток равны

$$U_{\phi Y} = \frac{U_л}{\sqrt{3}}; \quad I_{лY} = I_{\phi Y} = \frac{U_л}{\sqrt{3}Z_к}.$$

При пуске «треугольником» справедливы соотношения

$$U_{\phi\Delta} = U_л; \quad I_{л\Delta} = \sqrt{3}\, I_{\phi\Delta} = \sqrt{3}\frac{U_л}{Z_к}.$$

Отсюда видно, что

$$I_{лY} = \frac{I_{л\Delta}}{3},$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

т.е. пусковой ток при пуске по схеме «звезда» уменьшается в три раза.

С другой стороны, поскольку пусковой момент $M_п$ пропорционален квадрату фазного напряжения, то для моментов можно записать

$$M_{n\text{Y}} = kU_{\phi\text{Y}}^2 = k\frac{U_л^2}{3}; \qquad M_{n\Delta} = kU_{\phi\Delta}^2 = kU_л^2,$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Отсюда очевидно соотношение

$$M_{n\text{Y}} = \frac{M_{n\Delta}}{3},$$

т.е. вращающий момент при пуске по схеме «звезда» также уменьшается в три раза по сравнению с пусковым моментом по схеме «треугольник».

Таким образом, при пуске по схеме «звезда» – «треугольник» за счет снижения подводимого к фазе обмотки статора напряжения уменьшается не только пусковой ток, но и пусковой момент. Это является серьезным недостатком данного способа, который, как и другие способы с понижением подводимого напряжения, применяют лишь при пуске двигателей с небольшим моментом сопротивления на валу.

Пуск АД с фазным ротором. Двигатели с фазным ротором применяются в тех случаях, когда требуется высокий пусковой момент при малом пусковом токе или когда требуется регулирование скорости вращения в широких пределах. Этот эффект в таком двигателе достигается путем включения в цепь ротора добавочного активного сопротивления (реостата). Сущность физических процессов при увеличении активного сопротивления ротора была рассмотрена выше (рисунок 6.10).

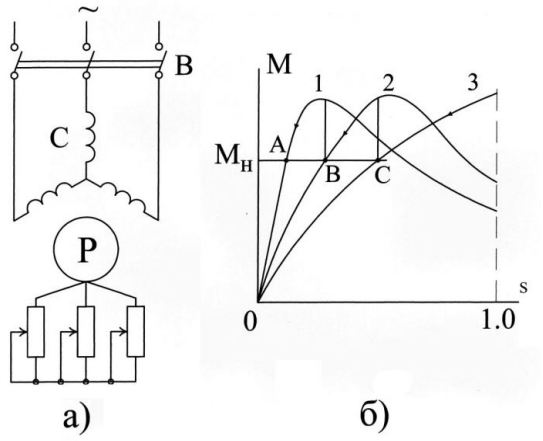


Рисунок 6.15 – Пуск АД с фазным ротором: а – схема пуска; б – механические характеристики

Схема включения в цепь ротора пусковых реостатов показана на рисунке 6.15, а. Семейство механических характеристик АД при различных сопротивлениях ротора и при $M_c = M_п = const$ представлены на рисунке 6.15, б.

Пуск АД по схеме 6.15, а, осуществляется включением выключателя В при полностью введенном пусковом реостате. Его сопротивление подбирается таким образом, чтобы при пуске двигатель развивал максимально возможный момент. При этом механическая характеристика АД соответствует кривой 3 на рисунке 6.15, б.

Если $M_c < M_н$, то двигатель разгоняется до тех пор пока наступит равновесие между тормозным и вращающим моментами (точка С). Если теперь уменьшить добавочное сопротивление (вывести одну ступень пускового реостата), то механическая характеристика двигателя изменится и будет соответствовать кривой 2.

Поскольку электромагнитный вращающий момент возрос, то АД снова будет разгоняться до новой точки равновесия моментов

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

(точка В) при меньшем скольжении s. Если теперь полностью вывести пусковой реостат, то двигатель перейдет на естественную механическую характеристику I. Точка "А" является точкой установившегося режима работы АД.

Обычно пусковой ток поддерживается, по возможности, неизменным и равным $I_п = (1,5…2,5)I_н$.

Пусковые реостаты изготовляются трехфазными из металлической проволоки или ленты повышенного удельного сопротивления (нихром, фехраль).

Следует иметь в виду, что ступени пусковых реостатов рассчитаны на кратковременный режим работы и оставлять их включенными в цепь ротора на длительное время запрещается во избежание выхода из строя. К недостаткам АД с фазным ротором следует отнести их сложность и меньшую надежность по сравнению с короткозамкнутыми АД.

6.6.3. Применение АД с улучшенными пусковыми характеристиками

Пусковые характеристики двигателей тесно связаны с конструкцией ротора и их улучшение находится под постоянным вниманием специалистов, занимающихся асинхронным электроприводом. Как показано выше, наиболее благоприятные условия пуска (большой момент при налом токе) имеют двигатели с фазным ротором при введении пускового реостата в цепь ротора. Однако, эти двигатели значительно сложнее и дороже короткозамкнутых, а применение пускового реостата усложняет установку и её обслуживание.

В короткозамкнутых асинхронных двигателях общего назначения паз ротора, как правило, имеет овальное сечение и заливается алюминием под давлением. Известно, что такие обмотки не всегда могут обеспечить требуемые пусковые характеристики, особенно при тяжёлых условиях пуска двигателей или частых пусках. Дело в том, что широко применяемый метод заливки клетки ротора наряду с известными положительными качествами обладает и некоторыми недостатками, которые приводят к снижению надёжности двигателя. Во-первых, при заливке клетки возможно образование трещин, пустот и разрывов стержней (рисунок 6.16).

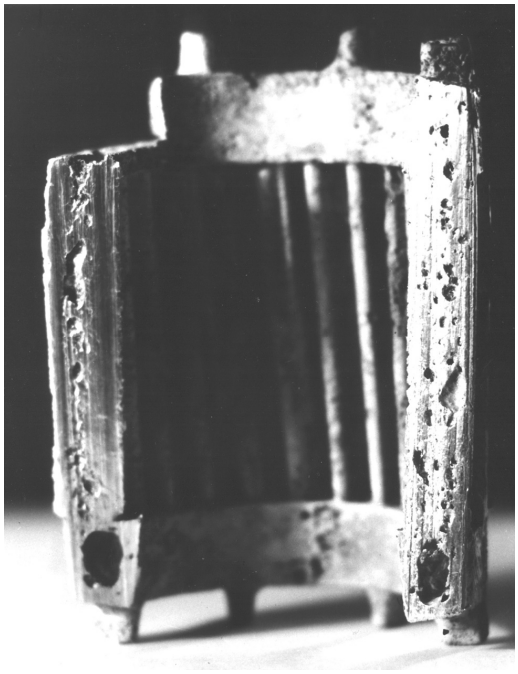


Рисунок 6.16 - Разрез беличьей клетки короткозамкнутого ротора АД

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Во- вторых, места соединения стержней с короткозамыкающими кольцами представляют собой резкие переходы от тонких стержней к более толстым кольцам и именно в этих местах в процессе эксплуатации часто наблюдаются обрывы стержней. Кроме того, расплавленный алюминий замыкает листы сердечника, что приводит к увеличению потерь в стали и снижению КПД двигателя.

Роторы двигателей большой мощности имеют сварные клетки из алюминиевых или медных стержней. Такие роторы могут оказаться недостаточно надёжными в эксплуатации, особенно при большом числе пусков, что связано чаще всего с разрывами соединений между стержнями и короткозамыкающими кольцами.

Поэтому, с целью улучшения пусковых свойств, применяются роторы специального исполнения: с литой двойной клеткой, с обычной клеткой и заливкой сплавами алюминия с большим удельным электрическим сопротивлением, со сварной двойной клеткой и различными материалами клеток и т.д.

В этих конструкциях реализуетя эффект вытеснения тока в пазах ротора, проявляющийся тем сильнее, чем больше частота поля (и тока) в роторе $f_2 = f_1 \cdot s$, (т.е. при пусках, реверсах и торможениях), и чем больше отношение высоты паза $h_п$ к его ширине $в_п$. Картины распределения поля рассеяния и распределение плотности тока по высоте глубокого паза при большом скольжении (при пуске) показаны на рисунке 6.17.

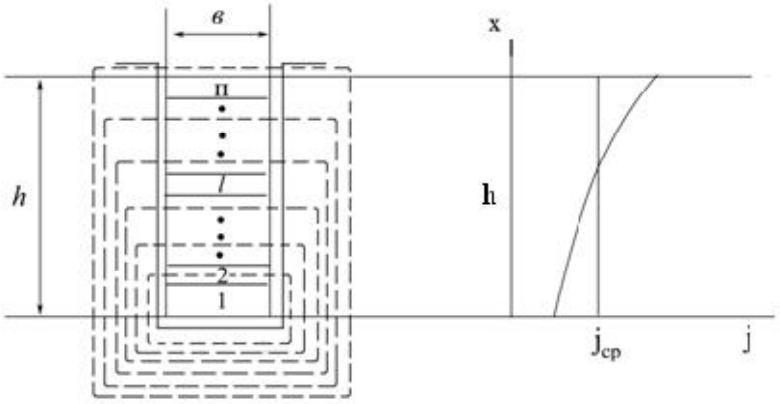


Рисунок 6.17 – К действию эффекта вытеснения

Как видно, при большой частоте нижние элементы стержня ротора охватываются максимальным числом линий магнитного поля, имеют наибольшие индуктивности L и наибольшие значения сопротивлений $x_L = \omega L$, поэтому ток в стержне вытесняется к поверхностным слоям стержня, его общее сопротивление увеличивается, а плотность тока j распределеяется по кривой рисунка 6.17, б.

Активное и индуктивное сопротивления ротора с учетом вытеснения рассчитываются по соотношениям

$$r_2' = k_r r_{2п}' + r_{2л}'; \qquad x_2' = k_x x_{2п}' + x_{2л}',$$

где k_r и k_x зависят от величины относительной высоты паза h^* (рисунок 6.17), индекс «п» обозначает пазовую часть стержня, а индекс «л» - его лобовую часть.

$$h^* = \frac{h_п}{h_{пр}}, \quad h_{пр} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_r \mu_o \omega s}},$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

где ρ и μ - удельное сопротивление и магнитная проницаемость, ω – угловая частота, s-скольжение.

Подобные же процессы имеют место и в двигателях с двойной беличьей клеткой, причем в них для усиления рассматриваемого эффекта верхняя (пусковая) клетка выполняется относительно меньшего сечения из материала с повышенным сопротивлением, а нижняя (рабочая) имеет большее сечение и меньшее удельное сопротивление, так что при пуске ток ротора вытесняется в верхнюю пусковую клету и общее активное сопротивление клетки получается завышенным по сравнению с рабочим режимом, когда эффект вытеснения спадает и в работу включается нижняя клетка.

Двигатели, имеющие роторы с двойной клеткой и с глубоким пазом, развивают повышенный начальный пусковой момент при относительно меньшем начальном пусковом токе. Добротность пуска $D_{\text{П}}$, равная отношению $k_{\text{мп}}/k_{i\text{п}}$ у этих двигателей в среднем в 1,5 раза выше, чем у двигателя, в обмотке ротора которого эффект вытеснения отсутствует (рисунок 6.19).

Однако полностью проблемы пуска асинхронных двигателей применение роторов с двойной клеткой или с глубоким пазом не решает. Кроме того, из-за увеличения пазового рассеяния ротора, эти двигатели имеют меньший коэффициент мощности (на 4…6%) при номинальной нагрузке и меньшую перегрузочную способность $M_{max}/M_{\text{н}}$ (на 15…25%) по сравнению с двигателем, в короткозамкнутой обмотке которого отсутствует эффект вытеснения.

Одним из перспективных конструктивных решений является асинхронный трехфазный двигатель с массивным ферромагнитным или двухслойным ротором. Известны специфические качественные показатели асинхронного двигателя с массивным ротором – хорошие пусковые характеристики, практически отсутствие зубцовой пульсации вращающего момента, высокое электрическое сопротивление роторной цепи. Однако эти двигатели имеют сравнительно низкие энергетические показатели (cosφ и η)при номинальной нагрузке. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором представляют собой модификацию асинхронного двигателя с массивным ротором и имеют по сравнению с ними приемлемые потери при номинальной мощности и сохраняют хорошие пусковые свойства.

Двухслойный ротор представляет собой полый массивный ферромагнитный цилиндр, выполненный из материала с оптимальным значением магнитной проницаемости, насаженный на цилиндр, набранный из листов обычной электротехнической стали, у которой магнитная проницаемость значительно больше магнитной проницаемости материала цилиндра (рисунок 6.18).

Толщина массивного цилиндра приблизительно равна высоте зубца обычного короткозамкнутого ротора. В области больших скольжений электромагнитные процессы в двухслойном роторе не отличаются от электромагнитных процессов в массивном роторе.

Это объясняется тем, что при больших скольжениях глубина проникновения электромагнитной волны в тело ротора меньше толщины массивного цилиндра (рисунок 6.18,б).

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

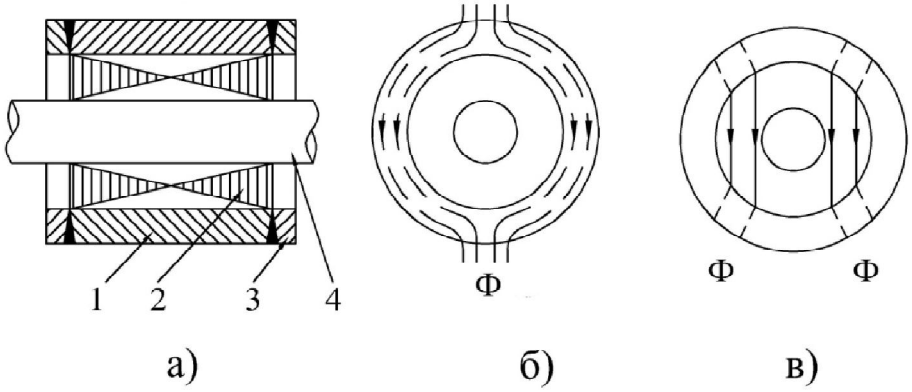


Рисунок 6.18 – Конструкция двухслойного ротора асинхронного двигателя: 1 – рабочий цилиндр; 2 – шихтованный сердечник; 3 – короткозамыкающее кольцо; 4 – вал.

В этом случае в шихтованный цилиндр магнитное поле не проникает и он не оказывает влияния на работу двигателя. Следовательно, двигатель с двухслойным ротором, как и двигатель с массивным ротором, будет иметь большой начальный пусковой момент при малом начальном пусковом токе, а также малые потери энергии при пуске.

В области малых скольжений, эффект вытеснения снижается, глубина проникновения электромагнитной волны в тело ротора станет больше толщины массивного цилиндра, работа электродвигателя с двухслойным ротором будет отличаться от работы двигателя с массивным ротором (рисунок 6.18,в). Основное магнитное поле в этом случае будет смещено в шихтованную часть, так как магнитное сопротивление ее много меньше, чем магнитное сопротивление массивного рабочего цилиндра. Вследствие этого в массивном цилиндре возрастет нормальная составляющая и уменьшится тангенциальная составляющая магнитной индукции. Увеличение нормальной составляюшей магнитной индукции основного магнитного поля приведет к увеличению ЭДС в массивном цилиндре и, следовательно, вращающего момента двигателя при прочих равных условиях, жесткость механической характеристики возрастает, что приводит к повышению КПД двигателя.

Уменьшение тангенциальной составляющей магнитной индукции основного поля в массивном цилиндре, обусловленное вытеснением поля из области с большим магнитным сопротивлением в область с малым магнитным сопротивлением, приводит к уменьшению намагничивающего тока и, следовательно, к увеличению $\cos\varphi$.

Для сравнительной оценки на рисунке 6.19 приведены механические характеристики асинхронного двигателя с различными роторами. Замена ротора с двойной клеткой двухслойным приводит примерно при том же начальном пусковом токе к увеличению начального пускового момента в среднем в 2,5 раза. Добротность пуска двигателя с двухслойным ротором выше в 2…2,5 раза добротности пуска двигателя с двойной клеткой или глубоким пазом ротора и в 3….4 раза по сравнению с двигателем с обычной клеткой ротора без вытеснения тока.

Исходя из опыта эксплуатации, а также положительных качеств двигателей с двухслойным ротором можно рекомендовать их применение в следующих случаях:

- в электроприводах повторно – кратковременного режима работы и в электроприводах с частыми пусками. Исследования показали, что одвигатели с двухслойным ротором допускают число пусков подряд в

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

3….5 раз больше, чем двигатели с короткозамкнутым ротором, поэтому они могут обеспечить более высокую надежность работы и более высокую производительность механизма;

- в электроприводах продолжительного режима работы, но с тяжелыми пусками. Это относится к приводам, питание которых осуществляется через длинные линии с повышенным падением напряжения, а также к автономным электроэнергетическим системам, где мощность двигателей соизмерима с мощностью генераторов;

- в электроприводах, требующих большого начального пускового момента и стоянки под током короткого замыкания.

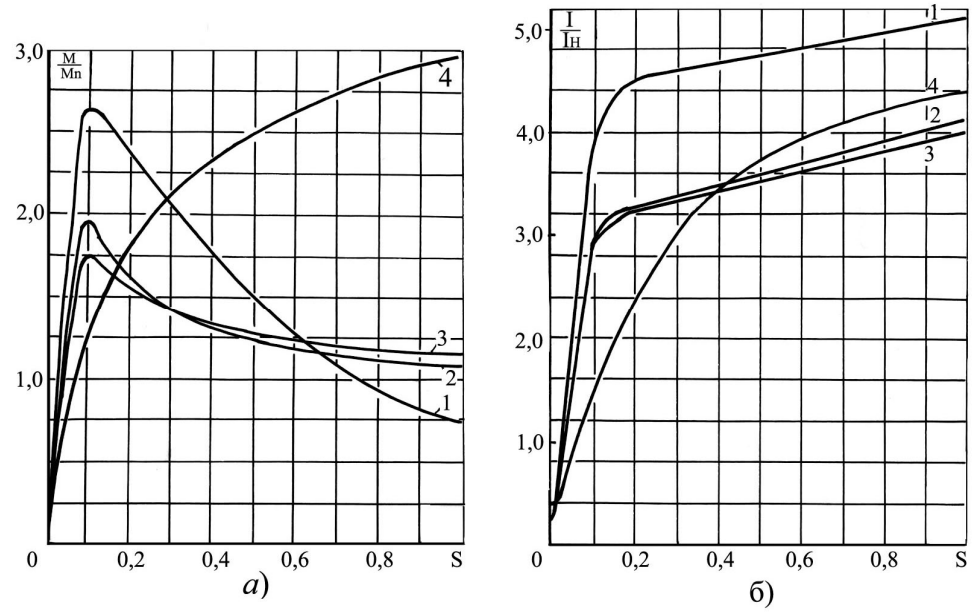


Рисунок 6.19 - Зависимости вращающего момента и тока статора от скольжения АД с различными роторами: 1 - нормальный короткозамкнутый; 2 - двухклеточный; 3 - глубокопазный; 4 – двухслойный

6.6.4. Обрыв фазы обмотки статора

В процессе эксплуатации асинхронных двигателей довольно часто возникают аварийные ситуации, связанные с обрывом цепи одной из фаз обмотки статора. Когда такой обрыв происходит у работающего двигателя, то он будет продолжать работать, но уже в режиме однофазного асинхронного двигателя. В действии вместо трех фаз останется только две, поэтому сохранение развиваемой мощности двигателя возможно лишь за счет увеличения скольжения и тока в оставшихся двух фазах. Если до обрыва цепи одной фазы нагрузка была номинальной, то после обрыва оставшиеся фазы окажутся перегруженными по току и двигатель может выйти из строя из-за перегрева обмотки статора.

Если обрыв цепи фазы или обрыв линейного провода произошел до того, как двигатель был включен в работу, то пуск его в большинстве случаев невозможен, поскольку оставшиеся фазы создают не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле и пусковой момент равен нулю. Исключение составляет случай, когда обрыв происходит в цепи одной из фаз обмотки статора, соединенной в «треугольник». Двигатель при этом становится не однофазным, а двухфазным со сдвигом фаз обмотки статора и их м.д.с. под углом 120^0. В таком двигателе

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

обмотка статора создает не пульсирующее, а вращающееся эллиптическое магнитное поле. Если момент сопротивления на валу не велик, то двигатель можно запустить, но он будет работать с повышенным шумом, при большом скольжении с вероятностью быстрого перегрева и опасностью выхода из строя.

6.6.5. Реверс двигателя и работа при «вывернутой» фазе

Реверс асинхронного двигателя осуществляется изменением направления вращения поля статора. Это достигается изменением порядка чередования фаз обмотки статора, для чего необходимо поменять местами любые две фазы из трех, подводящих питание к статорной обмотке. Однако следует иметь в виду, что реверс при номинальной скорости является тяжелым переходным режимом, который сопровождается большими бросками тока и резкими механическими колебаниями. Поэтому при изменении направления вращения двигателя необходимо сначала его остановить, затем изменить чередование фаз, после чего осуществить пуск.

На практике при сборке схемы двигателя может быть допущена ошибка в определении начала и конца одной из фаз обмотки статора, и она будет присоединена к остальным фазам неправильно, то есть окажется «вывернутой» по отношению к двум другим фазам. Наличие такой «вывернутой» фазы представляет собой одну из серьезных неисправностей в работе машины. М.д.с. фаз при этом окажутся под углом 60° друг к другу, а не 120°, как должно быть, и будут создавать не круговое, а резко выраженное эллиптическое поле, в котором преобладают высшие гармонические составляющие. Вследствие этого механическая характеристика двигателя будет искажена, при пуске двигатель не сможет достигнуть номинальной скорости, а его работа будет сопровождаться сильным гудением, вибрацией и быстрым нагревом всех частей даже при малой нагрузке

6.6.6. Влияние качества электроэнергии на работу судовых асинхронных двигателей

6.6.6.1. Общая оценка влияния качества электроэнергии

Качество электроэнергии судовой электростанции характеризуется определенными параметрами, которые устанавливаются нормативными требованиями Морского Регистра. Важнейшими из этих параметров являются номинальные значения напряжения $U_н$ и частоты $f_н$, а также форма кривой напряжения. Кроме того, достаточно высокие требования предъявляются к симметрии (одинаковости) напряжений разных фаз (приложение Е).

Основными причинами отклонения указанных параметров от номинальных значений являются – несовершенство регуляторов частоты и напряжения генераторных агрегатов, устройств распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, резкое изменение режимов работы, связанное с подключением или отключением мощных потребителей, неисправности или аварии в системе, неверные действия обслуживающего персонала, а также при коротких замыка-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ниях в системе, при нарушении условий синхронизации, при включении устройств гашения поля и т. д.

Наряду с этим всегда имеют место падения напряжения в подводящих кабелях и проводах, а в системе электропотребления весьма широко используются статические преобразователи энергии (регуляторы напряжения, частоты, выпрямительные устройства), которые искажают форму кривой напряжения и вносят помехи в работу электронных устройств, систем управления, защиты и контроля.

Как отмечалось выше, вращающий момент АД находится в квадратичной зависимости от напряжения и снижение U даже в небольших пределах сопровождается повышением скольжения s, понижением скорости вращения n, в результате чего возрастает ток нагрузки, увеличиваются потери энергии, повышается температура нагрева обмоток, снижается КПД, сокращается срок службы изоляции.

Для оценки коэффициента износа изоляции $k_{изн}$ в зависимости от изменения напряжение ΔU применяется соотношение [32]

$$k_{изн} = (47\Delta U^2 + 7{,}55\Delta U + 1)k_н^2,$$

где $k_н$ - коэффициент загрузки АД.

Если для номинального режима $k_{изн} = 1$ и $\Delta U = U_н - U = 0{,}1$, величина износа достигает величины $k_{изн}$=2,22.

При снижении напряжения свыше 30% возникает угроза остановки двигателя.

С частотой сети f_1 скорость вращения электроприводов с АД связана прямой зависимостью

$$n_2 = 60f_1\frac{1-s}{p}.$$

Изменение частоты сопровождается пропорциональным изменением скорости n_2, параметры исполнительного механизма также изменяются, например, центробежного насоса – подача $Q \equiv f$ и напор $H \equiv f^2$, при этом заметно изменяется потребляемая двигателями мощность и ток, что также опасно с точки зрения перегрева обмоток. К тому же при уменьшении частоты и скорости для двигателей с самовентиляцией ухудшаются условия теплоотвода. При питании АД от сети с несимметрией напряжений деформируется круговое вращающееся магнитное поле, это сопровождается появлением дополнительного спектра высших гармоник поля, увеличиваются потери и нагрев, снижается КПД. По данным [] при несимметрии напряжений 2% потери возрастают на 8%, КПД снижается на 1%, а при несимметрии 3,5%, потери увеличиваются на 25%, а снижение КПД достигает 3%. Кроме того, несимметрия и искажение поля сопровождаются повышением вибрации, что также отрицательно сказывается на сроке службы изоляции и подшипников.

6.6.6.2. Работа АД при неноминальном напряжении судовой сети

Рассмотрим работу АД при холостом ходе. Как отмечалось в п. 6.2.1., при пренебрежении током холостого хода справедливо соотношение

$$\overline{U_1} \approx -\overline{E_1} \text{ или } U_1 \approx 4{,}44f_1W_1k_{об1}\Phi_{от}. \qquad (6.55)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Магнитная характеристика АД $\Phi = f(I_0)$ имеет типичный вид (рисунок 6.20,а) и если частота сети неизменна $f_1 = \text{const}$, то $\Phi_{om} \equiv U_1$, а ток намагничивания I_o нелинейно зависит от магнитного потока Ф.

Современные АД выполняют, как правило, насыщенными, поэтому Φ_{om} соответствует участку перегиба магнитной характеристики. Это значит, что увеличение напряжения сверх номинального приводит к более значительному увеличению тока холостого хода. При работе АД под нагрузкой ток статора определяется геометрической суммой токов $\bar{I}_0$ и $\bar{I}_2'$.

Изобразим векторную диаграмму АД в упрощенном виде (рисунок 6.20,б).

Из ВД следует, что увеличение U_1 примерно на 15…20% приводит к пропорциональному увеличению магнитного потока до Φ_{1m} и если магнитная цепь насыщена, то ток холостого хода возрастает до значения I_0', ток I_2' практически не изменяется (при неизменном моменте сопротивления на валу), а общий ток статора I_1 возрастает в 1,5…1,7 раза. Это, конечно, приводит к перегреву изоляции обмотки статора, а при длительной работе в этих условиях – к выходу ее из строя. Следует иметь также в виду, что при увеличении напряжения и магнитного потока, значительно (в квадрате) возрастают потери в стали машины, что усугубляет опасность перегрева.

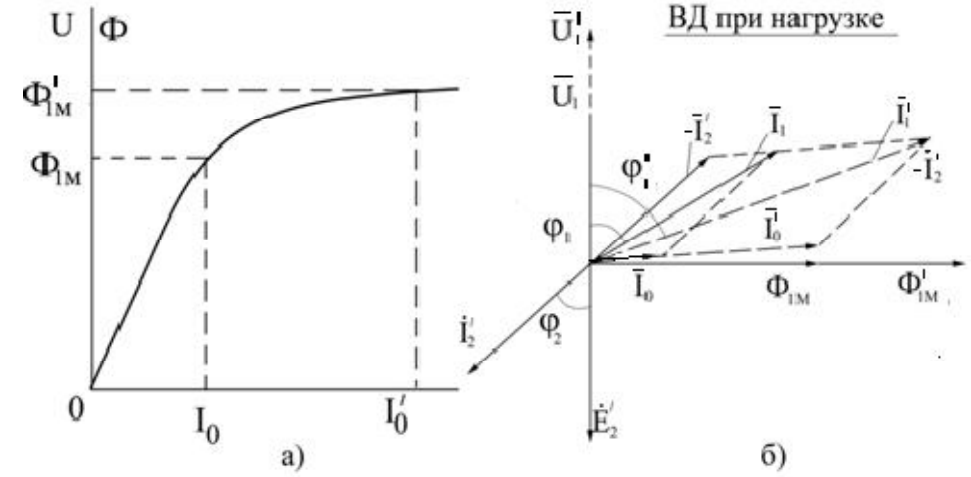


Рисунок 6.20 - Характеристика намагничивания АД (а) и векторная диаграмма АД при изменении напряжения (б)

Кроме того, при увеличении напряжения возрастает максимальный вращающий момент, перегрузочная способность двигателя (пропорционально U^2), несколько возрастает частота его вращения.

Уменьшение напряжения U_1 ведет к пропорциональному уменьшению магнитного потока Φ_{1m} и практически пропорциональному снижению тока намагничивания I_o.

Это не опасно в отношении нагрева машины, т.к. ток статора уменьшается, хотя и незначительно. Однако длительные понижения напряжения также недопустимы из-за опасности опрокидывания двигателя при внезапных провалах напряжения в сети при переходных процессах. Покажем это на механической характеристике (рисунок 6.21).

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Кривая 1 соответствует напряжению $U_н$, кривая 2 – пониженному на 15% $U_{сети}$, кривая 3 - пониженному на 35…45% напряжению сети, что может быть результатом запуска мощных потребителей сети. В последнем случае $M_c > M_{max}$ и двигатель опрокидывается.

Последующий самозапуск или пуск двигателя при номинальном

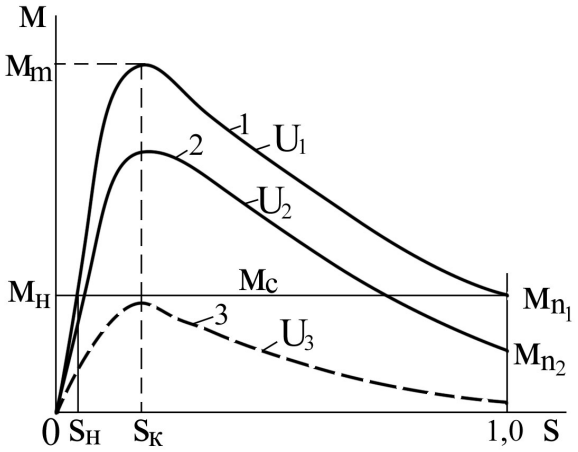


Рисунок 6.21 - Механическая характеристика АД при снижении напряжения сети

напряжении (U_2) невозможен, т.к. $M_{п2} < M_c$.

6.6.6.3. - Работа АД при неноминальной частоте судовой сети

Изменение частоты судовой электростанции может происходить при нарушениях в системе регулирования приводным двигателем генераторного агрегата.

При увеличении частоты равенство 6.55 обеспечивается за счет пропорционального снижения магнитного потока $Ф_{1m}$ и магнитной индукции в участках магнитной цепи, при этом будут происходить изменения параметров, потерь и энергетических характеристик двигателя в соответствии с зависимостями, показанными на рисунке 6.22.

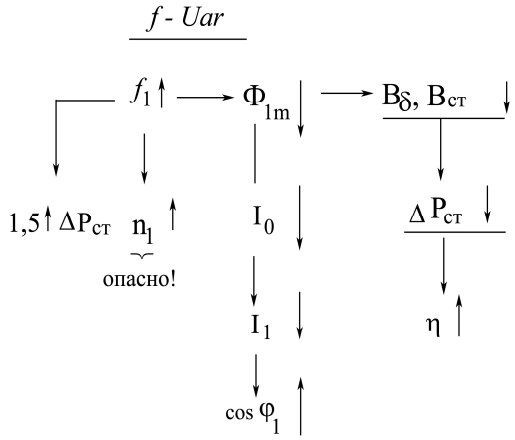


Рисунок 6.22 – Логика взаимодействий в АД при увеличении частоты в судовой сети

Таким образом увеличение частоты в пределах, указанных в таблице Е1 приложения Е, для двигателя не опасно.

Уменьшение частоты f_1 прежде всего сопровождается снижением оборотов двигателя $\left(n_1 = \frac{60f_1}{p}\right)$ и уменьшением производительности исполнительного механизма. Кроме того, при уменьшении f_1 возрастает магнитный поток $Ф_{1m}$ и не пропорционально (в соответствии с кривой намагничивания) увеличивается ток холостого хода. Допустимое по требованиям Морского Регистра снижение частоты составляет

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

± 5%$f_н$. Большее снижение частоты, приводит к значительному увеличению тока холостого хода, который может стать больше номинального; при этом возрастают потери в двигателе, снижается К.П.Д., возрастает перегрев, двигатель выходит из строя.

Изменением f_1 часто регулируют скорость вращения судовых АД, для чего применяются специальные статические преобразователи частоты. В этих преобразователях наряду с изменением частоты регулируется и выходное напряжение, что позволяет по определенному закону изменять магнитный поток в двигателе. Чаще всего частоту и напряжение изменяют пропорционально, так что обеспечивается равенство $\frac{U}{f} = \text{const}$, при этом магнитный поток Φ_{1m} остается неизменным. Это хорошо видно из соотношения 6.55.

Механические характеристики АД при таком законе изменения U/f показаны на рисунке 6.23,а. Такой закон регулирования применяется для электроприводов, имеющих $M_c = const$.

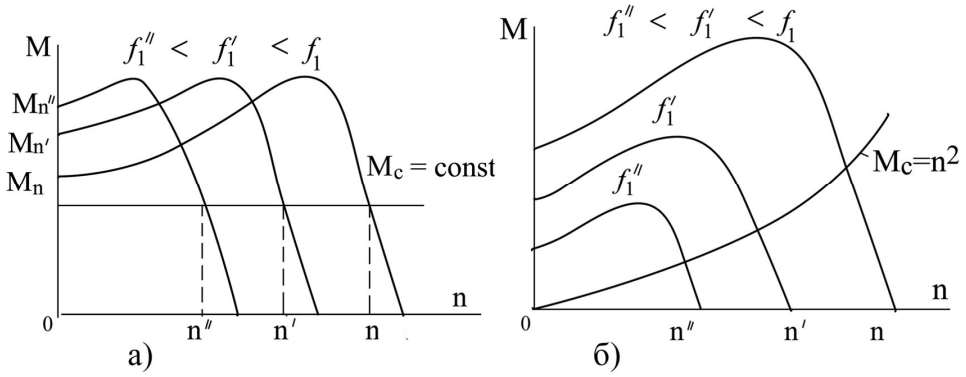


Рисунок 6.23 - Механические характеристика АД при регулировании по закону $\frac{U}{f} = \text{const}$ (а) и при регулировании по закону $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ (б)

Многие судовые электроприводы (насосы, вентиляторы, ГЭД) имеют вентиляторный (квадратичный) момент сопротивления. Для этих электроприводов регулирование оказывается более экономичным при ином законе изменения U и f, а именно

$$\frac{U_1}{U_1'} = \left(\frac{f_1}{f_1'}\right)^2.$$

Механические характеристики при таком регулировании показаны на рисунке 6.23,б.

6.6.6.4. Характер изменения тока статора АД при нагрузке при одновременном изменении напряжения и частоты

Выше было отмечено, что при условии $\frac{U}{f} = \text{const}$, магнитный поток не изменяется и, следовательно, ток намагничивания также не изменяется. Означает ли это, что можно произвольно изменять частоту и напряжение (увеличивать или уменьшать их одновременно). Видимо нет. Ясно, что одновременное уменьшение напряжения и частоты приведет в конечном итоге к остановке двигателя, а увеличение - ограничено максимально допустимой частотой вращения ЭП.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Получим зависимости тока статора от частоты и напряжения при различных нагрузках на валу двигателя. Для этого воспользуемся упрощенной схемой замещения (рисунок 6.24).

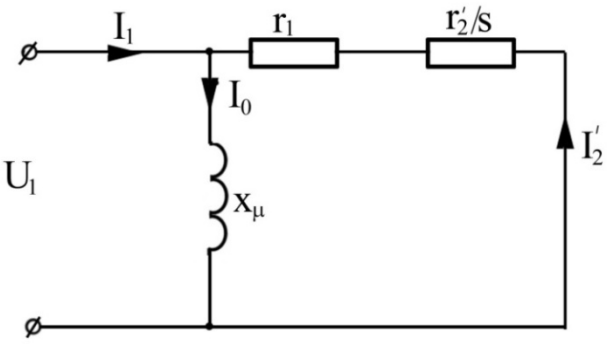


Рисунок 6.24 - Упрощенная схема замещения АД

В эту схему не включены индуктивные сопротивления x_1 и x_2', т.к. они много меньше сопротивления $r_2'/_S$ (при малых скольжениях), не включено и сопротивление r_μ, которое также много меньше x_μ. Ток I_0 является чисто индуктивным, а ток I_2' - чисто активным, т.е. они сдвинуты на 90° и поэтому справедливо уравнение

$$I_1^2 = I_o^2 + (I_2')^2 \text{ или } I_1 = \sqrt{I_o^2 + (I_2')^2}. \qquad (6.56)$$

Выше было установлено, что ток намагничивания I_0 увеличивается при снижении частоты сети f_1 и при увеличении напряжения U_1. Эта зависимость определяется характеристикой намагничивания, связывающей Φ_{1m} и I_0. Кривую намагничивания приближенно можно апроксимировать квадратичной параболой, для которой справедливо соотношение

$$I_o = a\left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2. \qquad (6.57)$$Место для формулы.

Теперь получим зависимость тока I_2' от напряжения и частоты, для чего воспользуемся двумя соотношениями

$$M_{эм} = c_м \Phi_{1m} I_2' \cos\Psi_2 = k_1 \Phi_{1m} I_2' \text{ и } \Phi_{1m} = k_2 \frac{U_1}{f_1},$$

которые вместе дают зависимость

$$M_{эм} = k_1 k_2 \frac{U_1}{f_1} I_2' = k I_2' \frac{U_1}{f_1},$$

откуда

$$I_2' = \frac{1}{k}\frac{f_1}{U_1} M_{эм} = b\frac{f_1}{U_1} M_{эм}. \qquad (6.58)$$

Подставив 6.57 и 6.58 в 6.56, получим искомую зависимость

$$I_1 = \sqrt{a^2\left(\frac{U_1^2}{f_1^2}\right)^2 + \left(b\frac{f_1}{U_1} M_{эм}\right)^2}. \qquad (6.59)$$

Как видно, ток статора I_1 при нагрузке сложным образом зависит от соотношения $\frac{U_1}{f_1}$; без расчетов, которые довольно сложны, или экспериментов, трудно сказать, что будет преобладать при изменении напряжения U и частоты f – ток I_2' или ток I_0. Видимо по физическим соображениям можно предположить, что при малых нагрузках

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

(M<0,5$M_н$) будет определяющим ток намагничивания I_0, а при больших нагрузках – ток I_2'.

Исследования, проведенные на двигателях старых серий, показывают, что при неизменной частоте зависимость $I_1 = f(U_1)$ характеризуется кривыми, представленными на рисунке 6.25,а.

Это очень важные зависимости. Они показывают, что при работе двигателя при номинальной нагрузке (точка А) опасно как уменьшение, так и увеличение напряжения.

Однако, если нагрузка двигателя меньше номинальной (M=0,5$M_н$), то минимальное значение тока соответствует пониженному напряжению. Это показывает целесообразность управления двигателем в зависимости от величины нагрузки. Для этой цели в настоящее время в электроприводах все более широко применяют встроенные микропроцессоры.

Ясно видно также, что увеличение напряжения свыше 1,25$U_н$ во всех случаях опасно из-за возможного перегрева обмотки статора. Следует также помнить, что снижение напряжения сопровождается снижением перегрузочной способности, а следовательно устойчивости работы АД.

Зависимости $I_1 = f(f_1)$ при неизменном напряжении показаны на рисунке 6.25,б.

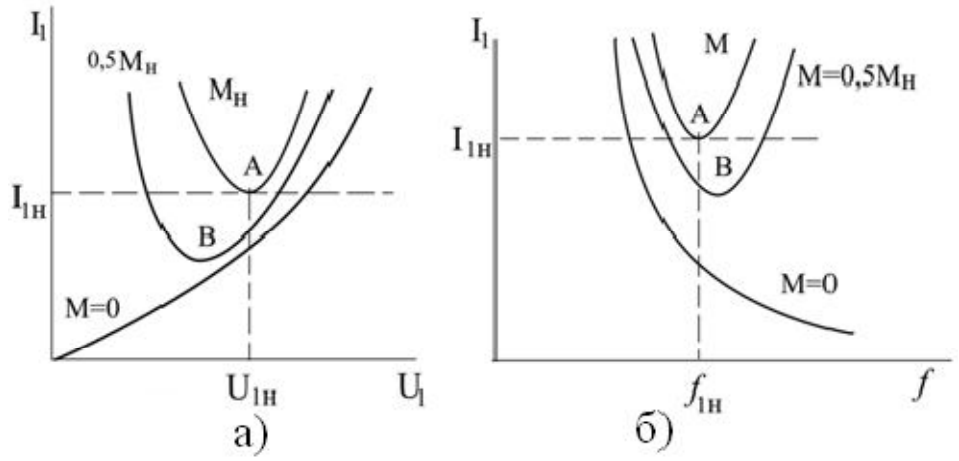


Рисунок 6.25 - Зависимости тока статора АД от напряжения сети при *f=Const* (а) и от частоты сети при *U=Const* (б)

В этом случае также при номинальной нагрузке (т.А) увеличение тока I_1 присходит при любом изменении частоты. Если нагрузка на валу двигателя меньше номинальной (например, M=0,5$M_н$), то минимальное значение тока статора достигается при некотором увеличении частоты. При этом снова следует вспомнить, что увеличение частоты обязательно сопровождается ростом оборотов двигателя, причем в зависимости от характера нагрузки будет изменяться (увеличиваться) момент на валу, что приводит к одновременному увеличению тока I_2'. Поэтому ток статора быстро увеличивается.

Если нагруженный двигатель питается от сети с одновременными отклонениями напряжения и частоты от номинальных значений, то анализ физических процессов аналогичен. Критерием допустимых отклонений U_1 и f_1 может быть принято выполнение неравенства

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\Phi_{1m} \equiv \frac{U_1}{f_1} \leq \frac{U_{1н}}{f_{1н}},$$

которое соответствует условию, что ток статора АД будет в допустимых пределах, если магнитный поток не превышает номинальной величины.

Если при снижении скорости вращения, которое происходит при уменьшении напряжения и частоты, момент сопротивления уменьшается ($M_c \equiv n^2$), критерий изменения U и f можно записать в виде

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} \sqrt{\frac{M}{M_н}}.$$

6.7. Регулирование скорости вращения судовых АД

В отношении регулировочных характеристик АД уступают двигателям постоянного тока в тем большей степени, чем шире требуемые пределы и чем больше должна быть плавность регулирования скорости. С целью улучшения регулировочных характеристик АД была проделана большая работа, однако до сих пор еще в установках с повышенными требованиями к регулировочным характеристикам преимущественно применяется двигатель постоянного тока.

6.7.1. Способы регулирования

Скорость вращения ротора АД равна

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60\, f_1}{p}(1 - s).$$

Таким образом, чтобы изменить скорость АД необходимо изменить либо скольжение s, либо скорость вращения поля статора n_1 Скольжение s можно изменить, изменяя вид механической характеристики M = f(s) путем введения в цепь ротора добавочных сопротивлений или изменением подводимого напряжения. Скорость вращения поля статора определяется частотой сети f_1 и числом пар полюсов p; изменение этих параметров приводит к изменению синхронной скорости поля n_1, а следовательно, и скорости n_2. При выборе того или иного способа регулирования скорости принимают во внимание такие показатели как плавность, диапазон регулирования, простота и надежность регулирующей аппаратуры, экономичность регулирования и изменение перегрузочной способности.

Понятно, что во всех случаях наиболее предпочтительным способом регулирования АД будет более простой и экономичный, обеспечивающий необходимый диапазон регулирования.

Рассмотрим возможности регулирования скорости АД различными способами.

6.7.2. Регулирование изменением подводимого напряжения

Возможность регулирования АД изменением подводимого напряжения подтверждается графиком (рисунок 6.26), на котором показаны механические характеристики АД для разных значений напряжения U_1 и график момента сопротивления (пунктир).

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

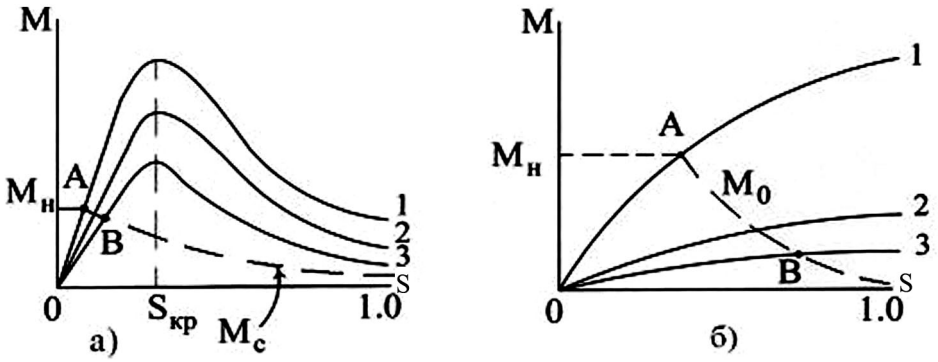


Рисунок 6.26 – Механические характеристики АД при изменении подводимого напряжения: а – обычный короткозамкнутый двигатель; б – двигатель с двухслойным (массивным) ротором

Точка "А" соответствует номинальному режиму. При уменьшении напряжения вращающий момент уменьшается пропорционально U_1^2. Характеристика 3 соответствует уменьшению напряжения примерно на 30%. Скольжение при этом увеличивается, а скорость вращения уменьшается примерно на 20% от номинальной, т.е. диапазон регулирования оказывается небольшим. Практически диапазон регулирования ограничивается величиной критического скольжения, одновременно резко снижается перегрузочная способность.

Изменение подводимого к двигателю напряжения может осуществляться различными способами: применением источника с регулируемым напряжением, включением в цепь статора дросселя насыщения, регулируемого автотрансформатора или тиристорных коммутаторов.

Данный способ регулирования не является экономичным, т.к. при увеличении скольжения s увеличиваются потери в роторе $\Delta P_{эм} \cdot s$ и его нагрев, и в настоящее время применяется редко, в основном в случаях, когда вопрос экономичности является второстепенным.

Следует в то же время отметить, что для АД с повышенным активным сопротивлением обмотки ротора пределы регулирования данным способом значительно расширяются, что показано на рисунке 6.26, б. Подобные свойства имеет двигатель с массивным или двухслойным ротором, разработанный в нашей стране под руководством профессора Могильникова В.С.

Эти двигатели, кроме того, имеют отличные пусковые характеристики (большой пусковой момент и малый пусковой ток), лучшие виброшумовые характеристики, что особенно актуально для судовых ЭЭС

6.7.3. Регулирование изменением активного сопротивления цепи ротора

Этот способ регулирования возможен только в двигателях с фазным ротором. Схема регулирования ничем не отличается от схемы пуска АД с фазным ротором (рисунок 6.15), однако регулировочные реостаты должны быть рассчитаны на длительную работу.

Механические характеристики двигателя при изменении активного сопротивления ротора показаны на рисунке 6.27. Процесс регулирования происходит следующим образом. Работа АД в номинальном режиме характеризуется точкой «А» на естественной характеристике.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

При введении в цепь ротора сопротивления $r_д$ скорость в первый момент не уменьшается, а ток ротора снижается до величины

$$I_2' = \frac{E_2' s}{\sqrt{(r_2' + r_д')^2 + (x_2' s)^2}}.$$

Уменьшение тока приводит к уменьшению вращающего момента (точка A') и ротор начнет тормозиться, т.е. скольжение будет возрастать. Соответственно возрастающему скольжению будет увеличиваться $E_2' s$ и ток I_2'. Процесс уменьшения скорости и увеличение тока I_2' будет происходить до тех пор, пока составляющая этого тока $I_2' \cos \Psi_2$, не достигнет прежнего значения, а вращающий момент

$$M_{эм} = C_m \Phi_m I_2' \cos \Psi_2$$

не станет снова равным моменту сопротивления M_c. Ротор в этом случае будет иметь скольжение больше, а скорость меньше, чем до введения реостата (точка В).

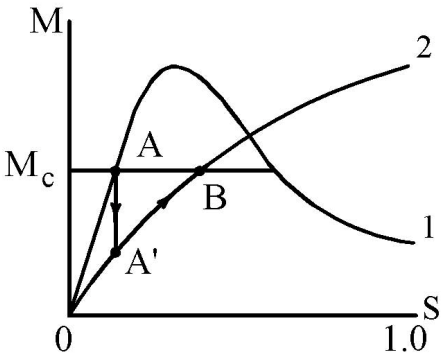


Рисунок 6.27 – Механические характеристики АД при изменении активного сопротивления ротора

Указанным способом можно регулировать скорость АД в широких пределах, а плавность регулирования скорости будет зависеть от числа ступеней регулировочного реостата. В то же время этот способ регулирования является очень неэкономичным, так как связан с большими потерями энергии в регулировочном реостате. КПД двигателя при регулировании тем меньше, чем меньшая скорость вращения ротора достигается в результате регулирования.

Несмотря на неэкономичность данного способа регулирования, он находит применение на практике. Его положительным качеством является то, что потери скольжения выделяются в сопротивлении регулировочного реостата и не приводят к повышенному нагреву ротора.

6.7.4. Регулирование изменением частоты питающей сети

Этот способ регулирования скорости возможен только при питании АД от специальных установок, как правило, статических преобразователей частоты.

Работа АД при неноминальной частоте подробно рассмотрена в 6.6.6.

При уменьшении частоты максимальный момент M_{max} возрастает, а скорость вращения поля статора n_1 и скорость ротора n_2 уменьшаются.

Если при уменьшении частоты напряжение постоянно U_1 = const, то увеличивается магнитный поток в соответствии с соотношением

$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4{,}44 f_1 W_1 k_{об1}},$$

при этом увеличивается насыщение стали статора и ротора, недопустимо растут потери на гистерезис и вихревые токи, увеличивается ток намагничивания, а КПД АД уменьшается. Поэтому всегда в установ-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ках, предназначенных для регулирования АД рассматриваемым способом, одновременно с изменением частоты изменяют также и величину напряжения.

К недостаткам частотного регулирования следует отнести большие габариты и высокую стоимость питающей установки, отрицательное влияние преобразователей частоты на судовую сеть, что выражается в искажении формы кривой напряжения сети, высокий уровень собственных шумов. К достоинствам относится плавное, в широких пределах регулирование скорости АД. В настоящее время в связи с совершенствованием статических преобразователей частоты на тиристорах этот способ регулирования скорости АД становится весьма перспективным.

6.7.5. Регулирование изменением числа пар полюсов

АД, в которых предусмотрена возможность изменять число пар полюсов p_1 называются полюсопереключаемыми или многоскоростными. Обычно они выпускаются на 2, 3 или на 4 скорости вращения, причем двухскоростные АД изготовляются с одной обмоткой на статоре и с переключением полюсов в отношении 2:1, трехскоростные - с двумя обмотками на статоре, одна из которых выполняется с переключением, четырехскоростные - с двумя обмотками на статоре, каждая из которых выполняется с переключением числа пар полюсов в отношении 2:1.

Например, двигатель на частоту f = 50Гц с синхронными скоростями вращения 1500/1000/750/500 имеет одну обмотку с переключением на 2p = 4 и 8 и другую обмотку с переключением на 2p = 6 и 12 полюсов.

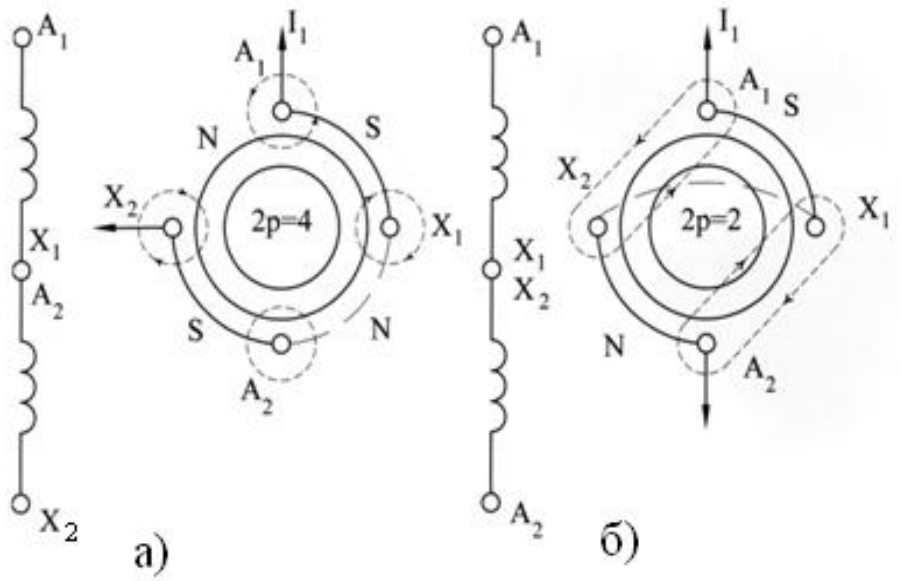


Рисунок 6.28 – Принципиальная схема соединения полуобмоток фазы статора при переключении числа пар полюсов

Каждая фаза обмотки статора многоскоростного АД состоит из двух одинаковых частей (полуобмоток), которые включаются различным образом. Большая скорость получается при меньшем числе полюсов.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Принципиальная схема соединения полуобмоток одной фазы статора при переключении числа пар полюсов в отношении 2:1 показана на рисунке 6.28, а и б. Полуобмотки сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 180°. При соединении полуобмоток, как показано на рисунке 6.21, а обмотка образует 4 полюса и синхронная скорость равна 1500 об/мин. Если одну полуобмотку переключить таким образом, чтобы направление тока в ней изменилось на обратное (рисунок 6.28, б), то обмотка будет создавать два полюса и синхронная скорость составит n_1 = 3000 об/мин, т.е. увеличится вдвое.

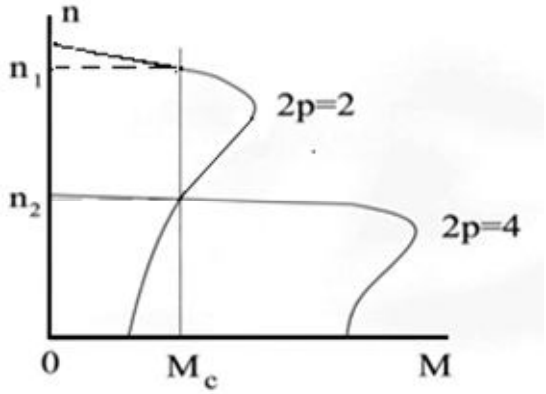


Рисунок 6.29 - Механические характеристики АД при различном числе пар полюсов

Механические характеристики АД при различных числах полюсов приведены на рисунке 6.29. Поскольку при рассмотренном переключении обмотки статора напряжение фазы не изменяется, то вращающий момент при уменьшении числа пар полюсов уменьшается, так как

$$M \equiv p_1 U_\phi^2$$

Применяются и другие схемы переключения числа пар полюсов АД. Вес и стоимость многоскоростных АД несколько больше, чем односкоростных той же мощности и допускают они только ступенчатое изменение скорости. Тем не менее это широко применяемый способ регулирования скорости короткозамкнутых АД, в том числе и в судовых условиях.

6.8. Реверсирование и электрическое торможение АД

Изменение направления вращения АД осуществляется изменением направления вращения магнитного поля статора, что достигается переключением двух любых фаз питающей трехфазной сети .

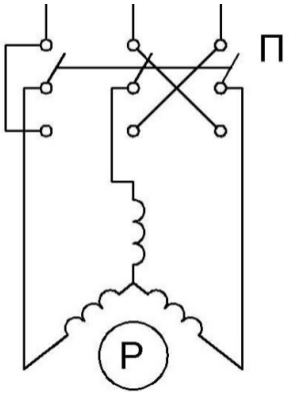


Рисунок 6.30 – Схема реверсирования АД

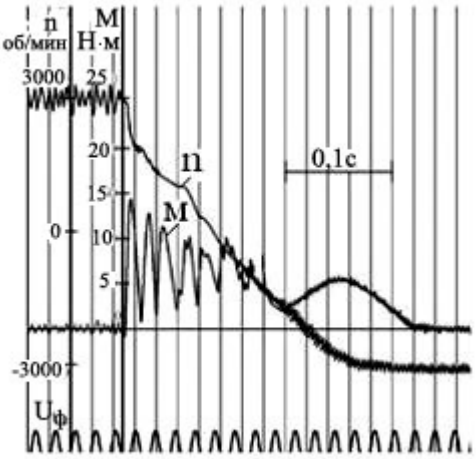


Рисунок 6.30,а - Осциллограмма реверса АД

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Переключение питания АД может производиться вручную или применением специальных схем при автоматическом управлении АД.

Электрическое торможение АД применяется в тех случаях, когда необходимо остановить двигатель или ограничить скорость вращения. На практике применяются три главных способа электрического торможения АД - способ электромагнитного тормоза, генераторное торможение и динамическое торможение.

Электромагнитное торможение или торможение противовключением заключается в том, что направление вращения поля статора, как и при реверсе, изменяется на обратное по схеме рисунка 6.30. А на рисунке 6.30,а показаны осциллограммы изменения скорости и момента при реверсе судового АД малой мощности серии COMM41-2 (3кВт, 3000об/мин). При остановке ротора обмотка статора должна быть отключена от сети во избежание разгона двигателя в противоположную сторону.

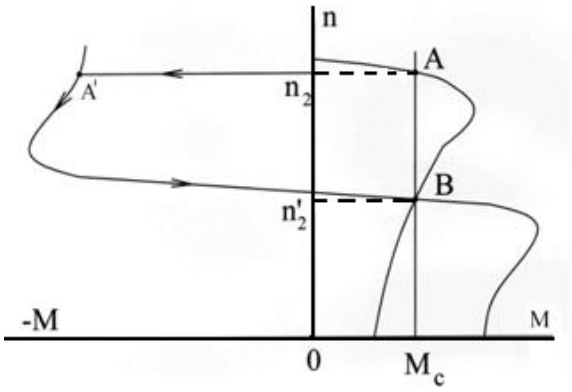


Рисунок 6.31 – Характеристики генераторного торможения АД

Генераторное торможение применяется, главным образом, в многоскоростных АД. Если двигатель работает при меньшем числе полюсов, т.е. при большей скорости вращения (точка А на рисунке 6.31), то при переключении его на большее число полюсов скорость вращения поля статора уменьшается и двигатель переходит в генераторный режим (точка $A^{'}$). В области А - $A^{'}$ –В скорость вращения ротора больше скорости вращения поля статора, на ротор действует тормозной электромагнитный момент и таким образом осуществляется генераторное торможение АД до скорости n'_2 (точка В). Чтобы продолжать торможение до полной остановки ротора, необходимо перевести двигатель в режим противовключения.

В режиме динамического торможения обмотка статора АД отключается от сети переменного тока и подключается к источнику постоянного тока. Проводники обмотки вращающегося ротора пересекают неподвижное поле статора, в них индуктируется ЭДС и протекает ток. Тормозной момент создается за счет взаимодействия обмотки ротора и магнитного поля статора.

Регулирование величины тормозного момента при динамическом торможении производится изменением величины напряжения постоянного тока обмотки статора или изменением сопротивления в цепи фазного ротора.

Недостатком динамического торможения является зависимость тормозного момента от скорости ротора; чем меньше скорость, тем меньше тормозной момент.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

6.9. Однофазные асинхронные двигатели

6.9.1 Принцип действия однофазного АД

Однофазные асинхронные двигатели находят широкое применение как в промышленности, так и на судах и по устройству мало отличаются от трехфазных.

В частности, в пазах статора размещается не трехфазная, а однофазная обмотка, которая занимает обычно $\frac{2}{3}\tau$ на каждом полюсном делении (рисунок 6.32,а). Такую обмотку можно получить из трехфазной, если использовать только две её фазы. Ротор обычно имеет короткозамкнутую обмотку типа "беличья клетка".

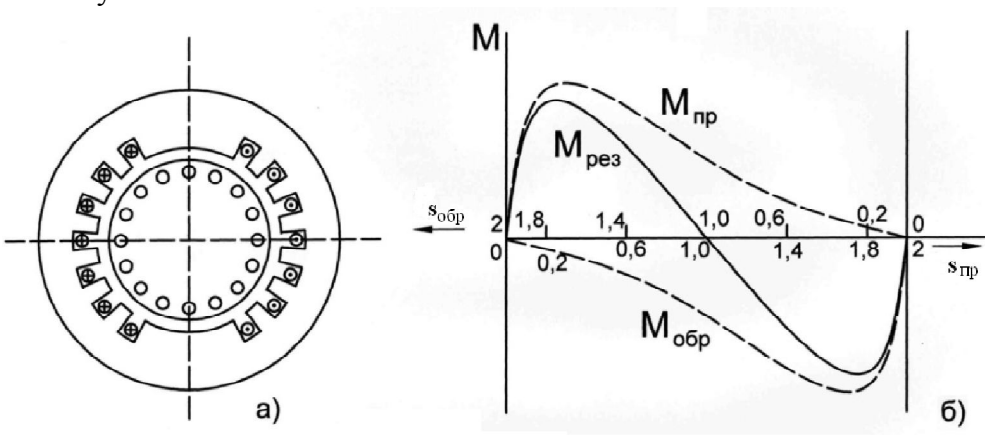


Рисунок 6.32 – Устройство(а) и моменты вращения (б) однофазного двигателя

Переменный ток однофазной обмотки создает пульсирующую МДС, которую можно разложить на две МДС, вращающиеся в противоположные стороны с одинаковой частотой вращения. Амплитуды этих МДС равны между собой, а каждая составляет по величине половину амплитуды пульсирующей МДС. МДС создают вращающиеся магнитные поля, одно из которых условно называют прямым, т.к. оно совпадает с направлением вращения ротора, другое - обратным, так как оно направлено против вращения ротора.

Скольжение ротора относительно прямого поля $s_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, а относительно обратного $s_2 = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = 2 - s$.

При пуске, когда s = 1 ($n_2 = 0$), эти поля создают одинаковые, но разные по знаку моменты $M_{пр}$ и $M_{обр}$, поэтому результирующий момент двигателя $M_{рез}$ при пуске равен нулю (рисунок 6.32,б). Если же ротор приведен во вращение в ту или другую сторону, то один из моментов ($M_{пр}$ или $M_{обр}$), будет преобладать и при условии, что результирующий электромагнитный момент больше момента сопротивления M_c двигатель идет в ход, разгоняется и достигает определенного установившегося скольжения $s_н$, соответствующего моменту нагрузки $M_н$.

Для получения пускового момента необходимо создать в зазоре однофазного двигателя вращающееся магнитное поле, которое образуется как минимум двумя пульсирующими МДС, имеющими пространствен-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ный и временной сдвиг по фазе. С этой целью на статоре, кроме основной рабочей обмотки, располагают пусковую обмотку, сдвинутую относительно основной обмотки на электрический угол 90º. Фазовый сдвиг между токами пусковой и рабочей обмоток достигается путем включения в одну из обмоток фазосдвигающего элемента, чаще всего конденсатора, подобранного таким образом, чтобы ток пусковой обмотки опережал ток рабочей обмотки на угол, близкий к 90°.

Схема включения и механическая характеристика однофазного двигателя с пусковой обмоткой показаны на рисунке 6.33.

Пуск двигателя происходит при включенном общем выключателе В путем нажатия на кнопку $К_нП$ (рисунок 6.33,а).

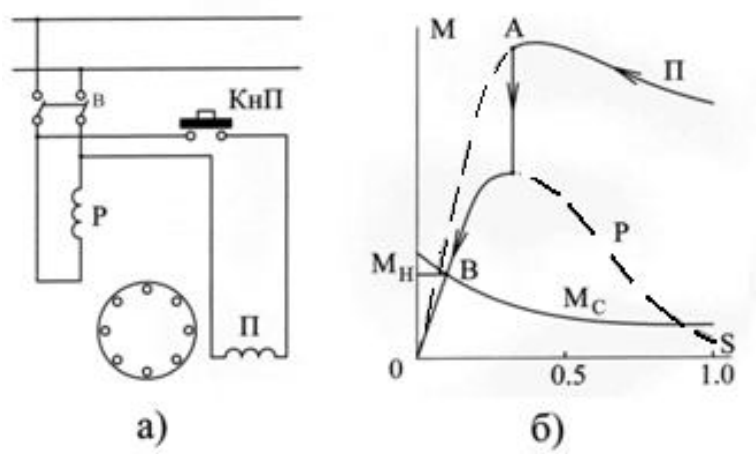


Рисунок 6.33 - Схема включения (а) и механическая характеристика (б) однофазного двигателя с пусковой обмоткой

По мере разгона двигателя примерно до момента, соответствующего точке А на механической характеристике (рисунок 6.33,б), пусковая обмотка отключается и двигатель переходит на естественную механическую характеристику (точка В).

6.9.2. Схемы включения АД в однофазную сеть

На практике нередко возникает необходимость применения трехфазных двигателей в однофазных цепях. В этих случаях двигатель может работать либо как однофазный с конденсатором, либо как однофазный конденсаторный с постоянно включенной рабочей емкостью, имея меньшие значения КПД, полезной мощности и cosφ, чем в трехфазном режиме. Наилучшие эксплуатационные показатели дает второй режим, обеспечивающий получение вращающегося магнитного поля, близкого к круговому, при этом номинальная мощность достигает 76….85% от мощности , указанной на щитке двигателя.

Для двигателей, имеющих 3 вывода обмотки статора, чаще всего применяются схемы включения в однофазную сеть, показанные на рисунке 6.34.

При таких соединениях обмоток статора двигатель должен включаться в однофазную сеть с напряжением, равным номинальному напряжению трехфазного двигателя. Для увеличения пускового момента могут включаться пусковые конденсаторы, как показано на рисунке 6.34(а и б) пунктиром. Если пуск происходит без нагрузки, конденсатор $С_п$ не используется. При шести выводах обмотки трехфазный двигатель имеет два номинальных напряжения, например, 127/220В.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

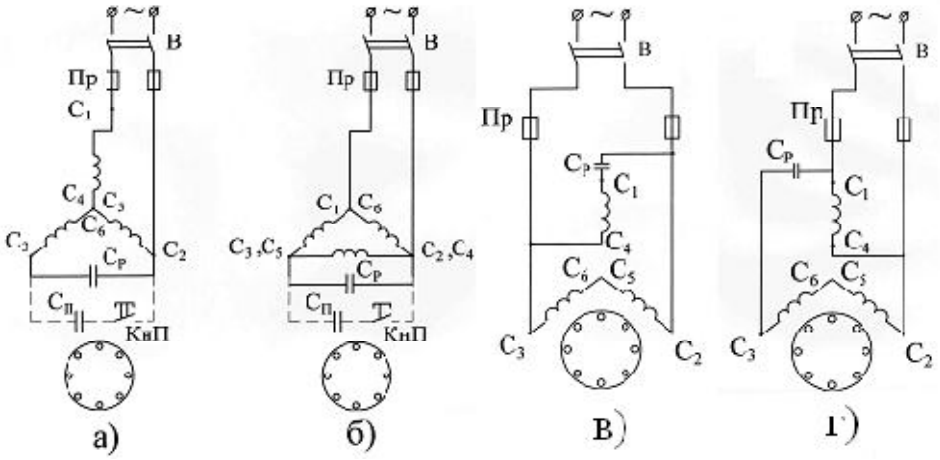


Рисунок 6.34 – Схемы включения в однофазную сеть трехфазного АД, имеющего три (а,б) или шесть (в,г) выводов обмотки статора

Если напряжение однофазной сети соответствует большему напряжению двигателя (220В), лучше использовать схему, показанную на рисунке 6,34, в. В противном случае необходимо воспользоваться схемой рисунке 6.34, г, при этом мощность двигателя значительно уменьшается.

Таким образом, при выборе трехфазного двигателя для включения в однофазную сеть следует стремиться к тому, чтобы напряжение сети соответствовало большему номинальному напряжению двигателя.

Необходимая величина рабочей емкости рассчитывается, исходя из напряжения сети U_c и номинального тока фазы двигателя

$$C_p = k \frac{I_н}{U_c} \text{ мкФ} \quad . \qquad (6.60)$$

Для сети с частотой 50 Гц коэффициент k = 2800 (для схем на рисунке 6.34,а и в), k = 4800 (для схемы на рисунке 6.34,б), k = 1600 (для схемы на рисунке 6.34,г).

Для того, чтобы получить пусковой момент, близкий к номинальному, необходимо выбрать емкость пускового конденсатора в пределах

$$C_п = (2{,}5 \ldots .3{,}0)C_р. \qquad (6{,}61)$$

Напряжение на конденсаторах $U_к$ определяется схемой включения. Для схем на рисунке 6.34, а и б $U_к \geq U_c$, для схем на рисунке 6.34,в и г $U_к \geq 2U_c$.

Поскольку после отключения двигателя от сети конденсаторы сохраняют на своих зажимах напряжение, опасное для человека, необходимо при ремонте и при наладке двигателя после каждого его отключения от сети конденсатор разрядить, для чего могут быть использованы разрядные сопротивления или последовательно соединенные лампы накаливания.

6.10. Экранированные асинхронные двигатели

Экранированные асинхронные двигатели в судовых условиях применяются, например, в качестве электроприводов герметичных электронасосов и имеют конструктивные особенности, отличающие их от обычных типов судовых электродвигателей. К этим особенностям относятся:

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

1. Наличие в зазоре между расточкой статора и ротором двух тонкостенных экранов из немагнитной стали, имеющей высокое удельное электрическое сопротивление, что обусловлено стремлением ограничить в них потери от перемагничивания и вихревых токов. Экраны отделяют полость статора и короткозамкнутую обмотку ротора от коррозионного действия рабочей жидкости.

2. Относительно большой зазор между расточкой статора и ротора (δ = 2….4мм), необходимый для установки экранов и прокачки рабочей жидкости.

3. Вращение ротора в рабочей жидкости, циркулирующей через гидравлический зазор между статором и ротором, что существенно увеличивает механические потери.

4. Большое отношение длины активной части к полюсному делению $\frac{\ell}{\tau} > 2{,}0$, что связано с проблемой снижения электрических потерь в экране статора, пропорциональных τ^3 , и потерь на трение цилиндрической поверхности ротора о жидкость, пропорциональных τ^4.

5. Часто для таких двигателей применяется массивный ротор из стали с короткозамкнутой обмоткой в виде «беличьей клетки».

6. Поскольку перекачиваемая насосом рабочая жидкость может иметь высокое давление, в пазах статора применяются полузакрытые пазы с клиньями, которые исключают деформацию экрана статора от внутреннего давления.

7. В лобовых частях обмотки статора размещаются массивные стальные элементы - нажимные плиты, крышки, подшипниковые горловины и др.

Все эти особенности приводят к увеличению намагничивающего тока и потерь, к снижению энергетических показателей - КПД и коэффициента мощности этих двигателей.

6.11. Серии судовых асинхронных двигателей

Изоляция обмоток машины должна быть влагостойкой, маслостойкой и водостойкой. По нагревостойкости изоляционные материалы должны соответствовать ГОСТ 88—70. Серии судовых асинхронных двигателей выпускаются, как правило, на базе единых серий асинхронных машин, выпускаемых промышленностью. Однако благодаря применению материалов повышенного качества их показатели в целом выше общепромышленных и соответствуют вышеизложенным требованиям.

Двигатели изготовляют на синхронные частоты вращения 750, 1000, 1500 и 3000 об/мин при частоте 50 Гц. При этом предусмотрен выпуск одно-, двух- и трехскоростных судовых асинхронных двигателей для продолжительного, повторно-кратковременного и кратковременного режимов работы с левым или правым направлением вращения.

В пятидесятые годы прошлого века на флот поставлялись электродвигатели серий МА, МАО, МРЗ, МАФ, МАП, построенные на базе единой общепромышленной серии А.

В середине шестидесятых годов промышленность перешла к выпуску судовых асинхронных двигателей, которые были спроектированы на базе единой серии А2 и А02, обладающей повышенной надежностью. Эта серия в настоящее время успешно эксплуатируется на многих судах.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Серия состоит из нескольких самостоятельных подсерий, являющихся, однако, продолжением одна другой.

Электродвигатели серии АОМ с модификациями имеют четыре габарита по диаметру и две длины на каждом диаметре, всего 8 типоразмеров. Наименование серии расшифровывается следующим образом. АОМ-21-4 означает: А - асинхронный; О - обдуваемый; М - морской; первая цифра 2 - условный габарит (диаметр); вторая цифра - 1 первая длина (условно) якоря; третья цифра 4 - число полюсов.

Обмотка статора однослойная с изоляцией класса В (1-й и 2-й габариты) и класса Н (3-й и 4-й габариты).

При малошумном исполнении в обозначение типа двигателя добавляется буква Ш (например, АОМШ 31-4). Если при этом машина рассчитана на увеличенные осевые и радиальные нагрузки, то в обозначении добавляется буква У (например, АОМШУ-21-2). По основным рабочим свойствам эти двигатели не отличаются от обычной серии АОМ, однако имеют конструктивные особенности. В частности, вал машин серии АОМШ выполнен из конструкционной стали марки 40Х, а в двигателях типа АОМШУ он сварной из стали ст.5 и нержавеющей стали (свободный конец вала). Подшипниковые узлы и шейки вала обрабатываются по 1-му классу точности, ротор машины тщательно балансируется. В электродвигателях применяют специальные малошумные подшипники качения, причем подшипник со стороны свободного конца вала выполняется «плавающим» (в АОМШУ плавающий подшипник со стороны крылатки). Такая конструкция обеспечивает свободу для осевого перемещения верхней обоймы подшипника при температурных деформациях. Кроме того, подшипниковые узлы выполнены так, что замена смазки может производиться без разборки двигателя через пресс-масленку. В нижней части машины предусмотрено специальное отверстие с плунжером и шнековым скребком для удаления старой смазки.

Для подшипников применяется специальная консистентная смазка ЦИАТИМ-221 или ВНИИНП-242, допускающая работу двигателя без ее замены в течение 4000….6000 часов, но не более 3….5 лет.

При маломагнитном исполнении (АОМШМ, а также СОММ - специальный, обдуваемый, морской, маломагнитный) для снижения переменной составляющей поля рассеяния в окружающем пространстве и обеспечения маломагнитности в двигателях применяют специальные экранирующие колпаки вокруг лобовых частей обмотки статора и стальные экранирующие обечайки (манжеты), охватывающие корпус двигателя в районе расположения сердечника статора.

Электродвигатели серии АМ с модификациями выполняются в брызгозащищенном исполнении 1Р34, имеют аксиально-вытяжную вентиляцию с помощью вентилятора, установленного на валу внутри машины. Являясь продолжением серии АОМ, двигатели типа АМ имеют 14 типоразмеров. Серия построена на семи диаметрах (5÷11 габариты), по две длины на каждом диаметре.

Электродвигатели АМШ отличаются малым шумом и обладают повышенной прочностью по сравнению с основной серией АМ. Это достигается высоким качеством исполнения машин, применением специальных малошумных подшипников и высокопрочных материалов для конструктивных элементов.

Двигатели АН 8÷11 габаритов, предназначенные для центробежных насосов, имеют двухстороннюю аксиально-радиальную самовентиляцию и отличаются возможностью воспринимать от механизмов большие осевые и

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

радиальные усилия. Двигатели могут изготовляться с удлиненными концами валов для непосредственной насадки рабочего колеса на вал.

Электродвигатели серии 4А. Двигатели серии 4А, по сравнению с двигателями предыдущих единых серий имеют меньшие массу и габариты, большие пусковые моменты и повышенную надежность. Это достигнуто за счет применения электротехнической стали с меньшими удельными потерями и большей магнитной проницаемостью, современных нагревостойких и высокопрочных изоляционных материалов, более совершенной системы вентиляции, а также за счет усовершенствования технологии производства. Двигатели серии 4А общего применения имеют высоту оси вращения в пределах 56÷355 мм и мощность в пределах 0,12….400 кВт. По степени защиты предусмотрены два исполнения: закрытое обдуваемое (1Р44) и защищенное (1Р23).

Для судов предусмотрены модификации серии 4А - 4АП … ОМ2, 4А … РОМ5, 4А … РЗРОМ5.

Электродвигатели серии 4АП … ОМ2 разработаны на базе общесоюзной серии 4А и представлены для привода судовых осевых вентиляторов системных и встроенных в воздухоохладители продолжительного (S1) режима работы на судах неограниченного района плавания (температура окружающей среды от –40 до $+50^0$ С), категорий размещения 2, 3, 4 и 5 по ГОСТ 15150-69.

Обозначение типоразмера 4АП63В2ОМ2 электродвигателей расшифровывается следующим образом: 4 – порядковый номер общесоюзной серии; А – асинхронный; П – закрытое исполнение электродвигателя, обдуваемого вентилятором заказчика; 63 – высота оси вращения в миллиметрах; В – условная длина сердечника статора; 2 – число полюсов; ОМ – климатическое исполнение для неограниченного района плавания; 2- категория размещения.

Расчетный срок службы электродвигателей серии 4АП…ОМ2 составляет не менее 20 лет при общей наработке не менее 20 000 ч для обмотки статора, не менее 10 000 ч для подшипников и не более 40 000 ч для остальных активных частей. Вероятность безотказной работы двигателя составляет 0,8 для высот оси вращения от 56 до 132 мм и 0,9 для высот 160 и 180 мм в течение 10 000 ч наработки.

Электродвигатели серий 4А…РОМ5 и 4А…РЗРОМ5 разработаны на базе общесоюзной серии 4А и предназначены для привода рыбообрабатывающих и рыботранспортирующих механизмов, зубчатых мотор – редукторов, устанавливаемых в технологических цехах рыбообрабатывающих судов, и других механизмов продолжительного (S1) режима работы на судах неограниченного района плавания (температура окружающее среды от – 40 до $+40^0$ С), категория размещения 5.

Обозначение типоразмера 4А90L4РЗРОМ5 электродвигателей расшифровывается следующим образом: 4-порядковый номер обще- союзной серии; А - асинхронный; 90- высота центров в миллиметрах; L- установочный размер по длине статора; 4- число полюсов; Р3- для привода редукторов (зубчатых)); Р- для рыбопромысловых судов; ОМ - климатическое исполнение; 5- категория размещения.

Помимо двигателей основного исполнения, предназначенных для применения в приводах, не предъявляющих специальных требований в отношении режима работы и условий эксплуатации, предусмотрены модификации электродвигателей:

— с повышенным пусковым моментом (4АР.....УЗ);

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

— с повышенным скольжением (4АС.....);
— тихоходные (2р=10 и 2р =12);
— многоскоростные (на две, три и четыре скорости, 2р=4/2; 6/4; 8/4; 6/4/2; 8/4/2; 8/6/4; 12/6; 12/8/6/4);
— на частоту сети 60 Гц;
— однофазные;
— встраиваемые в механизм (4АВ .....);
— с встроенным электромагнитным тормозом (4А..... Е);
— малошумные (4А.....НУЗ);
— с повышенной точностью по установочным размерам (4А...П);
— химостойкие (4А.....ХУЗ);
— влагоморозостойкие (4А..... У);
— тропические (4А ..... Т2);
— для крайнего Севера (4А ..... ХЛ);
— для сельского хозяйства (4А ..... СХУЗ);
— для рыбообрабатывающих установок (4А ..... РОМ);
— для морского флота и др.

Для обеспечения высоких энергетических показателей, хороших пусковых характеристик и наиболее полного использования материалов в вышеперечисленных двигателях выбраны оптимальные соотношения между длиной и внешним диаметром сердечников статора. Число пазов ротора во всех случаях меньше числа пазов статора, а их соотношение соответствует рекомендациям, которые позволяют уменьшить добавочные потери, приблизить форму кривой поля в зазоре к синусоидальной и снизить влияние паразитных моментов.

С этой же целью используются полузакрытые трапециеидальные пазы статора и закрытые или полузакрытые пазы ротора.

Нагревостойкость изоляции обмоток статора при высотах оси вращения h соответствует классам нагревостойкости:

h= 56÷ 63 мм	класс Е;
h= 71÷132 мм	класс В;
h= 160÷355 мм	класс F.

Электродвигатели серий ДМ, ДМО, ДММ и их модификации с высотами оси вращения 63÷180, предназначенные для судового электропривода.

Двигатели рассчитаны на питание от сети 220 или 380 В с частотой 50 Гц при соединении обмотки статора в звезду. В многоскоростных двигателях предусмотрено переключение обмотки статора «треугольник - двойная звезда». Класс изоляции обмоток Н.

Условное обозначение двигателя расшифровывается следующим образом:

Д — двигатель, М — морской;
ДММ — маломагнитные двигатели;
ДМО — двигатели для осевых вентиляторов;
ДМН, ДММН—двигатели для низкоподпорных моноблочных насосов;
ДМНУ; ДММНУ — двигатели для высокоподпорных моноблочных насосов (усиленные);
ДМБ, ДММБ — двигатели без вентилятора самообдува;
ДМБН, ДММБН; ДМБНУ, ДММБНУ — двигатели без вентилятора самообдува для моноблочных насосов (низкоподпорных и высокоподпорных соответственно);

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

132, 160, 180 — высота оси вращения, мм;

S; M; L — условная длина корпуса (короткая, средняя, длинная);

A; B — условная длина сердечника статора;

2; 4; 6; 8; 4/2; 8/4 — число полюсов;

ОМ исполнение двигателя;

1÷5 — категория размещения двигателя.

Для двигателей насосных модификаций с удлиненным концом вала в условном обозначении перед буквой Н ставится цифра 1.

Пример: ДММ160SA4ОМ5 — двигатель морской маломагнитный с высотой оси вращения 160 мм, с условной длиной корпуса S, условной длиной сердечника статора А, четырехполюсный, исполнения ОМ, категории 5.

Двигатели ДМ и ДММ имеют монтажные исполнения М100, М200, М300, а насосные модификации и двигатели ДМБ, ДММБ — также исполнение М220 (на лапах с двумя фланцами на щитах) и специальное исполнение с двумя фланцами на щитах без лап. Двигатели ДМО имеют исполнение только М101 (на лапах с двумя щитами).

Степень защиты всех двигателей - водозащищенное исполнение 1Р55. Соединение двигателя с приводным механизмом осуществляется посредством эластичной муфты, а при моноблочной системе — непосредственной насадкой рабочего колеса механизма на вал двигателя.

В двигателях применяются малошумные подшипники качения, один из которых имеет плавающую посадку. Для улучшения виброакустических характеристик наружные кольца подшипников поджаты в осевом направлении кольцевыми волнистыми пружинами. Провороту наружного кольца подшипника в ступице щита препятствует стопорное устройство, состоящее из пружин и болтов. Конструкция подшипниковых узлов двигателей позволяет заменять смазку подшипников без разборки двигателя.

Характерной особенностью двигателей серии ДМ является гарантированный уровень воздушного шума 75…80 дБ и гарантированные параметры надежности на период непрерывной работы без непосредственного обслуживания, а также общий ресурс и срок службы двигателей.

Электродвигатели серии МАП, ВМАП предназначены для привода судовых механизмов, работающих в кратковременных и повторно-кратковременных режимах работы. Электродвигатели серии ВМАП работают в условиях умеренного морского климата (температура окружающего воздуха от – 40 до + 40 ^{0} С) и устанавливаются в судовых помещениях, где периодически могут образовываться взрывоопасные смеси газов и паров легковоспламеняющихся жидкостей с воздухом, а также химически агрессивные среды (0,005 мг паров азотной кислоты на 1 л воздуха).

Электродвигатели серии МАП могут работать на судах неограниченного района плавания (температура окружающего воздуха от – 40 до + 45 ^{0} С).

Обозначение типоразмеров электродвигателей расшифровывается так:

МАП421- 4ОМ1 (М - морской; А - асинхронный; П – полюсно - переключаемый; 4- условный габарит по диаметру; 2- порядковый номер серии; 1 –условный габарит по длине; 4- число полюсов; ОМ- климатическое исполнение; 1- категория размещения);

ВМАП (В - взрывонепроницаемый; М - морской; А- асинхронный; П - полюсно-переключаемый).

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Двигатели этой серии должны иметь при необходимости достаточный диапазон регулирования частоты вращения. Это достигается использованием полюсопереключаемых или независимых обмоток статора. Наиболее важным требованием, предъявляемым к таким двигателям, является наименьшее значение динамического фактора, определяемого произведением ($GD^2 \cdot n^2$), где G — масса ротора, D — диаметр ротора, n — частота вращения ротора. Это требование обеспечивает хорошие динамические свойства и минимальные затраты энергии на разгон. С этой же целью используется переключение числа полюсов обмотки статора при постоянном моменте, т. е. с реализацией наибольшей мощности при наибольшей скорости.

Электродвигатели имеют два основных исполнения: с гладким стальным корпусом и с литым оребренным корпусом. Степень защищенности двигателей 1Р55 и 1Р56. Конструкция двигателей рассчитана на значительные механические перегрузки при пусках, торможениях и внешних ударных воздействиях.

Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется, как правило, из алюминиевого антикоррозионого сплава с повышенным удельным сопротивлением, а в отдельных случаях из медных стержней с прива- ренными латунными короткозамыкающими кольцами. Обмотки роторов выполняются с особой тщательностью для обеспечения высокой прочности и надежности. Особенностью конструкции двигателя является относительно малый диаметр ротора при большой глубине пазов статора, что позволяет размещать на статоре до трех отдельных обмоток и одновременно уменьшить момент инерции ротора.

Исполнение двигателей М101, М301, а также М201 (первый и второй габарит новой серии).

К электродвигателям серии МАП могут пристраиваться водозащищенные дисковые тормоза переменного тока серии ТМТ… ОМ1 или постоянного тока серии ТДП6А (для электрдвигателей 6-го габарита с внешним обдувом), которые монтируются на подшипниковых щитах электродвигателей со стороны, противоположной приводу.

Обозначение серии тормозов ТМТ…ОМ1 расшифровывается следующим образом: Т- тормоз; М - морской; Т - трехфазный; ОМ - климатическое исполнение; 1- категория размещения.

Условия работы тормозов аналогичны условиям работы электродвигателей серии МАП.

К электродвигателям серии ВМАП могут пристраиваться водозащищенные взрывонепроницаемые дисковые электромагнитные тормоза серии ВТМТ, условия работы которых аналогичны условиям работы электродвигателей. Обозначение серии тормозов ВТМТ расшифровывается следующим образом: В - взрывонепроницаемый; М- морской; Т- трехфазный.

Срок службы электродвигателей серии МАП и тормозов серий ТМТ и ТДП составляют не менее 25 лет, а электродвигателей серии ВМАП и тормозов серий ЕТМТ- 5 лет до капитального ремонта.

6.12. Вопросы для самопроверки и контроля знаний

1. Поясните принцип действия асинхронного двигателя (АД).
2. Что означает скольжение АД, запишите формулу для скольжения.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

3. Запишите уравнения равновесия ЭДС и изобразите схему замещения АД для холостого хода при неподвижном роторе.

4. Запишите уравнения равновесия ЭДС статора и вращающегося ротора АД.

5. Изобразите и поясните эквивалентную схему замещения ротора АД.

6. Поясните, каким образом осуществляется приведение обмотки неподвижного ротора к обмотке статора.

7. Изобразите и поясните схему замещения приведенного АД.

8. Запишите уравнения равновесия ЭДС и токов приведенного АД.

9. Изобразите и поясните векторную диаграмму приведенного АД.

10. Изобразите и поясните энергетическую диаграмму АД.

11. Запишите аналитическое выражение вращающегося электромагнитного момента АД и дайте его анализ.

12. Изобразите механическую характеристику АД и поясните наиболее характерные ее точки

13. Поясните, как зависит вращающий момент АД от активного сопротивления ротора и от подводимого напряжения?

14. Поясните, по какой причине возникает большой ток при пуске АД ?

15. Перечислите способы пуска АД.

16. Обьясните конструкцию АД с двухслойным ротором.

17. Сравните механические характеристики АД с к.з. и двухслойным роторами.

18. Какие проблемы возникают в работе АД при обрыве фазы обмотки статора ?

19. Какие проблемы возникают в работе АД при «вывернутой» фазе ?

20. Перечислите достоинства и недостатки регулирования скорости вращения АД изменением подводимого напряжения.

21. Перечислите достоинства и недостатки регулирования скорости вращения АД изменением активного сопротивления цепи ротора ?

22. Приведите схем включения 3-х фазных АД в однофазную сеть пр 3-х или 6-ти выводах обмотки статора.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 7. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

7.1. Принцип действия, устройство и классификация синхронных машин

7.1.1. Общие сведения о синхронных машинах

Синхронной машиной (СМ) называется такая электрическая машина переменного тока, скорость вращения ротора n которой во всех режимах работы находится в строго постоянном отношении к частоте сети f и определяется выражением

$$n = \frac{60\,f}{p}\ , \qquad (7.1)$$

где p — число пар полюсов магнитной системы ротора.

Другими словами, скорости вращения ротора и магнитного поля, создаваемого обмоткой статора СМ, равны и в отличие от асинхронных машин, скорость вращения ротора n синхронных машин не зависит от нагрузки.

Синхронная машина, так же как машина постоянного тока и асинхронная, обратима, то есть может работать как генератором, так и двигателем. Наибольшее распространение она получила в качестве трехфазного синхронного генератора (СГ) переменного тока. Этот тип генераторов является основным источником электрической энергии промышленных и судовых электростанций переменного тока. Чаще всего трехфазная обмотка размещается на неподвижном статоре, а обмотка возбуждения - на вращающемся роторе. Синхронные машины специального назначения малой мощности (2…5 кВт) иногда изготовляются в обращенном исполнении с обмоткой возбуждения на статоре и трехфазной обмоткой на роторе. Основное исполнение предпочтительнее, так как мощность возбуждения, подводимая к обмотке возбуждения через скользящие контакты, составляет 0,3…2% преобразуемой мощности, тогда как в обращенном исполнении через эти контакты нужно снимать практически полную мощность машины. В синхронных микромашинах и машинах специального исполнения для возбуждения часто используются постоянные магниты.

Преимущественное применение синхронные машины имеют в качестве генераторов с турбо- или гидроприводом. В судовых электроэнергетических системах в качестве основных и аварийных источников электроэнергии применяются дизель-генераторы.

В крупных промышленных установках (поршневые компрессоры, воздуходувки и др.) применяются синхронные двигатели. Их преимущество перед асинхронными двигателями заключается главным образом в том, что они не потребляют, а генерируют в сеть реактивную мощность, повышая, таким образом, общий коэффициент мощности системы.

Все синхронные машины, выпускаемые в нашей стране, рассчитаны на частоту f = 50 Гц, которая достигается при определенной частоте вращения ротора n в зависимости от числа пар полюсов обмотки статора

$$\mathrm{f} = \frac{pn}{60}\,. \qquad (7.2)$$

Таким образом, значения p и n строго стандартизированы:

p,		1	2	3	4	8	16	32	64
n,	об/мин	3000	1500	1000	750	375	187,5	93,7	46,9

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Турбогенераторы выполняются в основном на 3000, реже на 1500 об/мин. Частота вращения гидрогенераторов составляет от 600 до 46,9 об/мин в зависимости от мощности турбины и напора воды. Дизель-генераторы рассчитываются, как правило, на 375…1500 об/мин.

Синхронные двигатели выпускаются с мощностями от 100 кВт до десятков тысяч киловатт с частотами вращения от 3000 до 93,7 об/мин.

Освоен также выпуск синхронных микродвигателей различных типов в широком диапазоне частот вращения (от нескольких оборотов до 3000 об/мин) и мощностей (от долей ватта до нескольких сотен Вт).

Для компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах выпускаются синхронные компенсаторы на мощности от 15 до 160 МВ·А при частотах вращения 750…1000 об/мин.

Номинальное напряжение обмотки статора синхронных машин также стандартизовано и составляет: для генераторов — 230 и 400 В; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75, кВ; для двигателей — 220 и 380 В; 3; 6 и 10 кВ. Номинальное напряжение обмотки возбуждения составляет от 24 до 400 В. Синхронные генераторы автономных источников имеют, как правило, номинальное напряжение 230 и 400В. Специальные генераторы выполняются на частоту 400 или 500 Гц.

Прообразом современных СМ является генератор, созданный в 1878 году нашим соотечественником П.Н. Яблочковым для питания знаменитых «свечей Яблочкова».

В настоящее время Украина занимает ведущие позиции среди других стран в вопросах теории и проектирования СМ, а в электромашиностроительной промышленности нашей страны реализованы самые современные технологические процессы их производства.

7.1.2. Принцип действия синхронного генератора

В основе работы синхронного генератора лежит закон электромагнитной индукции. Для индуктирования в проводниках статорной обмотки СГ синусоидальной по форме ЭДС

$$e = B\ell v \qquad (7.3)$$

необходимо, чтобы магнитная индукция B в воздушном зазоре между ротором и статором СГ по длине окружности имела синусоидальный закон распределения, то есть

$$B = B_m \cdot \sin\frac{\pi}{\tau}x \quad , \qquad (7.4)$$

где τ – полюсное деление (часть окружности, приходящаяся на один полюс), а $x = \upsilon t$; B_m – максимальная индукция магнитного поля в воздушном зазоре; ℓ – активная длина проводника статорной обмотки; υ – нормальная составляющая скорости движения проводника статорной обмотки относительно магнитного поля в воздушном зазоре.

Такое синусоидальное в пространстве магнитное поле создается в СГ за счет конструктивных особенностей ротора, что было показано в главе 5. Частота изменения этой ЭДС определяется формулой

$$f = \frac{pn}{60}$$

Действующее значение ЭДС фазы E_0 рассчитывается по формуле

$$E_0 = 4{,}44 f W k_{об} \Phi_m \, , \qquad (7{,}5)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

где w – число последовательно соединенных витков в обмотке фазы; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент ($k_{об} < 1$ из-за того, что обмотка имеет укороченный шаг и распределена по нескольким пазам фазной зоны зубцового слоя статора); Φ_m – полный магнитный поток пары полюсов.

В трехфазном СГ действующее значение ЭДС во всех фазных обмотках должно быть одинаково.

Поскольку фазы обмотки статора сдвинуты в пространстве на 120° электрических, то и ЭДС фаз имеют сдвиг в 120° электрических. При соединении фаз в звезду (Y) или треугольник (∇) из соотношения

$$E_m[\sin\omega t + \sin(\omega t + 120^0) + \sin(\omega t - 120^0)] \qquad (7.6)$$

следует, что алгебраическая сумма трех ЭДС фаз в каждый момент времени равна нулю и при разомкнутой внешней цепи ток в обмотке статора равен нулю.

Из формул (7.4) и (7.5) видно, что изменение частоты можно получить за счет изменения скорости вращения ротора *n*, а изменение ЭДС фазы E_0 (при f = const) — изменяя величину тока в обмотке возбуждения, то есть за счет изменения магнитного потока ротора Φ_m.

При подключении потребителей к обмоткам трехфазного синхронного генератора, по ним проходят переменные токи, создающие вращающееся магнитное поле статора. Число полюсов этого поля всегда равно числу полюсов ротора, а скорость его вращения равна скорости ротора, таким образом в установившемся режиме работы СГ под нагрузкой поля ротора и статора неподвижны относительно друг друга и разноименные полюса этих полей имеют магнитное притяжение, причем ось результирующего магнитного поля смещена на некоторый угол относительно оси полюсов ротора, который тем больше, чем больше нагрузка СГ.

В СГ в процессе взаимодействия магнитных полей ротора и статора поле ротора является «ведущим», а поле статора «ведомым», в машине действует электромагнитный момент, который направлен навстречу вращению ротора, то-есть. является тормозным и должен преодолеваться первичным двигателем СГ (турбиной, дизелем и т. п.,).

На Европейском континенте принята частота f = 50 Гц, поэтому СГ в зависимости от числа пар полюсов, определяемого конструкцией, может иметь только вполне определенную скорость вращения (см. формулу 7.4). Например, СГ Днепровской ГЭС имеют $p = 72$ и их синхронная скорость вращения составляет $n = 41{,}66$ об/мин., а на современных тепловых и атомных злектростанциях устанавливаются, в основном, двухполюсные турбогенераторы на 3000 об/мин., реже – на 1500 об/мин.

7.1.3. Классификация синхронных машин

На судах синхронные машины классифицируются по следующим признакам:

а) по назначению — синхронные генераторы, синхронные двигатели, синхронные компенсаторы;

б) по числу фазных обмоток на статоре — однофазные, трехфазные, многофазные;

в) по конструкции ротора — явнополюсные, неявнополюсные;

г) по способу возбуждения – с независимым возбуждением, с самовозбуждением, с контактными кольцами и бесщеточные;

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

д) по типу первичного двигателя — турбогенераторы, гидрогенераторы, дизель-генераторы;

е) по номинальным данным — мощность, частота, скорость вращения, напряжение;

ж) по способу охлаждения – с воздушным, с газовым (водород, гелий), с водяным, комбинированные, криогенные.

В последующем изложении мы будем иметь в виду трехфазные СМ (с указанием назначения), явнополюсные и неявнополюсные (с указанием на это при необходимости) и безотносительно к остальным классификационным признакам.

7.1.4. Устройство синхронных машин

Конструктивно синхронная машина, подобно другим электрическим машинам, состоит из двух частей – якоря, несущего обмотку, и индуктора, на котором располагаются полюсы для создания магнитного поля возбуждения. В обмотке якоря индуктируется ЭДС и протекает ток нагрузки, то есть именно в этой части происходит преобразование энергии. В общем случае неподвижная часть машины переменного тока называется статором (якорем), а вращающаяся часть – ротором. Каждая из этих двух основных частей содержит по нескольку конструктивных элементов.

На рисунке 7.1 показано устройство судового СГ серии МСС с обозначением основных элементов.

Корпус вместе с торцевыми щитами является несущей конструкцией для всех частей машины. Корпус судового синхронного генератора выполняется брызгонепроницаемым или брызгозащищенным. К корпусу крепятся воздуховоды для подвода и отвода охлаждающего воздуха. Для машин морского исполнения корпус, подшипниковые щиты или стояки выполняются стальными. В случае применения подшипников качения подшипниковые щиты и корпусы подшипников исполняются разъемными, что допускает промывку подшипников и замену консистентной смазки без съема подшипников с вала и разборки машины. Все внешние кабели подводятся к выводным зажимам через сальники.

Сердечник статора закрепляется в корпусе машины и служит магнитопроводом для основного магнитного потока. Сердечник набирается из отдельных листов или сегментов электротехнической стали, имеющих на внутренней окружности пазы. Эти листы штампуются из рулонной стали толщиной 0,5 мм и покрываются с обеих сторон изоляционным лаком.

Такая конструкция сердечника необходима для уменьшения потерь от вихревых токов, индуктируемых переменным (вращающимся) магнитным полем.

В пазы сердечника укладывается трехфазная обмотка, которая в современных машинах выполняется двухслойной.

Обмотка целиком пропитывается специальными компаундами и просушивается в печах при определенных температурах, что повышает электрическую прочность, теплопроводность изоляции и уменьшает ее гигроскопичность, а также скрепляет элементы изоляции, повышая ее механическую прочность.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

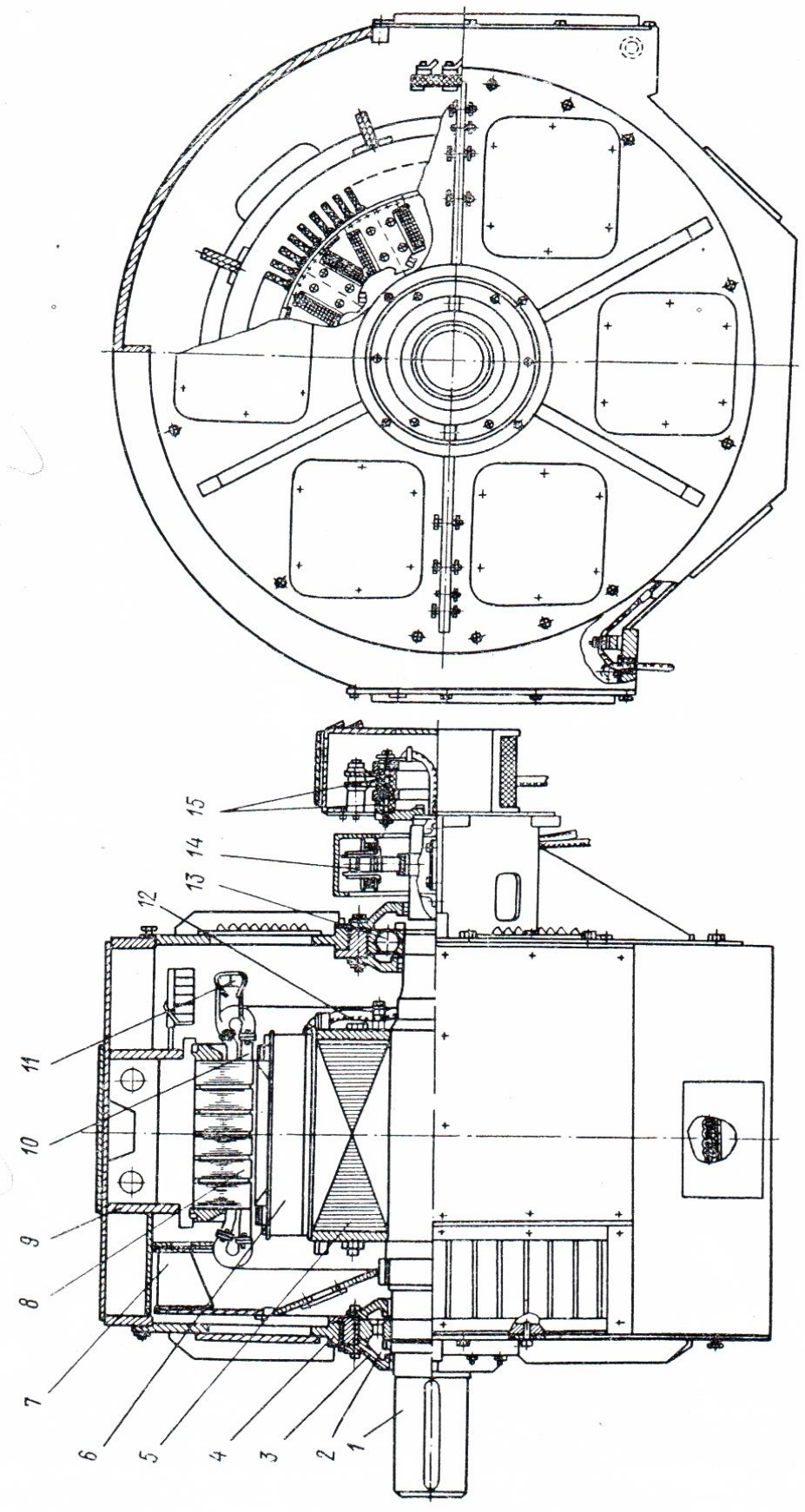


Рисунок 7.1 – Устройство судового синхронного генератора

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В крупных машинах пропитываются отдельные стержни обмотки. Для этой же цели применяется многоразовая пропитка компаундами при одновременном вакуумировании пропиточной камеры, причем ввиду отсутствия в них летучих растворителей заполнение пор изоляции при компаундировании получается более совершенным. Поверхность изоляции обмоток покрывается изоляционными эмалями.

Как отмечалось в главе 5, по конструкции ротора в зависимости от скорости вращения синхронные машины разделяются на два основных типа: явнополюсные, т. е. машины с явно выраженными полюсами, и неявнополюсные. Если машина имеет одну пару полюсов p = 1, то для получения стандартной частоты f= 50 гц скорость вращения ротора должна быть 3000 об/мин. При такой скорости вращения машин большой мощности с большим диаметром ротора окружная скорость на поверхности ротора достигает в судовых турбогенераторах 90…100 м/сек, а стационарных 160 м/сек. Развивающиеся при этих скоростях центробежные силы создают в отдельных частях ротора весьма большие механические напряжения, поэтому изготовление для таких скоростей явнополюсных роторов с достаточной механической прочностью невозможно. Для таких скоростей применяются неявнополюсные роторы, изготовленные из цельной цилиндрической стальной поковки высокой прочности, в которой для снятия внутренних напряжений и контроля качества по всей длине ротора просверливают центральное отверстие.

На цилиндрической поверхности такого ротора в осевом направлении фрезеруются пазы, в которые укладывается обмотка возбуждения и закрепляется в пазах при помощи металлических клиньев, изготовляемых из немагнитных сплавов.

Лобовые части обмотки ротора, на которые также воздействуют большие центробежные силы, крепятся стальными массивными бандажами.

Обмотка возбуждения распределяется не по всей окружности цилиндрического ротора; примерно третья часть окружности остается свободной от пазов, образуя два так называемых больших зуба. Такое расположение обмотки возбуждения обусловливает практически синусоидальное распределение магнитного поля ротора, и вследствие этого достигается синусоидальное изменение во времени ЭДС обмотки статора.

Явнополюсные машины проще в изготовлении, поэтому при числе пар полюсов $p \geq 2$ синхронные машины стремятся выполнять с явнополюсным ротором. Полюс у роторов, как правило, набирается из отдельных штампованных листов конструкционной стали толщиной 1…2 мм. Листы стягиваются в пакет шпильками. Полюсы крепятся к остову ротора Т-образными хвостовиками и клиньями. Очертание полюсного наконечника (башмака) обеспечивает синусоидальное распределение МДС ротора (см.главу 5).

Обмотка возбуждения явнополюсных роторов выполняется в виде цилиндрических катушек прямоугольного сечения. Катушки обмотки возбуждения размещены на сердечниках полюсов и укреплены полюсными наконечниками. В машинах большой мощности катушки наматываются из полосовой меди на ребро, отдельные витки обмотки изолируются друг от друга. Мощность, необходимая для возбуждения генератора, не превышает 3…5% от его номинальной мощности.

Питание обмотки возбуждения может осуществляться от любого источника постоянного тока, часто для этой цели используются ге-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

нераторы постоянного тока малой мощности, которые размешаются на одном валу с синхронным генератором.

В настоящее время широкое применение находят генераторы с самовозбуждением серий МСС, МСК, БСГ, у которых обмотка возбуждения питается от обмотки статора через полупроводниковые выпрямители. Явнополюсные роторы кроме обмоток возбуждения имеют успокоительную (демпферную) обмотку, назначением которой является гашение колебаний ротора при переходных процессах и при режимах несимметричной нагрузки генератора. Успокоительная обмотка выполняется из медных стержней, которые закладываются в пазы полюсных наконечников и по торцам замкнуты кольцами, в результате чего получается короткозамкнутая обмотка в виде «беличьей клетки».

В неявнополюсных машинах функции успокоительной обмотки наполняет массивный сердечник ротора и массивные бандажи на лобовых частях обмотки возбуждения.

К другим важным элементам конструкции СМ относятся:

- подшипниковые щиты, которые присоединяются к торцам станины на болтах и служат для размещения подшипников, и в которых вращается вал ротора;

- щеточное устройство, необходимое для обеспечения подвода постоянного тока к вращающейся обмотке возбуждения, уложенной на роторе;

- клеммная коробка, в которой размещены шесть выводов от трех фаз обмотки статора (они обозначены: C_1 — C_4, C_2 — C_5, C_3— C_6) и два вывода обмотки ротора (обозначены p_1, p_2); в ней осуществляется соответствующее соединение фазных обмоток и соединение СМ с внешними сетями переменного тока.

7.1.5. Особенности устройства бесщеточного синхронного генератора

Контактные кольца и щеточные узлы генераторов, также как и коллекторы в машинах постоянного тока, являются «слабыми» элементами конструкции, так как требуют постоянного внимания, изнашиваются в процессе работы, подвержены дефектам и, кроме того, загрязняют машину угольной пылью. В бесщеточных генераторах эти элементы отсутствуют за счет использования возбудителей, в качестве которых применяют обращенную машину переменного тока (рисунок 7.2).

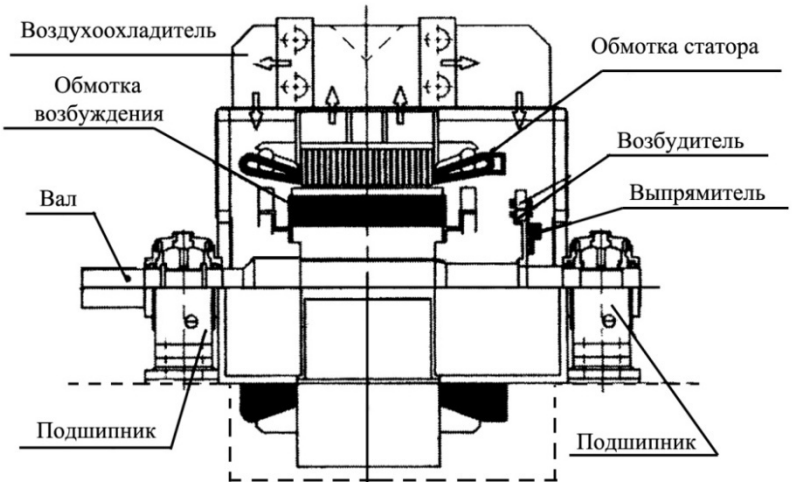


Рисунок 7.2 – Основные элементы устройсва бесщеточного СГ

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В отличие от генератора, у возбудителя обмотка переменного тока располагается на роторе, а обмотка возбуждения - на статоре. Для питания обмотки возбуждения генератора постоянным током на роторе смонтирован выпрямитель.

В качестве примера судового бесщёточного синхронного генератора на рисунке 7.3 приведена конструктивная схема СГ фирмы Brushless alternator System, где он конструктивно объединён с возбудителем переменного тока и вращающимися выпрямителями в один агрегат.

Возбудитель (Exciter Rotor (3-Phase)) имеет трёхфазную обмотку, нетипично смонтированную на роторе и магнитные полюса (fixed poles), установленные отдельно от статора на станине (in the casing) машины. Катушки полюсов питаются постоянным током от автоматического регулятора напряжения (AVR). При вращении ротора в трёхфазной обмотке возбудителя наводится ЭДС, которая выпрямляется трёхфазным мостом (Rectifier), смонтированным на валу машины, подавая питание прямо на обмотку главных полюсов синхронного генератора (Alternator Rotor Poles). Как видно, в этой системе отсутствуют контактные кольца и щёточный аппарат.

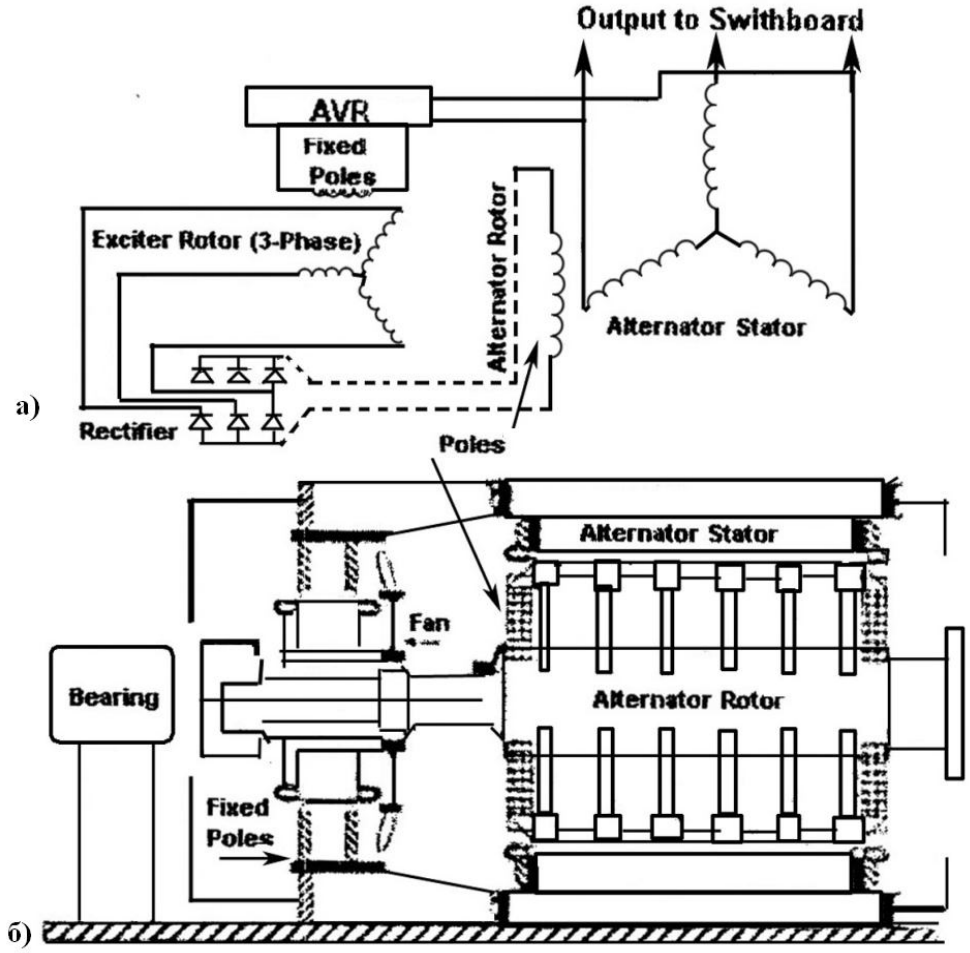


Рисунок 7.3 - Конструктивная и электрическая схемы судового бесщеточного синхронного генератора Brushless altenator System

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

7.2. Реакция якоря в синхронном генераторе при симметричной нагрузке

7.2.1. Общее представление о реакции якоря

В режиме холостого хода СГ его ротор вращается, по обмотке возбуждения протекает постоянный ток, в фазных обмотках статора индуктируется переменная во времени ЭДС, но потребители к обмотке статора не подключены и поэтому ток статора равен нулю. Этот режим является обычно подготовительным к подключению нагрузки.

Обмотка возбуждения с током создает МДС и магнитное поле, которое в СГ называется основным. Величина основного магнитного потока Φ_0 определяется током возбуждения $I_в$ и связана с ним типичной для магнитных цепей нелинейной зависимостью. Конструкция роторов СГ обеспечивает весьма близкое к синусоидальному распределение магнитной индукции основного поля по окружности воздушного зазора между сердечниками ротора и статора. При неизменной скорости вращения ротора в каждом проводнике обмотки статора индуктируется синусоидальная во времени ЭДС определенной частоты. Действующее значение этой ЭДС в фазе обмотки статора определяется формулой (7.5)

$$E_0 = 4{,}44 f W k_{об} \Phi_m .$$

При подключении к трехфазному СГ симметричной нагрузки в обмотках всех фаз статора под действием индуктируемых в них ЭДС E_0 протекают токи I_a, которые своей намагничивающей силой F_a создают поле статора Φ_a. Это поле вращается в ту же сторону и с той же скоростью, что и ротор со своим магнитным полем Φ_o и мдс F_a. Таким образом, обе намагничивающие силы — ротора F_0 и статора F_a и создаваемые ими магнитные потоки Φ_0 и Φ_a неподвижны относительно друг друга и расположены друг к другу разноименными полюсами. С другой стороны, можно считать, что они образуют результирующую намагничивающую силу $F_{рез}$ и результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$.

Воздействие магнитного поля статора (якоря) на магнитное поле ротора в СГ называют реакцией статора, или, чаще, реакцией якоря (РЯ).

Так как в установившемся режиме работы СГ поля статора и ротора взаимно неподвижны, то для оценки влияния РЯ на величину и характер распределения поля возбуждения выбирают такой момент, когда ток в одной из фаз достигает амплитудного значения I_m, так как в этот момент ось магнитного поля статора совпадает с осью этой фазы.

Явление реакции якоря в СГ сложнее, чем в генераторах постоянного тока, так как не только величина тока нагрузки СГ, но и характер нагрузки (cos φ) определяют результат проявления РЯ. Методика количественной оценки роли РЯ различна для неявнополюсного и явнополюсного СГ.

7.2.2. Реакция якоря в СГ при различных по характеру нагрузках

Рассмотрим качественно действие РЯ при различных по характеру нагрузках, при этом определим взаимное направление магнитных потоков Φ_0 и Φ_a и величину $\Phi_{рез}$ по сравнению с величиной Φ_0.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

1-й случай. Угол сдвига фаз между E_0 и током I_a равен нулю ($\psi = 0$).

Этот случай, если пренебречь внутренним сопротивлением фазы СГ, соответствует чисто активной нагрузке *($z_н = r_н$)* Для наглядности изобразим упрощенный разрез СГ (рисунок 7.4,а), на котором три фазные обмотки показаны шестью проводниками *(A-X, B-Y, C-Z),* а ротор — двухполюсным, считая его вращающимся по часовой стрелке. Ось

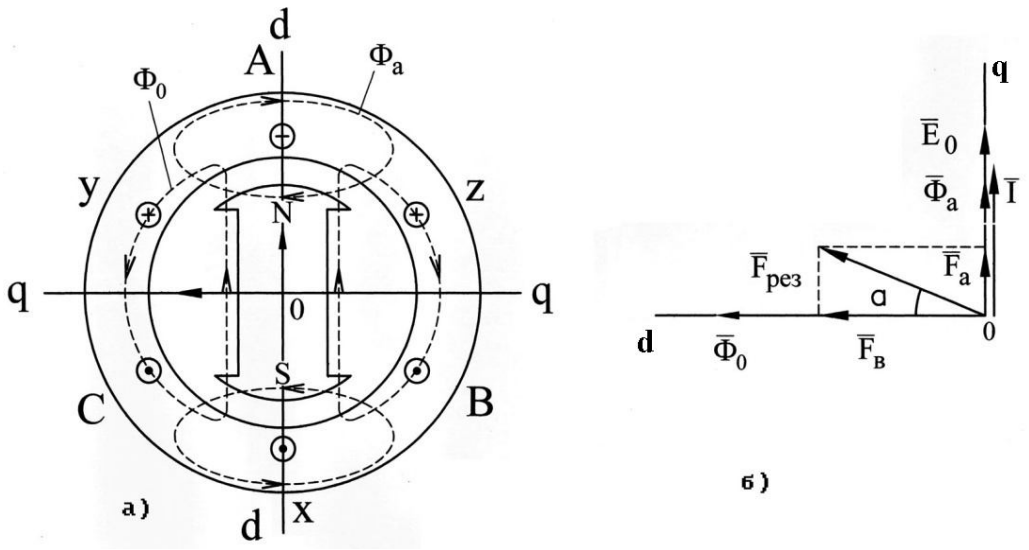


Рисунок 7.4 – Реакция якоря СГ при чисто активной нагрузке

полюсов ротора (продольную ось) обозначим *d — d,* а перпендикулярную ей (поперечную ось) *q-q*.

Положение ротора на рисунке 7.4 соответствует нагрузке СГ с углом $\psi = 0$, при условии, что в фазе А - Х ток имеет амплитудное значение. В этом случае основной магнитный поток Φ_0 направлен по оси *d — d* (он так направлен вне зависимости от угла ψ), а намагничивающая сила F_a и магнитный поток Φ_a совпадают с осью катушки фазы А - Х и направлены по поперечной оси *q*. Сказанное иллюстрируется векторной диаграммой (рисунок 7.4,б). На ней основной магнитный поток Φ_0 и создающая его намагничивающая сила $F_в$ направлены по оси *d — d,* ЭДС E_0 отстает от потока Φ_0 на 90, ток *I* совпадает по фазе с E_0 ($\psi = 0$), то есть направлены по оси *q — q*. Намагничивающая сила обмоток статора F_a и создаваемый ею магнитный поток Φ_a, совпадают по фазе с током *I* (что соблюдается всегда, вне зависимости от значения угла ψ). Так как F_a и Φ_a в рассмотренном случае совпадают с поперечной осью *q — q,* реакция якоря при $\psi = 0$ называется поперечной.

На рисунке. 7.4 условно показаны магнитные силовые линии основного потока Φ_0 и потока статора (потока реакции якоря) Φ_a; они совпадают по направлению на одном краю полюса (сбегающем) и встречно направлены на другом крае (набегающем), т. е. магнитная индукция результирующего поля усиливается под одним краем и ослабляется под другим краем полюса. За счет этого происходит нарушение симметрии распределения индукции результирующего магнитного поля относительно оси полюсов ротора, однако закон распределения индукции вдоль зазора останется синусоидальным с амплитудой $B_{рез\cdot m}$, примерно такой же, как и $B_{от}$, то есть можно считать, что при нагрузке с $\psi = 0$, поперечная реакция якоря практически не изменяет величины $\Phi_{рез}$, по сравнению с Φ_0, если магнитная цепь СГ не насы-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

щена. При насыщенной магнитной цепи, как и в генераторе постоянного тока, ослабление поля под одним краем полюса больше, чем его увеличение под другим краем, поэтому результирующее поле ослабляется.

Отметим также, что на проводники обмотки статора с током I_a в магнитном поле с потоком $\Phi_{рез}$ действуют электромагнитные силы, направление которых можно определить по правилу левой руки. При нагрузке СГ с углом $\psi = 0$ все электромагнитные силы действуют на проводники статора согласно, создавая электромагнитный момент, но так как статор неподвижен, то этот момент стремится затормозить вращение ротора и на преодоление этого момента затрачивается соответствующий момент первичного двигателя.

2-й случай. Угол сдвига фаз между ЭДС и током якоря равен $\psi = \frac{\pi}{2}$ (ток отстает от ЭДС на 90^0).

Этот случай соответствует чисто индуктивной нагрузке. Как и в 1-м случае ток в фазе А - Х имеет амплитудное значение и направление, как показано на рисунке 7.5, а. При угле $\psi = \frac{\pi}{2}$ максимальная ЭДС такого же направления будет в проводнике обмотки статора, расположенном в пространстве со сдвигом на 90° в сторону вращения ротора. Исходя из этого на рисунке 7.5, а показано соответствующее положение ротора. Как видно, поток статора Φ_a направлен по продольной оси d — d навстречу потоку Φ_0, т.е. размагничивает машину. Это же отражается и на векторной диаграмме рисунка 7.5, б. Поэтому при угле

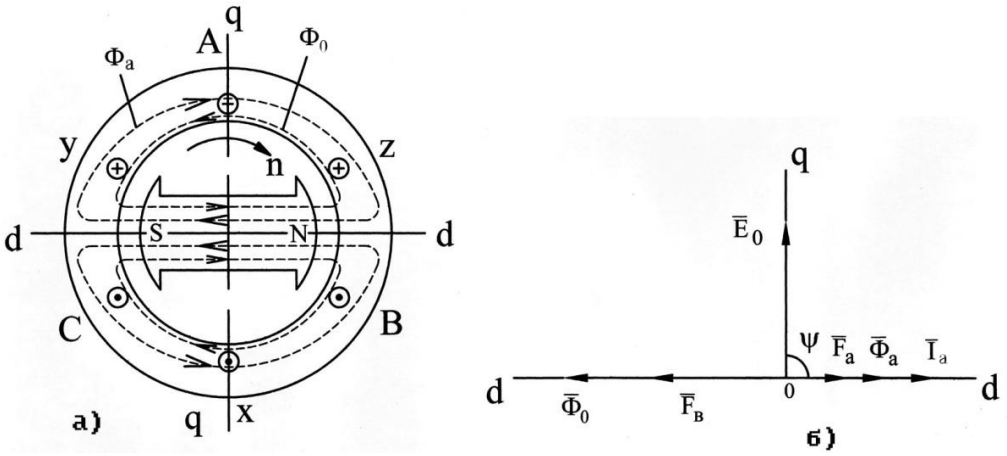


Рисунок 7.5 – Реакция якоря СГ при индуктивной нагрузке

$\psi = \frac{\pi}{2}$ реакция якоря называется продольно размагничивающей, а результирующий магнитный поток при нагрузке с углом $\psi = \frac{\pi}{2}$ за счет РЯ тем меньше, чем больше ток I_a и поток Φ_a реакции якоря.

При нагрузке СГ с $\psi = \frac{\pi}{2}$ на каждый проводник с током обмотки статора, находящийся в основном магнитном поле, действует электромагнитная сила, но, как видно из рисунка 7.5, под каждым полюсом ротора одна и вторая половины проводников обмотки якоря имеют

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

разные направления тока, поэтому равнодействующая электромагнитных сил равна нулю и электромагнитный момент не создается.

3-й случай. $\psi = -\frac{\pi}{2}$ - этот случай теоретически возможен при чисто емкостной нагрузке, однако теперь направление магнитного потока якоря Φ_a совпадает с осью d — d и с направлением магнитного потока Φ_0.

РЯ в этом случае называется продольной намагничивающей, а результирующий магнитный поток оказывается больше, чем основной (рисунок 7.6). Как и в случае с $\psi = \frac{\pi}{2}$ в СГ не создается электромагнитного момента.

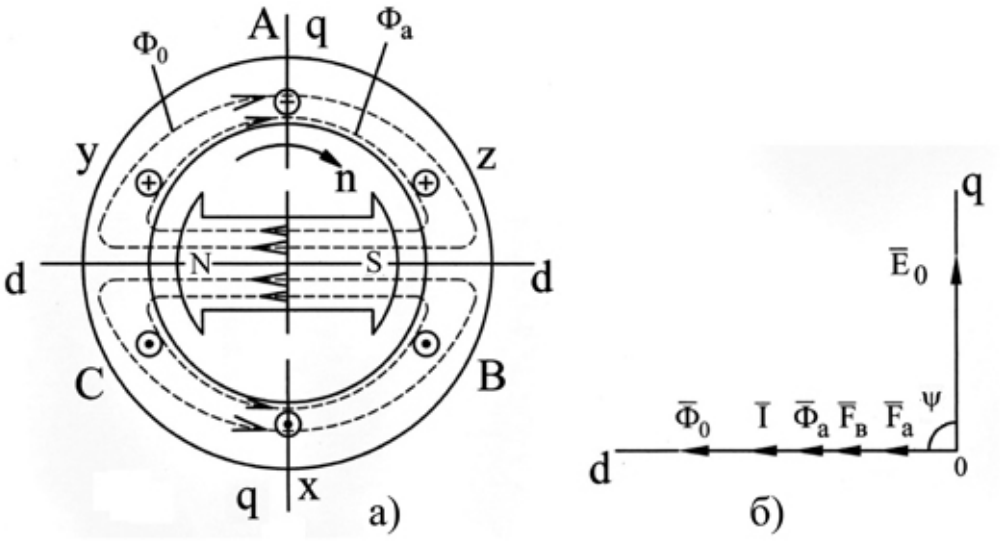


Рисунок 7.6 – Реакция якоря СГ при емкостной нагрузке

4-й случай. В реальном режиме работы СГ его нагрузка, как правило, бывает активно-индуктивной, то есть $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$. Теоретически возможна и нагрузка активно-емкостная, то есть $0 > \psi > -\frac{\pi}{2}$.

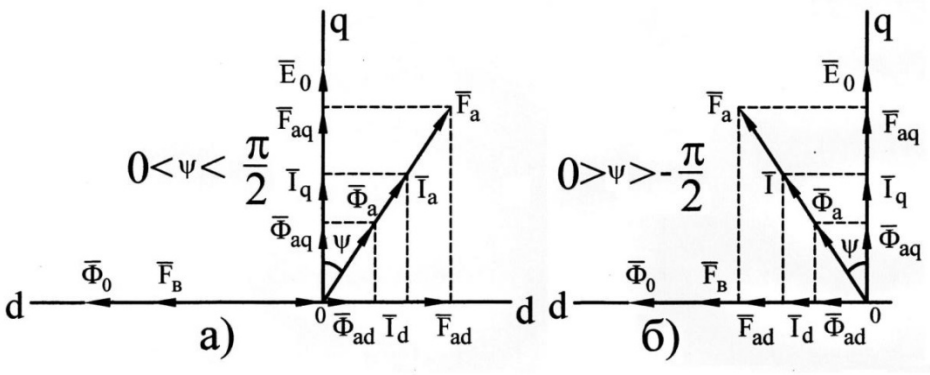


Рисунок 7.7 – Реакция якоря СГ при смешанной нагрузке

Рассматривая характер РЯ при таких смешанных нагрузках с помощью векторных диаграмм (рисунок 7.7), удобно разложить ток I_a

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

и МДС статорной обмотки F_a на две составляющие, одну - по поперечной оси (I_q и F_{aq}) и вторую – по продольной оси (I_d и F_{ad})

$$I_q = I_a \cos\psi, \quad I_d = I_a \sin\psi \tag{7.8}$$

и учитывать РЯ от каждой из этих составляющих или, как принято говорить, подходить к анализу с позиций теории двух реакций.

Очевидно, что для активно-индуктивной нагрузке РЯ будет и поперечной, и продольно-размагничивающей, и за счет этого результирующий магнитный поток может быть меньше основного. А для нагрузок активно-емкостных РЯ будет и поперечной, и продольно-подмагничивающей, а результирующий магнитный поток - больше основного.

Количественный учет реакции якоря в синхронных машинах составляет очень важную часть их проектирования, и построения систем управления и регулирования, так как является обычно главной причиной изменения напряжения при изменении нагрузки.

7.3. Параметры СГ в установившемся режиме работы

7.3.1 Составляющие магнитных потоков

При работе СМ под нагрузкой МДС реакции якоря F_a кроме магнитного потока Φ_a (поток реакции якоря), который через воздушный зазор проникает в ротор и взаимодействует с магнитным потоком возбуждения Φ_0, создает еще сравнительно небольшой поток, который замыкается только вокруг проводников обмотки статора и называется потоком рассеяния Φ_s. Оба эти потока (Φ_0 и Φ_s) вращаются с синхронной скоростью, пересекают проводники обмотки статора и индуктируют в них ЭДС, соответственно ЭДС реакции якоря E_a и ЭДС рассеяния E_s, которые при $\mu_0 = const$ пропорциональны не только магнитным потокам, но и МДС и току якоря I_a. Коэффициент пропорциональности между ЭДС и током имеет, как отмечалось выше, размерность сопротивления; в цепях переменного тока этим коэффициентом является индуктивное сопротивление x, поскольку ЭДС E_a и ток I_a, создающий магнитный поток Φ_a, сдвинуты по фазе на угол 90^o.

7.3.2. Индуктивное сопротивление рассеяния

Поля рассеяния образуются (рисунок 7.8):

- в пазовой части обмотки статора, замыкаясь через паз и сталь статора, не проходя в воздушный зазор - это пазовое рассеяние;
- в зубцовой части статора, замыкаясь через воздушный зазор и наконечники зубцов – зубцовое рассеяние;
- в лобовых частях обмотки статора, замыкаясь только по воздуху – лобовое рассеяние.

В основу определения магнитного потока рассеяния положено понятие магнитной проводимости λ_s, которая определяется составляющими магнитной проводимости основных путей замыкания потоков рассеяния.

ЭДС рассеяния обмоток СМ, подобно обмоткам трансформатора и АД, определяется из соотношения

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\dot{E}_s = -jx_s\dot{I}_a \qquad (7.9)$$

где x_s - индуктивное сопротивление рассеяния, которое рассчитывается по специальным формулам, например

$$x_s = 2\pi f L_s = 4\pi\mu_0 W_1 \frac{l_s}{pq_1}\lambda_s \qquad (7.10)$$

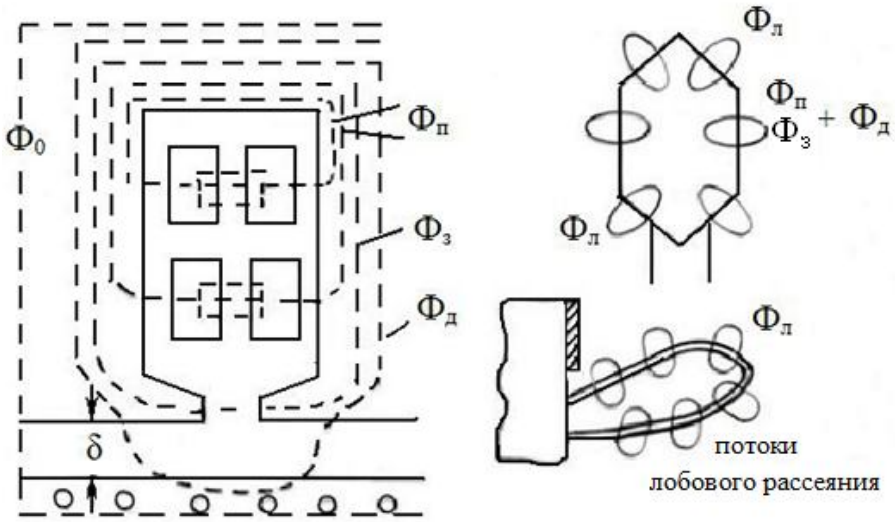


Рисунок 7.8 – Основной магнитный поток Φ_0 и потоки рассеяния СМ

Таким образом, как и ранее, реально существующий магнитный поток рассеяния Φ_s учитывается условным параметром x_s, а индуктируемая в обмотке статора этим магнитным потоком ЭДС E_s учитывается уравновешивающим её падением напряжения - $jx_s\dot{I}_a$.

7.3.3. Индуктивное сопротивление реакции якоря

ЭДС E_a, которая наводится в обмотке статора полем реакции якоря Φ_a и является ЭДС самоиндукции, может быть выражена в виде соотношения

$$\dot{E}_a = -jx_a\dot{I}_a \qquad (7.11)$$

где x_a - индуктивное сопротивление, обусловленное действием магнитного потока всех трех фаз и называемое сопротивлением реакции якоря (главным индуктивным сопротивлением якоря), которое рассчитывается по формуле

$$x_a = 2\pi L_a = \frac{4m_1\mu_o f_1(W_1 k_{об1})^2}{\pi p}\lambda_\delta, \qquad (7.12)$$

где $\lambda_\delta = \frac{\tau l_\delta}{\delta K_\delta}$ – коэффициент проводимости равномерного воздушного зазора на один полюс.

Для явнополюсного генератора составляющие ЭДС E_{ad} и E_{aq} представляются в виде соотношений

$$\dot{E}_{ad} = -jx_{ad}\dot{I}_a = -jx_{ad}\dot{I}_a \sin\psi \qquad (7.13)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\dot{E}_{aq} = -jx_{aq}\dot{I}_a = -jx_{aq}\dot{I}_a \cos\psi \qquad (7.14)$$

где x_{aq} и x_{ad}- индуктивные сопротивления реакции якоря по поперечной и продольной осям

$$x_{aq} = 2\pi f L_{aq} = \frac{4\mu_0 m_1 f_1 (W_1 k_{об1})^2}{\pi p}\lambda_{aq} \qquad (7.15)$$

$$x_{ad} = 2\pi f L_{ad} = \frac{4\mu_0 m_1 f_1 (W_1 k_{об1})^2}{\pi p}\lambda_{ad} \qquad (7.16)$$

где $\lambda_{aq} = k_q \frac{\tau \ell_\delta}{\delta k_\delta}$ и $\lambda_{ad} = k_d \frac{\tau \ell_\delta}{\delta k_\delta}$ - магнитные проводимости, k_q и k_d - коэффициенты проводимости зазора по поперечной и продольной осям. (7.17)

Поскольку поток реакции якоря и поток рассеяния создаются одним и тем же током якоря I_a, то учитывающие их действие индуктивные сопротивления обычно объединяют и записывают в виде суммы:

- для неявнополюсного СГ

$$x_c = x_a + x_s \qquad (7.18)$$

называемое синхронным индуктивным сопротивлением;

- для явнополюсного СГ в виде составляющих:

$$x_q = x_{aq} + x_s \qquad (7.19)$$

и

$$x_d = x_{ad} + x_s \qquad (7.20)$$

называемых синхронным индуктивным сопротивлением по поперечной и продольной осям соответственно.

7.3.4. Активное сопротивление фазы статора

К параметрам схемы замещения СМ относят также активное сопротивление обмотки якоря r_a, которое определяет потери энергии в якоре, при этом можно записать

$$\dot{E}_a = -r_a \dot{I}_a \qquad (7.21)$$

Названные параметры в установившихся режимах работы СГ позволяют применять к СГ теорию электрических цепей, показывать схемы замещения, составлять уравнения равновесия ЭДС, строить их векторные диаграммы и таким образом анализировать рабочие свойства СГ и его поведение в различных режимах.

7.3.5. Схема замещения неявнополюсного СГ

С учетом обозначенных выше параметров, относящихся к цепи якоря СГ, полная схема замещения фазы обмотки якоря может быть представлена в виде (рисунок 7.9 а), где $z_н$ - полное сопротивление нагрузки.

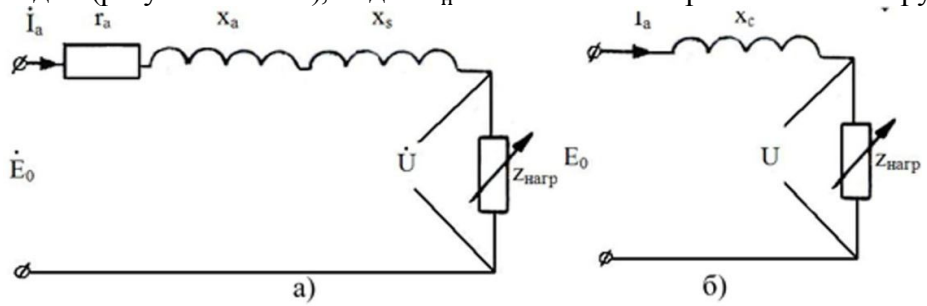


Рисунок 7.9 – Электрическая схема замещения СГ: а – полная, б - упрощеная

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

С учетом равенства $x_c = x_a + x_s$, а также при пренебрежении активным сопротивлением r_a, эта схема приводится к упрощенному виду (рисунок 7.9 б), которая чаще всего применяется при анализе режимов работы СГ.

7.3.6. Система относительных единиц

Для анализа режимов работы СМ и сравнения машин различных мощностей и токов применяют уравнения, записанные в относительных единицах. Эта система позволяет выразить величины в виде процентов или долевых значений от некоторых основных величин, которые называют базисными.

Для определения значения параметров в относительных единицах их реальное значение (в физических величинах) делят на значение соответствующей базисной величины, выраженной также в физических единицах.

В качестве базисных применяют обычно номинальные параметры данного СГ.

- напряжение $U_б = U_н$;
- ток $I_н - I_н$;
- номинальная полная мощность $S_\delta = S_н = mU_н I_н$;
- номинальное полное сопротивление фазы обмотки статора (якоря)

$$z_\delta = z_н = \frac{U_н}{I_н} \quad \text{и т.д.}$$

Для обмотки возбуждения базисные величины те же, что и для обмотки статора, но все величины роторной цепи должны быть приведены к обмотке статора.

Чтобы различать обозначение величин в относительных единицах, их обычно пишут строчными буквами. Например

- ток в о. е. $i = \frac{I}{I_н}$;
- напряжение в о.е. $u = \frac{U}{U_н}$;
- активные сопротивление в о.е. $r_a = \frac{r_a}{z_н}$;
- индуктивное сопротивление рассеяния в о.е. $x_s = \frac{x_s}{z_н}$ и т.д.

Средние значения относительных параметров основных типов СМ приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Усредненные параметры турбо- и гидрогенераторов в относительных единицах

Наименование параметра	r_a	x_d	x_q	x_{ad}	x_{aq}	x_s
Турбогенераторы	0,002-0.008	1,6-2,2	1,6-2,2	1,5-2,1	1,5-2,1	0,08-0,25
Гидрогенераторы	0,002-0,02	0,6-1,8	0,4-1,2	0,5-1,5	0,3-0,9	0,1-0,3

Обратим внимание на то, что для ТГ (неявнополюсных СМ) параметры x_d и x_q, x_{ad} и x_{aq} равны между собой, а для ГГ параметры x_d и x_q определяются соответственно суммой $x_{ad} + x_s$ и $x_{aq} + x_s$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Остановимся на влиянии воздушного зазора на эксплуатационные характеристики СМ.

Увеличение зазора ведет к увеличению объема обмотки возбуждения, увеличению габаритов и удорожанию машины. Уменьшение зазора увеличивает индуктивные сопротивления x_a, x_d, x_q, что усиливает действие реакции якоря и уменьшает перегрузочную способность, а, следовательно, снижает устойчивость и усиливает влияние нагрузки на характеристики СМ.

В современных СМ воздушный зазор выбирают таким, чтобы сопротивления x_{ad} и x_{aq} не превосходили значений, приведенных в таблице 7.1.

7.4. Уравнения электрического равновесия и векторные диаграммы СГ

7.4.1. Неявнополюсный СГ

Для ненасыщенного неявнополюсного СГ уравнение равновесия ЭДС может быть записано в типичном для источника электрической энергии виде

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_s + \dot{E}_r \qquad (7.22)$$

или

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jx_a\dot{I}_a - jx_s\dot{I}_a - r_a\dot{I}_a = \dot{E}_0 - jx_c\dot{I}_a - r_a\dot{I}_a \qquad (7.23)$$

где E_0 – ЭДС при холостом ходе; x_a- индуктивное сопротивление реакции якоря; x_s – индуктивное сопротивление рассеяния; x_c – синхронное индуктивное сопротивление; r_a – активное сопротивление фазы статора.

Если пренебречь активным сопротивлением r_a, которое существенно меньше x_c, то уравнение (7.23) записывается в виде

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jx_c\dot{I}_a . \qquad (7.24)$$

Иногда векторную диаграмму СГ строят как решение видоизмененного уравнения ЭДС

$$E_0 = \dot{U} + \dot{I}_a(r_a + jx_s) + j\dot{I}_a x_a , \qquad (7.25)$$

полагая при этом, что сумма векторов $\dot{U}$ и $I_a(r_a + jx_s)$ представляет собой внутреннюю ЭДС (ЭДС воздушного зазора)

$$E_\delta = \dot{U} + \dot{I}_a(r_a + jx_s) , \qquad (7.26)$$

которая индуктируется результирующим магнитным потоком в воздушном зазоре

$$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_a , \qquad (7.27)$$

или результирующей МДС

$$\dot{F}_\delta = \dot{F}'_{во} + F_a . \qquad (7.28)$$

ЭДС $\dot{E}_\delta$ нельзя измерить, но ее можно представить как сумму напряжения на зажимах генератора и падение напряжения на внутреннем сопротивлении фазы статора $r_a + jx_s$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

С учетом сказанного

$$U = \dot{E}_\delta - jx_s\dot{I}_a - r_a\dot{I}_a \qquad (7.29)$$

Векторная диаграмма, построенная по уравнению (7.29), используется для определения неизвестного параметра, например, напряжения U при известных E_0 и параметрах схемы замещения и нагрузки. Векторную диаграмму строят, начиная с векторов $\dot{F}_o(\dot{\Phi}_0)$, которые откладываются влево от точки построения (рисунок 7.10).

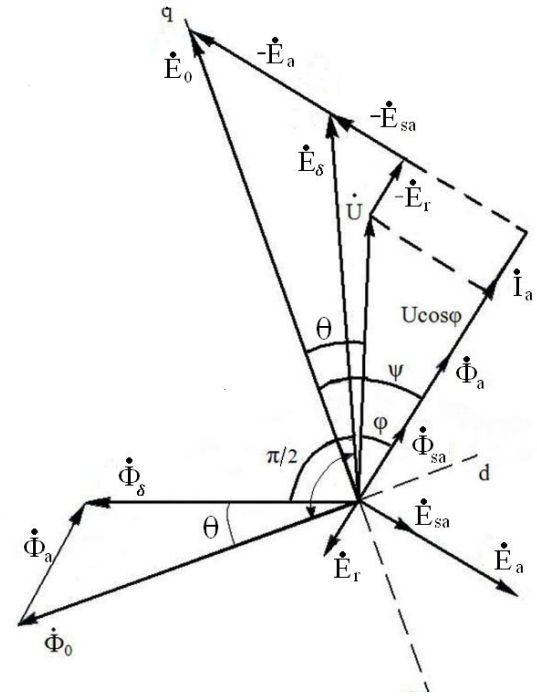


Рисунок 7.10 – Полная векторная диаграмма синхронного генератора

Вектор ЭДС $\dot{E}_o$ отстает от вектора F_o на угол $\frac{\pi}{2}$. При активно-индуктивной нагрузке вектор тока I_a отстает от вектора ЭДС E_0 на угол ψ. ЭДС СГ при нагрузке изменяется из-за реакции якоря, что характеризуется вектором $\dot{E}_a = -j_a\dot{I}_a x_a$, сдвинутым по отношению к вектору тока $\dot{I}_a$ на угол $\frac{\pi}{2}$ в сторону отставания. Напряжение на зажимах генератора U получается, если учесть падение напряжения на сопротивлениях x_s и r_a.

Напомним, что МДС F_δ представляет собой результирующую МДС, которому соответствует результирующий магнитный поток в воздушном зазоре Φ_δ и ЭДС E_δ.

Угол θ, величина которого определяется активной составляющей тока нагрузки $\dot{I}_a$, является углом между продольной осью машины (осью обмотки возбуждения) и вектором результирующего магнитного потока ϕ_δ. Его рассматривают также как угол между векторами $\dot{E}_0$ и $\dot{U}$.

Построение ВД может быть упрощено, если пренебречь активным сопротивлением фазы статора и учесть, что $x_a + x_s = x_c$. Тогда уравнение ЭДС записывается в виде $\dot{U} = \dot{E}_0 - jx_c\dot{I}_a$, а его векторное решение показано на рисунке 7.11 (векторы МДС в данном случае не показаны).

Величина падения напряжения ΔU на выводах машины по сравнению с ЭДС при холостом ходе $\dot{E}_0$ в большой степени зависит от характера нагрузки. Векторная диаграмма на рисунке 7.10, а построена для смешанной активно-индуктивной нагрузки, при которой действует продольно - размагничивающаяся реакция якоря и напряже-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ние U меньше ЭДС $\dot{E}_0$. Характер нагрузки определяется углом φ между током и напряжением.

При работе генератора на емкостную нагрузку или смешанную активно-емкостную нагрузку реакция якоря – подмагничивающая, вектор – $j\dot{I}_a x_c$ изменяет направление и $\dot{U}$ может быть больше $\dot{E}_0$, что качественно показано на рисунке 7.11, б.

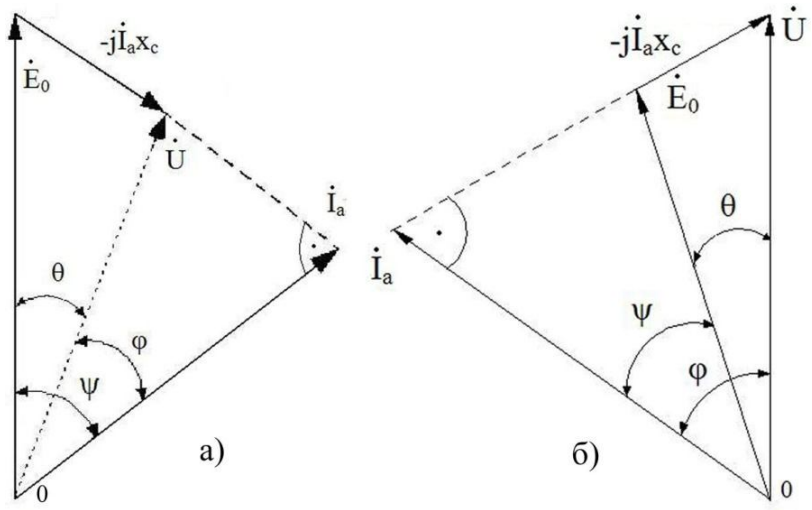


Рисунок 7.11 – Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного СГ при работе: а) на активно – индуктивную нагрузку; б) на активно – емкостную нагрузку

7.4.2. Явнополюсный СГ

В явнополюсных СГ зазоры по продольной и поперечной осям различны, поэтому амплитуда поля зависит от положения оси поля относительно оси полюсов. Смещение оси поля определяется реакцией якоря.

Как отмечено в разделе 7.2, для учета влияния реакции якоря в явнополюсных СГ используется метод двух реакций, основанный на разложении МДС якоря на две МДС – продольную и поперечную, действующие соответственно по продольной и поперечной осям машины. Также представляются и другие параметры.

Запись уравнений равновесия и построение векторной диаграммы такого СГ осуществляется из представления о существовании независимых магнитных потоков по осям машины и соответствующих им ЭДС:

$$\dot{I}_a \left\langle \begin{array}{l} \dot{I}_d = \dot{I}_a \sin\psi \to \dot{F}_{ad} \to \dot{\Phi}_{ad} \to \dot{E}_{ad} = -jx_{ad}\dot{I}_d; \\ \dot{I}_q = \dot{I}_a \cos\psi \to \dot{F}_{aq} \to \dot{\Phi}_{aq} \to \dot{E}_{aq} = -jx_{aq}\dot{I}_q; \\ \dot{\Phi}_s \to \dot{E}_s = -jx_s\dot{I}_a; \\ \dot{E}_r = -\dot{I}_a r_{a.} \end{array} \right\rangle$$

Уравнение ЭДС явнополюсного СГ имеет вид

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_s + \dot{E}_r$$

или

$$U = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d x_d - jx_q\dot{I}_q - r_a\dot{I}_a, \qquad (7.30)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

где $x_d = x_{ad} + x_s$, $x_q = x_{aq} + x_s$

Исходными величинами для построения векторной диаграммы по этому уравнению целесообразно выбрать величины $\dot{U}$, $\dot{I}$, φ или cosφ ($\cos\varphi = \frac{r_н}{z_н}$), r_a, x_s и x_a. Кроме того, необходимо знать величину угла ψ.

Для проведения качественного анализа работы неявнополюсного СГ строят упрощенную векторную диаграмму. Для этого вводят понятие составляющих ЭДС рассеяния по продольной $\dot{E}_{sd} = -j\dot{I}_d x_s$ и поперечной $\dot{E}_{sq} = -j\dot{I}_q x_s$ осям и определяют составляющие ЭДС E_d и E_q

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{sd} = -j\dot{I}_d(x_{ad} + x_s) = -j\dot{I}_d x_d, \qquad (7.31)$$
$$\dot{E}_q = \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{sq} = -j\dot{I}_q(x_{aq} + x_s) = -j\dot{I}_q x_q.$$

При построении упрощенной векторной диаграммы падением напряжения на активном сопротивлении пренебрегают, $E_a = -I_a x_a = 0$. На рисунке 7.12 упрощенные векторные диаграммы построены для двух режимов – активно-индуктивной (рисунок 7.12,а) и активно-емкостной (рисунок 7.12,б) нагрузках.

Как видно, во втором случае напряжение генератора при нагрузке больше, чем ЭДС при холостом ходе, что обусловлено подмагничивающим действием реакции якоря.

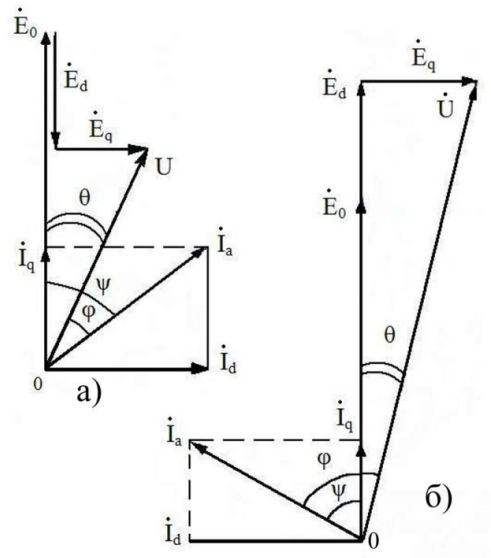


Рисунок 7.12 – Упрощенные векторные диаграммы явнополюсного СГ при работе:
а) на активно – индуктивную нагрузку;
б) на активно – емкостную нагрузку

7.4.3. Векторная диаграмма насыщенного неявнополюсного СГ (диаграмма Потье)

Рассмотрение процессов преобразования энергии в СМ усложняется факторами, важнейшим из которых является зависимость параметров (в первую очередь индуктивного сопротивления реакции якоря x_a) от насыщения. Дело в том, что при насыщенной магнитной цепи принцип наложения магнитных потоков при построении ВД неприемлем, поскольку магнитное сопротивление стальных участков непостоянно. Соответственно не будут постоянными параметры машины. Это значит, что уравнения ЭДС генератора становятся уравнениями с переменными коэффициентами и их решение усложняется. Поэтому ис-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

пользуют приближенные методы расчета и анализа, в частности графоаналитический метод с использованием магнитной характеристики $\Phi_0 = f(F_в)$ или характеристики холостого хода $U_0 = E_0 = f(I_{во})$, с которой совмещают векторную диаграмму (рисунок 7.13).

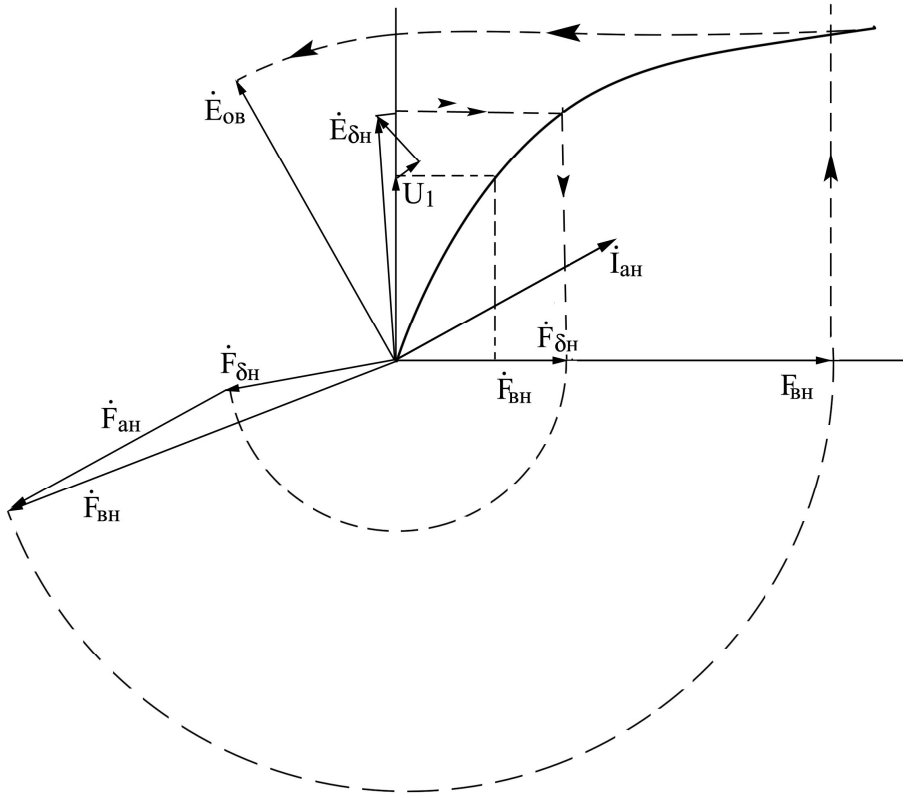


Рисунок 7.13 – Практическая векторная диаграмма СГ

Целью построения такой векторной диаграммы, часто называемой практической диаграммой, является определение тока возбуждения $I'_{вн}$ при номинальной нагрузке и величину изменения напряжения ΔU при сбросе нагрузки.

Исходными величинами для построения практической векторной диаграммы являются данные номинального режима $U_н$, $I_{ан}$, $\cos\varphi_н$, F_a параметры r_a, x_s и характеристика холостого хода. Ясно, что каждому току нагрузки I_a и значению cosφ будет соответствовать своя векторная диаграмма.

Порядок построения. Вначале в координатной системе E и $I_в$ (или $F_в$) строят характеристику холостого хода (в относительных единицах). По оси ординат откладывают вектор $U_н$ и под углом φ к нему – вектор тока $I_{ан}$. Величина $I_{во}$ соответствует МДС или току возбуждения, при которых $E_о=U_н$. Далее определяют внутреннюю ЭДС $\dot{E}_{\delta н}$, для чего к вектору $U_н$ пристраиваются векторы $\dot{I}_{ан}r_a$ и $j\dot{I}_{ан}x_p$.

Сопротивление $x_р$ – это индуктивное сопротивление Потье, которое несколько больше, чем сопротивление рассеяния x_s. Оно рассчитывается по определенным соотношениям и учитывает, что для получения напряжения $U_н$ при номинальной нагрузке необходимо иметь больший ток возбуждения, чем при холостом ходе, а это приводит к

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

увеличению рассеяния обмотки возбуждения и соответствующему увеличению рассеяния обмотки якоря. В среднем имеет место соотношение $x_p \approx (1{,}05\ldots1{,}15)x_s$.

По значению $\dot{E}_{\delta н}$ и характеристике холостого хода находят результирующую МДС воздушного зазора $\dot{F}_{\delta н}$, вектор которой фактически опережает вектор ЭДС $\dot{E}_\delta$ на угол $\frac{\pi}{2}$. Далее, зная МДС реакции якоря $F_{ан}$ (при токе $I_{ан}$), коэффициент реакции якоря k_d, модуль и направление МДС $\dot{F}_{\delta н}$ определяют МДС обмотки возбуждения при нагрузке $F'_{вн}$, для чего к вектору $\dot{F}_{\delta н}$ пристраивают вектор $\dot{F}_{ан}$. Обращаясь к характеристике холостого хода, по $F'_{вн}$ определяют величину вектора $\dot{E}_{он}$, отстающего от $F'_{вн}$ на угол $\frac{\pi}{2}$.

7.4.4. Изменение напряжения СГ при изменении нагрузки

Поддержанию необходимой величины и качества напряжения судовых СГ уделяется повышенное внимание, так как большинство потребителей, подключаемых в качестве нагрузки к СГ, требует неизменного напряжения. Если не регулировать основный магнитный поток Φ_0 СГ (ток возбуждения $I_в$), то его напряжение одновременно с изменением величины и характера нагрузки (тока якоря I_a) будет изменяться, что наглядно иллюстрируется уравнениями электрического равновесия и векторными диаграммами. Причиной изменения напряжения является падение напряжения на внутренних сопротивлениях якоря r_a и x_s и действие реакции якоря, которая уменьшает его при активно – индуктивных нагрузках (РЯ поперечная или продольно размагничивающая) и несколько увеличивает при активно-емкостных нагрузках (РЯ продольно-подмагничивающая). При неизменной величине тока нагрузки I_a реакция якоря сказывается на изменении напряжения тем заметнее, чем меньше cosφ (при r - L или r - C нагрузках)

Единственным эффективным способом поддержания постоянства напряжения на выходе СГ является соответствующее изменение тока возбуждения, которое обеспечивается автоматическими регуляторами напряжения (АРН) СГ.

При решении практических задач, при расчете и настройке систем регулирования определяют процентное изменение напряжения или при сбросе нагрузки от номинальной до нуля (изменение от $U_н$ до ЭДС при холостом ходе E_0) или при набросе номинальной нагрузки при переходе от режима холостого хода (изменения от $U_н$ до некоторого конечного значения U).

В первом случае изменение напряжения ΔU рассчитывается по соотношению

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_н}{U_н} 100\% \qquad (7.31)$$

и позволяет оценить величину всплеска напряжения на выходе СГ при отсутствии регулирования тока $I_в$, который может быть опасен для системы изоляции обмоток.

Во втором случае имеем

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\Delta U = \frac{U_н - U}{U_н} 100\% \qquad (7.32)$$

и по этой величине можно оценить необходимую МДС возбуждения (или ток $I_в$) для поддержания напряжения на заданном уровне.

Количественно величина ΔUможет быть рассчитана с применением векторных диаграмм или определена экспериментально путем непосредственной нагрузки (или разгрузки СГ).

7.4.5. Определение изменения напряжения СГ по векторным диаграммам

Неявнополюсный синхронный генератор (НСГ).

Рассмотрим, как можно определить изменение напряжения у нерегулируемого НСГ по упрощенной векторной диаграмме.

Пусть НСГ с известным синхронным индуктивным сопротивлением x_c работает под нагрузкой в режиме, характеризуемом величинами U, I_a и φ, и требуется определить, как изменится напряжение при сбросе нагрузки. Задача сводится к отысканию величины Э.Д.С. E_0 путем построения векторной диаграммы по упрощенному уравнению (7.24) $\dot{U} = \dot{E}_0 - jx_c\dot{I}_a$.

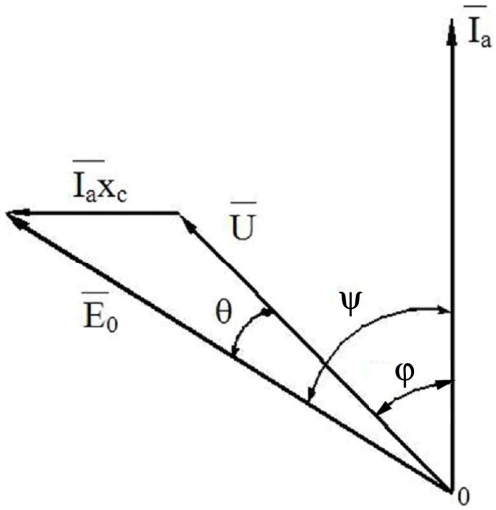


Рисунок 7.14 – К определению изменения напряжения неявнополюсного СГ при изменении нагрузки

Выбираем масштаб напряжений m_u (В/мм), строим в произвольном направлении вектор $\bar{U}$ (рис. 7.14), под углом φ к $\bar{U}$ строим вектор $\bar{I}_a$ (он нужен для ориентировки вектора $\bar{I}_a x_c$), к вектору $\bar{U}$ прибавляем вектор падения напряжения на синхронном индуктивном сопротивлении СГ x_c от тока, т. е. $\bar{I}_a x_c$, всегда ориентируя его в сторону опережения вектора $\bar{I}$ на 90° (для $\bar{I}x_c$ тот же масштаб что и для U).

Суммируем U и $\bar{I}x_c$ и получаем вектор $\bar{E}_0$. Величина Э.Д.С. E_0 определяется с учетом масштаба m_u. Далее по формуле (7.32) находим процентное изменение напряжения

$$\Delta U = \frac{E_0 - U}{U} 100\%$$

Заметим, что алгебраическая разность между E_0 и U, именуемая потерей напряжения, практически всегда меньше векторной их разности, именуемой падением напряжения.

Процентное изменение напряжения у СГ при сбросе номинальной нагрузки достаточно большое, около 30…40%.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Явнополюсный синхронный генератор (ЯСГ).

Изменение напряжения для ЯСГ определим также по упрощенному уравнению (7.29)

$$\bar{E}_0 = \bar{U} + \bar{I}_d x_d + \bar{I}_q x_q.$$

Надо отметить, что при набросе нагрузки, когда известны $\bar{E}_0, \bar{I}, \psi, x_d$ и x_q задача решается проще, чем при сбросе нагрузки, так как в последнем случае возникают определенные трудности в определении составляющих тока $\bar{I}_d$ и $\bar{I}_q$

При набросе нагрузки решение производится в следующем порядке (рисунок 7.15):

– изображаем вектор $\bar{E}_0$ и оси q – q, d – d;

– под углом ψ к вектору $\bar{E}_0$ откладываем вектор $\bar{I}$;

– проектируем вектор тока $\bar{I}$ на оси d – d , q – q и определяем, с учетом масштаба токов m_I, его составляющие по продольной $\bar{I}_d$ и поперечной $\bar{I}_q$ осям;

– вычисляем падения напряжения $I_q x_q$ и $I_d x_d$ и прибавляем к вектору $\bar{E}_0$ векторы $-\bar{I}_d x_d$ и $-\bar{I}_q x_q$, ориентируя каждый на 90° в сторону отставания от вектора соответствующей составляющей тока (так как эти падения напряжения на индуктивностях имеют отрицательный знак);

- сумма векторов $\bar{E}_0 + \left(-\overline{I_d x_d}\right) + \left(-\overline{I_q x_q}\right)$ дает вектор напряжения $\bar{U}$;

- определяем потерю напряжения и процентное изменение напряжения при набросе нагрузки.

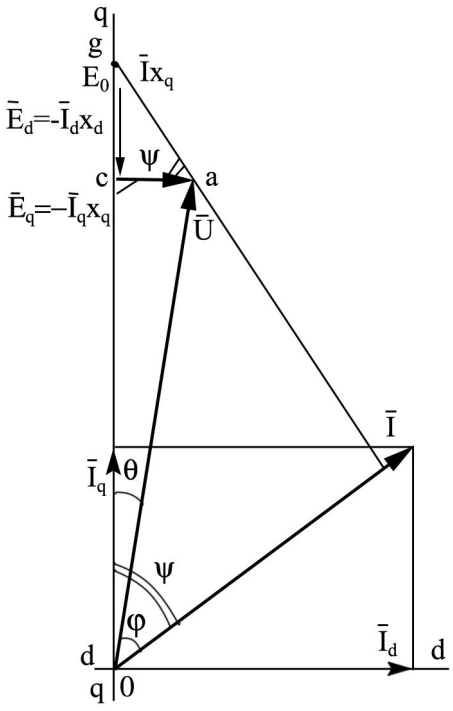


Рисунок 7.15 – К определению изменения напряжения явнополюсного СГ при изменении нагрузки

Для уяснения хода решения задачи при сбросе нагрузки (когда заданы U, I, φ, x_d и x_q) на рисунке 7.15 сделаем дополнительное построение; через конец вектора U – точку a, проведем перпендикуляр к направлению вектора тока $\bar{I}$, продолжив его до пересечения с осью q – q, с которой всегда совпадает направление вектора Э.Д.С $\bar{E}_0$ (точка g). В образовавшемся прямоугольном треугольнике gac угол gac равен ψ, а длина гипотенузы ga равна

$$ga = \frac{I_q x_q}{\cos\psi} = I x_q$$

Следовательно, при решении задачи по определению изменения напряжения ЯСГ при сбросе нагрузки после показа на векторной диаграмме векторов $\bar{U}$ и $\bar{I}$ под углом

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

φ друг к другу, надо через конец вектора $\overline{U}$ (точка а на рисунке 7.15) провести перпендикуляр к направлению вектора $\overline{I}$ и продолжить его от точки а в направлении продолжения вектора $\overline{I}$; на продолжении перпендикуляра отложить отрезок ga (в масштабе напряжений m_u); через точку g и начало вектора $\overline{U}$ провести ось q – q, а затем – ось d – d. После этого спроектировать вектор тока $\overline{I}$ на оси d – d, q – q и найти составляющие $\overline{I}_d$ и $\overline{I}_q$. Затем к вектору $\overline{U}$ прибавить векторы $\overline{I_q x_q}$ и $\overline{I_d x_d}$ и получить вектор $\overline{E}_0$. В результате можно найти потерю напряжения и процентное изменение напряжения при сбросе нагрузки.

7.5. Характеристики синхронных генераторов

7.5.1. Общие определения характеристик

Свойства синхронных генераторов изучаются при помощи характеристик, представляющих собой графические изображения соотношений между двумя определенными величинами при нерегулируемых остальных. Они могут быть построены по расчетным данным, с помощью векторных диаграмм, или по данным специальных опытов. Характеристики неявнополюсных и явнополюсных генераторов идентичны, поэтому для наглядности их часто строят в относительных единицах.

7.5.2. Основные характеристики СГ

Характеристика холостого хода (х.х.х., рисунок 7.16, кривая 1).

При холостом ходе СГ напряжение U_0 равно ЭДС E_0, ток нагрузки $I_a = 0$ (обмотка статора разомкнута), а скорость вращения n постоянна и соответствует частоте 50 Гц. Магнитный поток генератора определяется МДС обмотки возбуждения $F_в$, а ЭДС E_0 прямо пропорциональна потоку Φ_0.

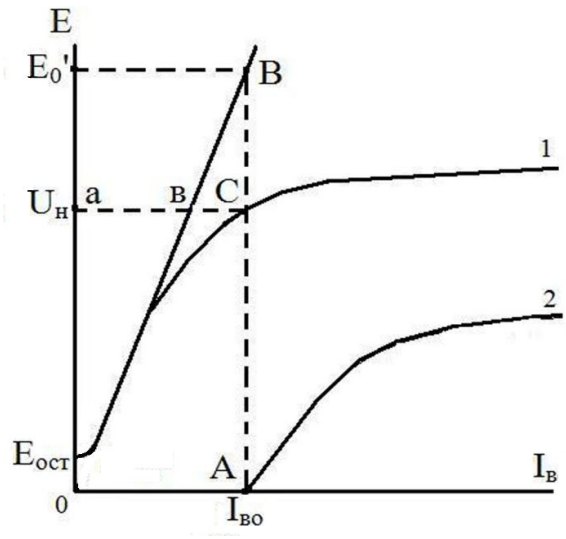


Рисунок 7.16 - Характеристика холостого хода (1) и нагрузочная характеристика (2) синхронного генератора

$$E_0 = c\Phi_0 .$$

Таким образом, х.х.х. представляет собой зависимость ЭДС E_0 от тока возбуждения $I_в$, или зависимость магнитного потока Φ_0 от МДС возбуждения $F_в$ при $I_a = 0$ и $n = n_н = const$. Эта характеристика дает представление о состоянии магнитной цепи и ее часто называют магнитной характеристикой.

Левая восходящая ветвь х.х.х. прямолинейна; в этой части магнитная цепь

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ненасыщена и МДС обмотки возбуждения практически полностью расходуется на проведение магнитного потока через воздушный зазор. По мере увеличения МДС возбуждения насыщение магнитных участков становится все более заметным и х.х.х. все более отклоняется от прямой. Обычно рабочая точка на х.х.х. (точка С), соответствующая номинальному напряжению $U_н$ при холостом ходе, выбирается на перегибе кривой, что с одной стороны, обеспечивает устойчивое напряжение в установившемся режиме, с другой - возможность его регулирования при изменении тока возбуждения.

Положение точки В на характеристике позволяет судить о степени насыщения магнитной цепи машины. Если к начальной части х.х.х. провести касательную ОВ, то ее пересечение с линией АС даст величину МДС, необходимой для проведения магнитного потока через воздушный зазор (отрезок ав) и МДС стальных участков (отрезок вС). Коэффициент насыщения определяется из соотношения

$$k_\mu = \frac{aC}{ab}.$$

Реальная х.х.х. начинается не из начала координат, а с некоторого значения $E_{ост}$, величина которой, как и в машинах постоянного тока, определяется потоком остаточного намагничивания.

Характеристики холостого хода различных генераторов, построенные в относительных единицах ($u_0 = \frac{U}{U_н}, i_в = \frac{i_в}{i_{во}}$, $i_{во}$ - ток холостого хода при U = $U_н$), незначительно отличаются друг от друга.

Поэтому для упрощения расчетов х.х.х. всех синхронных генераторов, выраженные в относительных единицах, принимают одинаковыми и называют нормальными. Данные для построения «нормальной» (усредненной) х.х.х. приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 - «Нормальная» характеристика холостого хода СГ

$i_в$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
u_0	0	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51

По х.х.х. можно определить также взаимную индуктивность между обмотками возбуждения и обмоткой якоря, как отношение ЭДС E_0 к току возбуждения $I_В$.

Внешняя характеристика – это зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки $U = f(I_a)$ при постоянных значениях тока возбуждения, скорости вращения и cosφ. На рисунке 7.17,а внешние характеристики в относительных единицах показаны при таком токе возбуждения, который при холостом ходе создает ЭДС $E_0 = U_н$. Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки.

При чисто активной нагрузке (φ = 0, cosφ = 1) и при активно - индуктивной нагрузке (φ > 0) напряжение заметно уменьшается от значения $U_н$, что обусловлено падением напряжения на внутреннем сопротивлении машины $Z = r_a + jx_s$ и влияния поперечной реакции якоря. При активно - емкостной нагрузке (φ<0) реакция якоря подмагничивающая, поэтому напряжение на выводах генератора с увеличением тока нагрузки растет.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока якоря $I_в = f(I_а)$ при неизменных напряжении, частоте вращения и cosφ. Эти характеристики показывают, как нужно

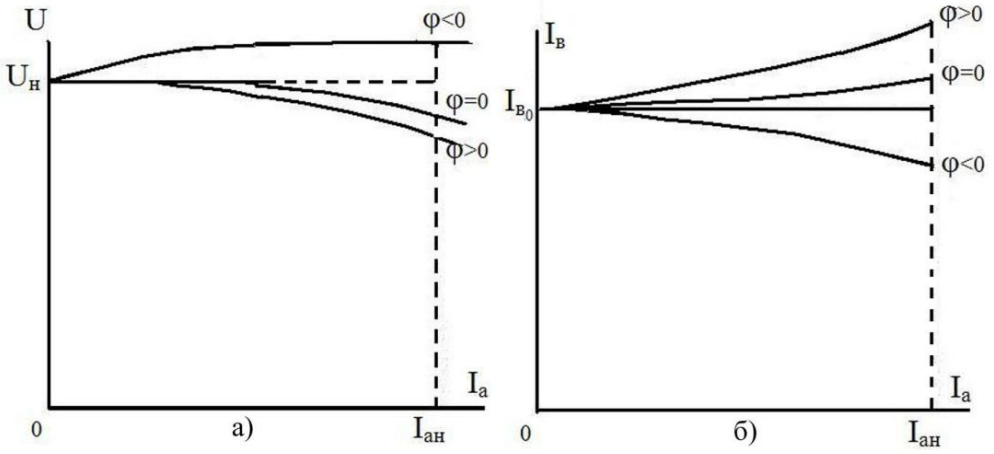


Рисунок 7.17 – Внешние (а) и регулировочные (б) характеристики СГ

изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы поддержать неизменным напряжение на выводах генератора. На рисунке 7.17, б представлены регулировочные характеристики для различных значений cosφ и тока нагрузки. Как видно, они полностью соответствуют внешним характеристикам СГ. Чтобы напряжение оставалось неизменным при активной (cosφ = 1) или активно-индуктивной нагрузке (φ > 0) ток возбуждения надо увеличивать, при активно-емкостной нагрузке (φ < 0) ток $I_в$ надо уменьшать.

Отметим что при работе СГ на чисто емкостную нагрузку $\left(\varphi=-\frac{\pi}{2}\right)$ магнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения, усиливается реактивным током, протекающим в якоре. При малых воздушных зазорах в СМ может наступить самовозбуждение, когда при $I_в=0$ (обмотка возбуждения отключена) на выводах генератора будет напряжение. Это явление называется самовозбуждением генератора.

Нагрузочная характеристика – это зависимость напряжения U на выводах генератора от тока возбуждения $I_в$ при постоянных токе якоря $I_а$, cosφ нагрузки и частоте вращения *n* (рисунок 7.16, кривая 2). Как правило, нагрузочную характеристику снимают при индуктивной нагрузке, называя ее при этом индукционной нагрузочной характеристикой.

Эта характеристика является вспомогательной и используется совместно с характеристиками холостого хода и короткого замыкания для определения индуктивных сопротивлений машин.

Характеристика трехфазного короткого замыкания (х.к.з.) - является одной из важнейших характеристик СГ и определяет зависимость тока якоря от тока возбуждения $I_а = f(I_в)$ при симметричном коротком замыкании на выводах якоря при номинальной частоте вращения.

Она снимается при закороченной амперметрами обмотке якоря при постепенном повышении $I_в$ от нуля до такого значения, при котором ток статора $I_а \approx I_{ан}$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Эта характеристика линейна (рисунок 7.18) так как при малом токе возбуждения магнитная цепь СГ ненасыщена, кроме того она зависит от характера к.з. – одно,- двух или трехфазного.

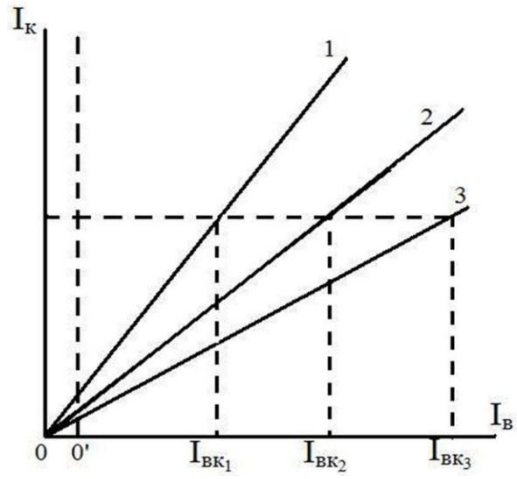


Рисунок 7.18 – Характеристики короткого замыкания СГ: 1 - однофазное; 2 – двухфазное; 3 - трехфазное

По характеру ток короткого замыкания $I_к$ является индуктивным, так как определяется, в основном, синхронным индуктивным сопротивлением $x_c = x_a + x_\delta$, которое значительно больше активного сопротивления якоря r_a. Поскольку напряжение U при к.з. равно нулю, то величина $I_к$ определяется по соотношению

$$I_к = \frac{E_0}{x_c}, \qquad (7.34)$$

где E_0 - ЭДС, соответствующая току возбуждения $I_{во}$ (см. рисунок 7.16) и определяемая по спрямленной характеристике холостого хода.

В относительных единицах ток короткого замыкания обратно пропорционален сопротивлению X_d, поэтому по х.к.з. и х.х.х. опытным путем можно определить величину X_d.

ОКЗ. Весьма важное значение имеет характеристика СГ, называемая отношением короткого замыкания (ОКЗ). Это величина, равная отношению тока короткого замыкания $I_{ко}$, снятому при токе возбуждения $I_{во}$, который в режиме холостого хода дает номинальное напряжение $E_0 = U_н$, к номинальному току статора, т.е.

$$\text{ОКЗ} = \frac{I_{ко}}{I_{ан}}. \qquad (7.35)$$

Поскольку $I_{ko} = \frac{U_o}{x_c}$, то $\text{ОКЗ} = \frac{U_н}{x_c I_{ан}}$ и в относительных единицах равно

$$ОКЗ = \frac{1}{x_c}, \qquad (7.36)$$

или для явнополюсных генераторов

$$ОКЗ = \frac{1}{x_d}. \qquad (7.37)$$

Соотношения (7.36) и (7.37) справедливы для ненасыщенных машин.

Если ОКЗ определяют по насыщенной характеристике холостого хода, то

$$\text{ОКЗ} = \frac{(1{,}1 \ldots 1{,}2)}{x_d}.$$

Отношение короткого замыкания, так же как и величины x_c или x_d, определяет перегрузочную способность СМ. Чем больше ОКЗ (чем больше воздушный зазор), тем меньше концентрация энергии поля в

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

зазоре, тем больше предельная нагрузка. Однако, в этом случае машина имеет повышенные габариты и более высокую стоимость.

У турбогенераторов ОКЗ = 0,4…1,0, у гидрогенераторов 0,8…1,8. У судовых дизельгенераторов ОКЗ = 0,6…0,8

7.6. Определение параметров СГ

Рассмотренные выше характеристики позволяют определить основные параметры СГ – x_c, x_d x_s, а так же величину ОКЗ.

Ненасыщенное значение x_d**.** Как отмечалось, при опыте короткого замыкания магнитная цепь машины ненасыщена, а ЭДС E_0, создаваемая МДС F_0, уравновешивается арифметической суммой ЭДС E_{ad} и E_s (сопротивлением r_a пренебрегают), т.е.

$$\dot{E}_0 = -(\dot{E}_{ad} + \dot{E}_s) = j\dot{I}_{кн}(x_{ad} + x_s) = j\dot{I}_{кн}x_d, \qquad (7.38)$$

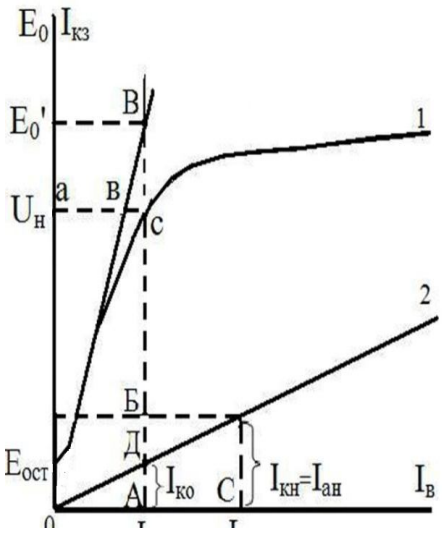


Рисунок 7.19 – К определению ненасыщенного значения синхронного индуктивного сопротивления x_d

откуда

$$x_d = \left|\frac{E_0}{I_{кн}}\right|, \qquad (7.39)$$

при этом для определения ЭДС E_0 пользуются спрямленной частью х.х.х. (ЭДС E_0' на рисунке 7.19).

Для тока возбуждения $I_{в_0} = OA$ имеем $E_0' = AB$ и $I_{кн} = AБ$, поэтому

$$x_d = \frac{E_0'}{I_{кн}} = \frac{E_0'}{I_{ан}}. \qquad (7.39, а)$$

Учитывая, что

$$ОКЗ = \frac{1}{x_d} = \frac{I_{к_0}}{I_{кн}} = \frac{I_{в_0}}{I_{вн}}, \text{ получаем}$$

$$x_d = \frac{I_{вн}}{I_{в_0}} = \frac{OC}{OA}. \qquad (7.40)$$

Насыщенное значение x_d**.** При номинальной нагрузке СГ, когда его магнитная цепь насыщена, значение x_d, обозначаемое для определенности $x_{d\mu}$, значительно меньше, чем при опыте к.з., когда сталь машины не насыщена. Связано это с тем, что действие реакции якоря при насыщенной магнитной цепи ослабляется и значение $\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d x_{ad}$ уменьшается (за счет уменьшения x_{ad}), а следовательно уменьшается и x_d.

Для определения $x_{d\mu}$, пользуются характеристикой холостого хода и нагрузочной индукционной, снятой, например, при $I_a = I_{ан}$ и при cosφ=0.

Точка А (рисунок 7.20) определяет ток возбуждения $I_в = OA$, а отрезки АВ и АС – соответствующие этому току ЭДС при холостом ходе $E_0 = U_0$ и напряжение при нагрузке $U_н$. Из рисунка 7.20 следует, что АВ=АС+ВС или $E_o = U_н + I_н x_{dμ}$, откуда имеем

$$x_{d\mu} = \frac{E_0 - U_н}{I_н} = \frac{AB - AC}{I_н}. \qquad (7.41)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

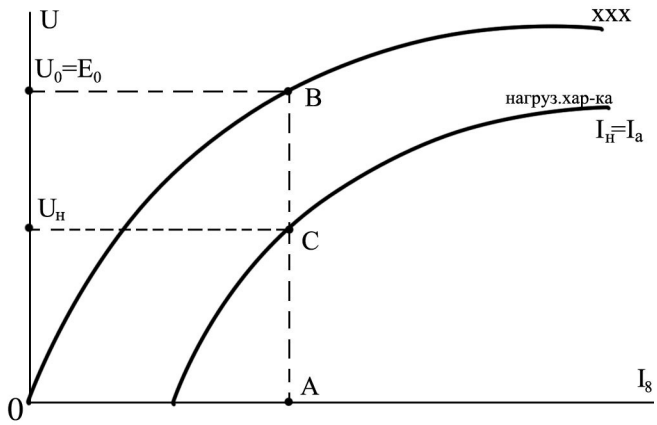


Рисунок 7.20 - К определению насыщенного значения синхронного индуктивного сопротивления x_d

Значение индуктивного сопротивления рассеяния x_s определяют из трех характеристик (рисунок 7.21): холостого хода 1, трехфазного короткого замыкания 2 и нагрузочной индукционной характеристики 2, также построенной для значения тока $I_a = I_{ан}$ и cosφ=0.

Порядок построения:

- из точки Д, соответствующей значению $U_н$, проводят линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с нагрузочной характеристикой в точке Б;

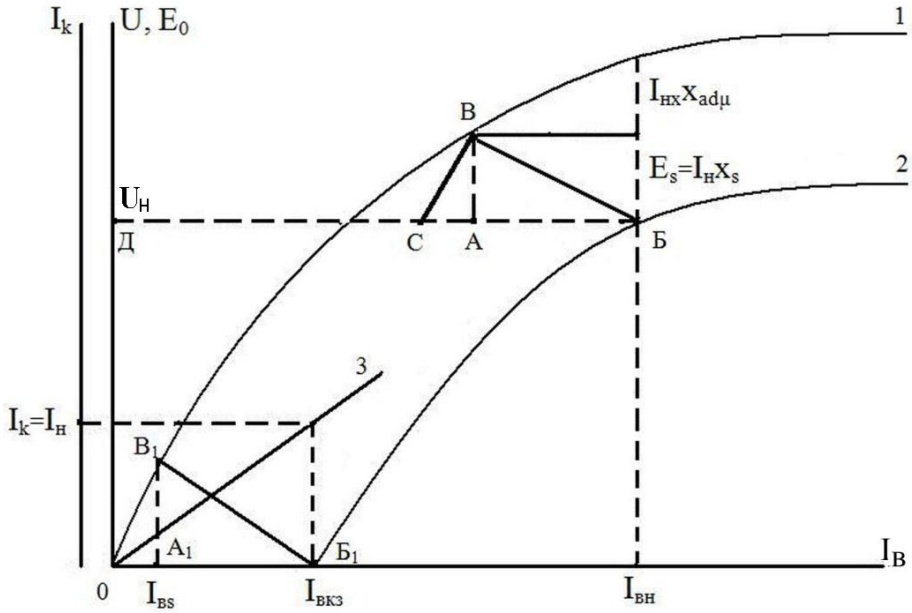


Рисунок 7.21 – К определению индуктивного сопротивления рассеяния x_s

- для тока $I_н$ по характеристики короткого замыкания определяют величину тока возбуждения $I_{вкз}$ (отрезок ОБ$_1$);

- влево от точки Б откладывают отрезок БС = ОБ$_1$ = I$_{вкз}$ и из точки С проводят прямую, параллельную начальной части х.х.х. до пересечения с х.х.х. в точке В;

- опустив из точки В перпендикуляр на отрезок СБ, получают отрезок ВА = В$_1$А$_1$, равный $E_s = I_н x_s$, откуда

$$x_s = \frac{E_s}{I_н} = \frac{A_1 B_1}{I_н} \quad . \qquad (7.42)$$

Треугольник АВБ называют реактивным или характеристическим треугольником, в котором катет АВ равен падению напряжения в

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

сопротивлении рассеяния $I_н x_s$, а горизонтальный катет АБ - МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения, в котором построены нагрузочная характеристика и х.х.х.

Реактивный треугольник наглядно отражает то, что уменьшение напряжения при нагрузке СГ происходит вследствие падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния x_s и размагничивающего действия реакции якоря.

Если известны катеты реактивного треугольника, то по х.х.х. можно построить нагрузочную характеристику, передвигая этот треугольник параллельно самому себе (треугольник $А_1В_1Б_1$).

Значение синхронного индуктивного сопротивления по поперечной оси x_q для явнополюсных машин меньше, чем значение x_d. В среднем принимают $x_q \approx 0{,}6 x_d$. Для неявнополюсных СМ, как отмечалось, $x_d \approx x_q$ и $x_{ad} \approx x_{aq}$.

Параметры x_d и x_q. Представляет интерес возможность опытного определения параметров x_d и x_q. Для этого к статору подводят номинальное напряжение от источника 3-х фазного переменного тока, а ротор с разомкнутой обмоткой возбуждения вращают его скоростью, близкой к синхронной. В зависимости от относительного расположения полюсов ротора и поля реакция якоря сопротивления обмотки якоря периодически (с частотой скольжения $f = n_1 s$) изменяются в пределах от x_d до x_q и соответственно изменяются значения тока и напряжения в пределах $I_{\min} \ldots I_{\max}$ и $U_{\min} \ldots U_{\max}$, а параметры x_d и x_q рассчитывают по соотношениям

$$x_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3} I_{\min}}, \quad x_q = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} I_{\max}} . \qquad (7.43)$$

Активное сопротивление обмотки якоря r_a – рассчитывается по сотношению $r_a = k_f r_{a_{75}}$, где k_f –коэффициент, учитывающий действие вихревых токов; r_{a75}–сопротивление обмотки постоянному току при температуре 75˚С.

7.7. Потери и К.П.Д. синхронных машин

Разделение потерь в СМ по существу аналогично асинхронным машинам с учетом, однако, того, что в обмотке возбуждения протекает постоянный ток. К основным потерям относятся потери в меди обмотки статора $\Delta P_м$, потери в меди обмотки возбуждения $\Delta P_в$, потери в стали $\Delta P_{ст}$, механические (в том числе вентиляционные) потери $\Delta P_{мех}$.и добавочные $\Delta P_д$.

Как и для других типов электрических машин, основные потери в СМ подразделяют на постоянные, независимые от нагрузки (это потери $\Delta P_{мех}$и $\Delta P_{ст}$), и переменные, зависящие от нагрузки ($\Delta P_м$ и $\Delta P_в$).

Добавочные потери $\Delta P_д$ обусловлены действием магнитных потоков рассеяния статора, высших гармонических МДС статора и ротора и зубцовых гармоник полей статора и ротора. Потоки рассеяния статора создают дополнительные потери в конструктивных элементах машины, высшие гармоники МДС – на поверхностях статора и ротора, а зубцовые гармоники, возникающие вследствие поперечных и про-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

дольных колебаний магнитной индукции в зубцах, вызывают дополнительные поверхностные и пульсационные потери в стали.

К.П.Д. синхронного генератора определяют по формуле

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum \Delta P}{P_н + \sum \Delta P}\right) 100\,\%\,, \qquad (7.44)$$

где $\sum \Delta P = \Delta p_м + \Delta p_в + \Delta p_{ст} + \Delta p_{мех} + \Delta p_д$,

$P_н = 3U_ф I_ф \cos\varphi$ –номинальная мощность СГ.

Значение КПД судовых СГ составляет в среднем 85…93%.

7.8. Схемы возбуждения синхронных генераторов

7.8.1. Принцип построения систем возбуждения СГ

В самом общем виде схемы возбуждения СГ, как и у генераторов постоянного тока, строятся по принципу независимого возбуждения и с самовозбуждением.

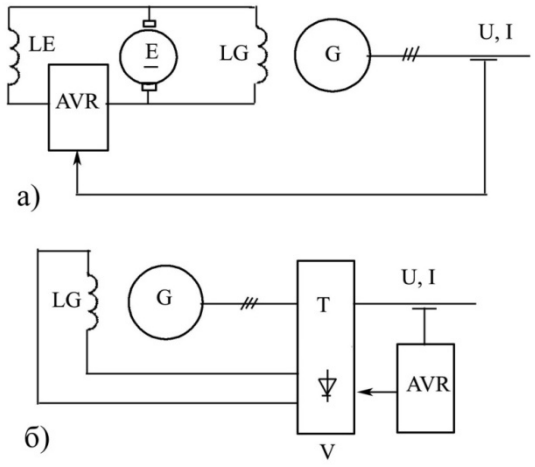


Рисунок 7.22 - Схемы возбуждения синхронного генератора:
а – от возбудителя;
б – с самовозбуждением

Простейшим независимым возбуждением СГ является возбуждение постоянными магнитами, размещенными на роторе (обмотка возбуждения и контактные кольца в этом случае отсутствуют). Однако при этом практически исключается регулирование возбуждения СГ, поэтому возбуждение постоянными магнитами применяется для СГ, не требующих регулирования напряжения. Подобные СГ широко применяются в настоящее время в автономной ветроэнергетике.

У СГ с независимым возбуждением источником постоянного тока часто служит возбудитель. На рисунке 7.22,а показана схема, в которой для питания обмотки возбуждения используется генератор постоянного тока - возбудитель *E,* приводимый во вращение от того же движителя, что и генератор.

Питание от возбудителя подается к обмотке возбуждения LG генератора через контактные кольца на роторе. При возбуждении СГ по такой схеме ток возбуждения СГ изменяется за счет изменения тока возбуждения возбудителя. В отдельных случаях в качестве источника постоянного тока может использоваться аккумуляторная батарея; в этом случае изменение тока возбуждения СГ осуществляется изменением величины регулировочного сопротивления в цепи его обмотки возбуждения.

Главный недостаток такого способа возбуждения заключается в том, что в процессе эксплуатации щетки и коллектор изнашиваются, требуя постоянного ухода, образующаяся при этом угольная пыль

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

загрязняет оборудование, снижает сопротивление изоляции и надежность агрегата.

Если в качестве источника для питания обмотки возбуждения используется сам генератор, то говорят о системе самовозбуждения. Принципиальная схема СГ с самовозбуждением (ССГ) показана на рисунке 7.22,б. Обмотка возбуждения генератора *LG* получает питание от выпрямителя *V,* который подключается через устройство *T* к статорной обмотке генератора. Устройство *T,* управляемое регулятором *AVR,* обеспечивает получение необходимого напряжения для питания обмотки *LG* и поддерживает неизменным напряжение генератора при изменении тока нагрузки.

7.8.2. Процесс самовозбуждения СГ

Динамика процесса самовозбуждения у СГ такая же, как у генераторов постоянного тока. При запуске для генератора с самовозбуждением необходимо обеспечивать его начальное возбуждение за счет магнитного потока остаточного намагничивания магнитной цепи генератора. При вращении ротора этот магнитный поток создает на зажимах статора генератора (рисунок 7.23) остаточную ЭДС, под действием которой в обмотке *LG* появляется ток, и если магнитодвижущая сила обмотки *LG* совпадает по знаку с полем остаточного намагничивания, то происходит рост напряжения статорной обмотки генератора до величины, соответствующей точке пересечения характеристики холостого хода генератора $U = f(i_B)$ и вольтамперной характеристики $I_B = f(U)$ цепи самовозбуждения.

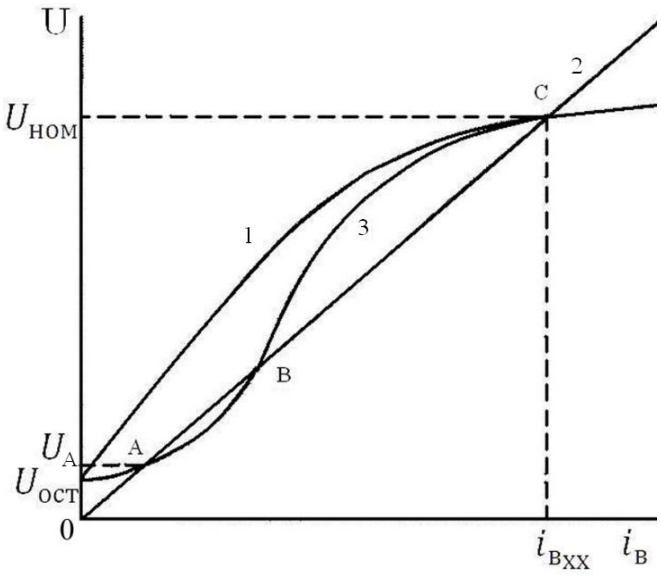


Рисунок 7.23 – Процесс самовозбуждения СГ

Возможны три варианта протекания процесса. В первом случае характеристика холостого хода 1 располагается так, что рост тока возбуждения заканчивается в точке *C,* соответствующей номинальному напряжению. Во втором случае характеристика цепи самовозбуждения *2* пересекается с характеристикой холостого хода *3* в точке *A,* и генератор будет работать с напряжением U_A, которое существенно ниже номинального. В третьем случае магнитодвижущая сила обмотки *LG* размагничивает генератор полностью, и его напряжение становится равным нулю.

В условиях эксплуатации могут иметь место второй и третий случаи. Второй случай объясняется ростом сопротивления цепи самовозбуждения (в период запуска генератора), обусловленным нелинейным характером сопротивлений щеточного контакта и диодов в проводящем на-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

правлении. При малом напряжении, приложенном к этим элементам, их сопротивление достигает заметных значений, что ограничивает рост тока возбуждения. Может наблюдаться также и уменьшение значения $U_{ост}$ вследствие влияния вибрации, высоких температур или размагничивающего действия тока статора.

Третий случай возникает при изменении полярности напряжения, подводимого к обмотке *LG*. Дело в том, что из-за повышенного износа отрицательного кольца практикуется периодически (через 1500 часов) изменение полярности колец, для чего меняют местами провода, подводимые к щеткам. При таком изменении генератор теряет способность к самовозбуждению и его необходимо принудительно возбудить.

Для повышения надежности процесса самовозбуждения повышают величину $U_{ост}$ за счет подбора материала магнитопровода ротора или встраивают в магнитопровод постоянные магниты.

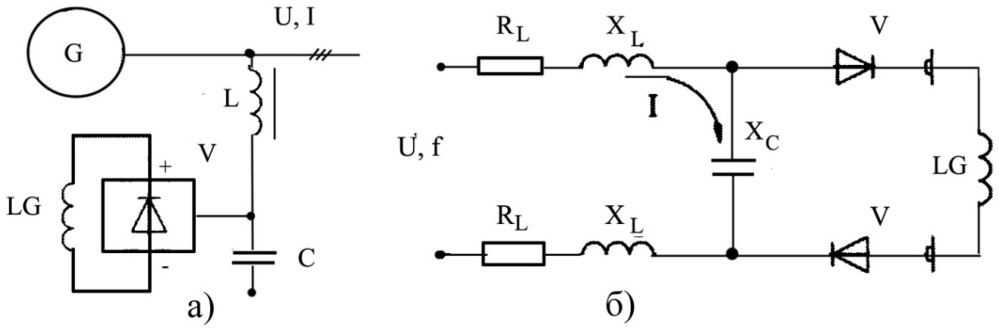


Рисунок 7.24 – Применение конденсаторов для достижения резонанса в процессе самовозбуждения СГ

При запуске генератора частота напряжения увеличивается от нуля, при некоторой частоте в цепи, включающей дроссель *L* и конденсатор С, возникает резонанс ($X_L = X_C$, $U_L = U_C$) и ток в цепи, определяемый соотношением

$$I = U / \sqrt{R^2 + (X_L + X_c)^2},$$

будет максимальным. При этом имеет место равенство $U_C = IX_C = U \cdot X_c/R$ и если $X_C > R$, то $U_C > U$. Увеличение напряжения на конденсаторе вызывает пробой оксидной пленки щеточного контакта, рост тока в обмотке *LG* и самовозбуждение генератора.

На рисунке 7.24,б показана 2-х контурная схема возбуждения с резонансным контуром x_L - x_c.

В ряде генераторов начальное возбуждение обеспечивается:

- временным или постоянным подключением к обмотке возбуждения постороннего источника - генератора начального возбуждения (ГНВ), аккумуляторной батареи *B* или трансформатора *T* начального возбуждения с выпрямителем *V* (рисунок 7.25, б).

- уменьшают кратковременно величину сопротивления цепи СВ, подключая кнопку к зажимам *3, 4* либо используя дополнительные резонансные контуры (рисунок 7.25, б).

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

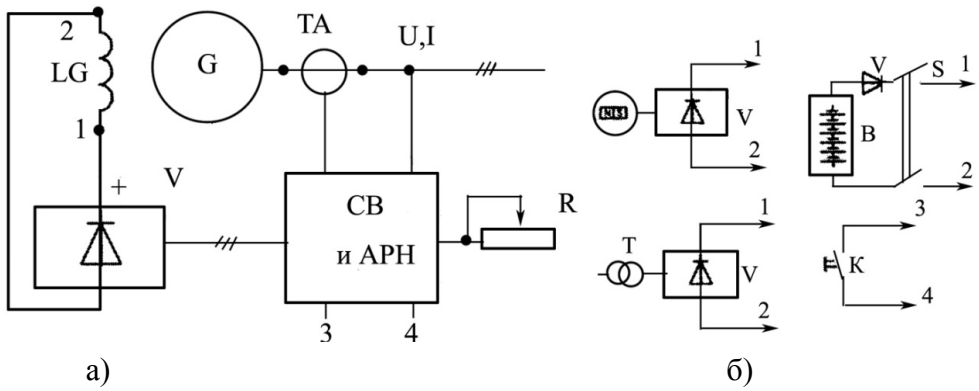


Рисунок 7.25 – Способы обеспечения начального возбуждения СГ

Мощность постороннего источника мала и определяется величиной сопротивления обмотки *LG* и значением тока возбуждения, достаточного для обеспечения надежного самовозбуждения..

7.8.3. Особенности возбуждения бесщеточных СГ

В последнее время широкое распространение получили бесконтактные (бесщёточные) электрические машины с самовозбуждением или с синхронным возбудителем и подвозбудителем, обеспечивающим быстрое и надежное возбуждение синхронного возбудителя. Подвозбудитель, в свою очередь, представляет собой синхронный генератор с постоянными магнитами на роторе.

Типичные схемы возбуждения бесщеточных СГ приведены на рисунке 7.26.

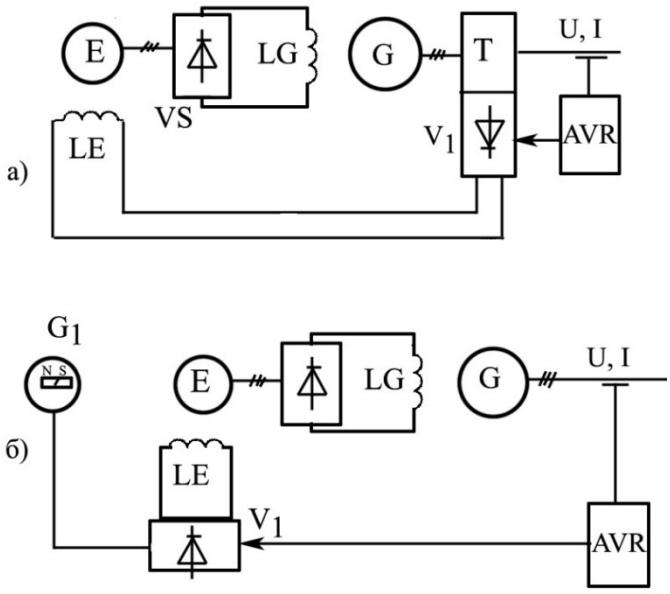


Рисунок 7.26 – Принцип построения системы возбуждения бесщеточного СГ: а – с самовозбуждением; б – с подвозбудителем

К общим особенностям работы систем возбуждения бесщеточного генератора относятся следующие.

1. Меньшая потребляемая мощность (а также масса и габариты) системы возбуждения (СВ), т.к. для питания обмотки возбуждения возбудителя LE необходимая мощность составляет около 5 % от мощности, подводимой к обмотке LG. В целях уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения возбудитель, как правило, работает с повышенной частотой (100...400 Гц), т.е.увеличивают число фаз роторной обмотки переменного тока и пар полюсов обмотки возбуждения возбудителя.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

2. В бесщеточном генераторе управление напряжением генератора как правило, осуществляется изменением тока в обмотке LE. Таким образом, в цепи управления появляется дополнительное инерционное звено - возбудитель, вносящий запаздывание в процесс регулирования напряжения.

Эффективный способ повышения быстродействия СВ бесщеточного генератора заключается в использовании на роторе генератора управляемого выпрямителя, как показано на рисунке 7.26. В конструкции генератора в данном случае появляется устройство передачи управляющего сигнала, состоящее из двух частей: часть 1 – передающая, находится на статоре; часть 2 - принимающая сигнал управления, находится на роторе. В устройстве передачи сигнала управления могут использоваться специальная электрическая машина, конденсатор, трансформатор либо оптические полупроводниковые приборы. На практике реализованы устройства передачи сигнала с использованием трансформатора и оптических полупроводниковых приборов.

3. В бесщеточных генераторах остаточное намагничивание статора возбудителя создает на его зажимах небольшое напряжение, которое обуславливает протекание тока в обмотке LG даже при отключеной СВ, такие генераторы надежно возбуждаются при вводе в действие. Более того, указанное обстоятельство следует учитывать при обслуживании генераторов, т.к. у вращаемого генератора даже при отключенном возбуждении на зажимах статора может наводиться электродвижущая сила, достигающая нескольких десятков вольт, что представляет опасность для персонала.

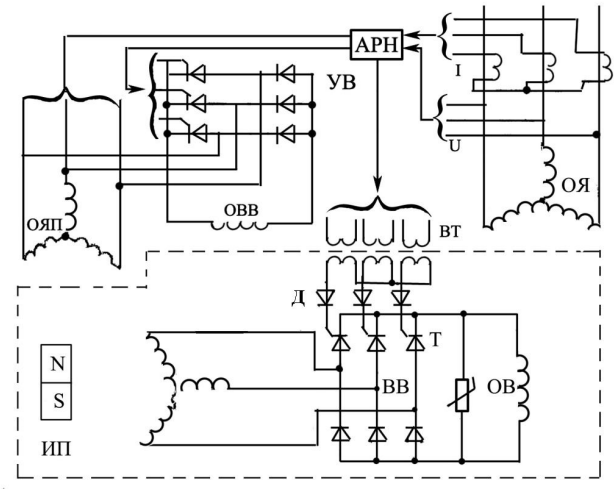


Рисунок 7.27 – Схема регулятора возбуждения с управляемыми вентилями бесщеточного синхронного генератора

На рисунке 7.27 приведена более подробная по сравнению со схемой рисунка 7.26, б схема регулятора возбуждения с управляемыми вентилями бесконтактной синхронной машины.

Питание обмотки возбуждения возбудителя (ОВВ) от обмотки якоря подвозбудителя (ОЯП) осуществляется через полууправляемый выпрямитель УВ. Вращающийся выпрямитель ВВ также является управляемым и помимо диодов Д содержит тиристоры Т, управляющие электроды которых через вспомогательные вентили подключены к расположенным на роторе вторичным обмоткам вращающихся трансформаторов ВТ.

Регулирование напряжения осуществляется электронным автоматическим регулятором напряжения (АРН), который воспринимает сигналы, пропорциональные напряжению и току якоря, и вырабатывает управляющие импульсы. Импульсы по определенному закону подаются на УВ и первичные обмотки ВТ на статоре таким образом, чтобы обеспечить стабилизацию напряжения. Использование управляемого ВВ позволяет осуществить практически безынерционное гашение

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

поля возбуждения при аварийных режимах. Когда к машине предъявляют повышенные требования по надежности, применяется простейший неуправляемый ВВ на диодах, а регулирование осуществляется только с помощью АРН и УВ. В некоторых случаях, наоборот, вместо УВ используется неуправляемый выпрямитель, а быстродействующее регулирование обеспечивается через ВТ и управляемый ВВ.

7.9. Вопросы для самопроверки и контроля знаний

1. Поясните принцип действия СГ.
2. Какими параметрами определяется частота ЭДС СГ?
3. Запишите соотношение для действующего значения ЭДС фазы СГ.
4. Как получается симметричная 3х фазная система ЭДС СГ?
5. Чем обеспечивается синусоидальность ЭДС СГ?
6. Назовите основные элементы конструкции судового СГ.
7. Изобразите конструктивную схему бесщеточного СГ.
8. Поясните действие реакции якоря при различных по характеру нагрузках СГ.
9. Назовите параметры схемы замещения неявнополюсного СГ.
10. Назовите основные параметры схемы замещения явнополюсного СГ.
11. Запишите уравнение электрического равновесия неявнополюсного СГ.
12. Запишите уравнение электрического равновесия явнополюсного СГ.
13. Изобразите упрощенную векторную диаграмму явнополюсного СГ.
14. Изобразите упрощенную векторную диаграмму неявнополюсного СГ.
15. Назовите порядок и смысл построения диаграммы Потье.
16. Поясните причины изменения напряжения СГ при изменении величины и характера нагрузки.
17. Изобразите основные характеристики СГ: холостого хода, внешнюю, регулировочную и короткого замыкания.
18. Запишите соотношение для ОКЗ СГ.
19. Поясните порядок определения основных параметров СГ.
20. Поясните физические процессы самовозбуждения СГ.
21. Поясните принцип построения систем возбуждения судовых СГ.
22. Изобразите схему возбуждения бесщеточного СГ.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 8. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

8.1. Преимущества и недостатки параллельной работы генераторов

Выше были рассмотрены характеристики судовых синхронных генераторов при работе на отдельный (автономный) потребитель электроэнергии. В судовых электроэнергетических системах предусматривается как автономная, так и параллельная работа СГ.

Необходимость включения в параллельную работу нескольких СГ обусловлена тем, что в определенных режимах один генератор не может обеспечить электроэнергией все потребители вследствие недостатка его мощности. Кроме того кратковременное параллельное включение СГ производится на период перевода нагрузки с одного СГ на другой.

К достоинствам параллельной работы СГ относятся следующие положительные факторы эксплуатации судовой электроэнергетической системы:

– возможность экономичного распределения мощностей между параллельно работающими генераторами, обеспечивающего наибольшее значение КПД каждого из них;

– увеличение живучести и обеспечение бесперебойности потребителей питанием, т.к. при дроблении установленной мощности между несколькими СГ уменьшается вероятность отказа всей системы электроснабжения;

– снижение колебаний напряжения и частоты судовой сети при внезапных изменениях нагрузки (при пусках и отключениях мощных потребителей);

– возможность перевода нагрузки с одного генератора на другой без перерыва питания потребителей;

– возможность ремонта и профилактики отдельных СГ с сохранением электроснабжения судна исправными генераторами.

Однако параллельная работа судовых СГ заключает в себе и некоторые недостатки, к основным из которых относятся:

– увеличение токов короткого замыкания в системе и связанная с этим необходимость повышения требований к коммутационной и защитной аппаратуре;

– усложнение систем управления СГ, обеспечивающих распределение нагрузки между генераторами и устойчивость параллельной работы.

8.2. Включение судовых синхронных генераторов на параллельную работу

8.2.1. Особенности работы СГ на сеть большой мощности

В теории электрических машин вопросы параллельной работы синхронных генераторов – условия включения на параллельную работу, регулирование их активной и реактивной мощности, векторные диаграммы – обычно рассматриваются при условии, что отдельный генератор ограниченной мощности включается на параллельную работу

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

с сетью такой большой мощности, что ее напряжение U_c и частота f_c являются постоянными и не зависят от режима работы данного генератора. Это упрощает анализ физических процессов в системе, позволяет ограничить их процессами, происходящими в подключаемом генераторе.

Параллельная работа СГ соизмеримой мощности, применяемая в судовых электроэнергетических системах, характеризуется рядом отличительных факторов и будет рассмотрена отдельно.

8.2.2. Условия включения СГ на параллельную работу

Схема включения СГ на параллельную работу с сетью показана на рисунке 8.1, где сеть представлена генератором С, работающим на нагрузку $z_н$, а подключаемый генератор обозначен буквой Г. Подключение генератора Г к сети производится контактами выключателя (автомата) К. Обозначения параметров на рисунке 8.1 приведены для одной фазы.

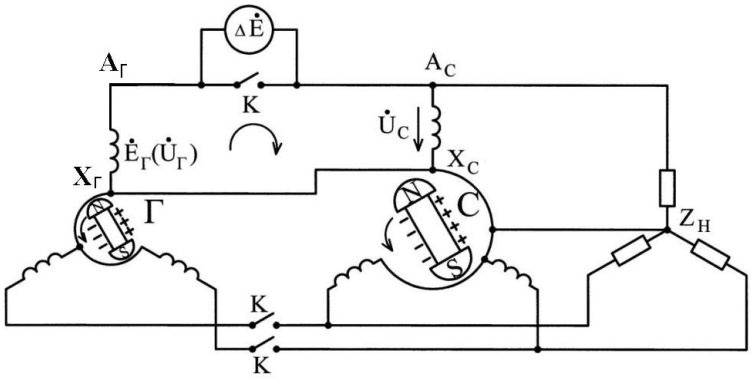


Рисунок 8.1 - Условная схема включения СГ на параллельную работу

Если задаться положительным направлением напряжения $\dot{U}_c$ контура генератор С – нагрузка $Z_н$ от начала фазы A_c к концу X_c, а за положительное направление ЭДС и тока в контуре Г-С направление, совпадающее с направлением обхода контура, показанном стрелкой, то ЭДС $\dot{E}_г$ и напряжение $\dot{U}_г$ будут положительны, если они направлены от $X_г$ к $A_г$. Таким образом, в контуре Г-С действует ЭДС

$$\Delta\dot{E} = \dot{E}_г + \dot{U}_c , \qquad (8.1)$$

которая может быть измерена при разомкнутом выключателе К.

ЭДС $\Delta\dot{E}$ зависит как от соотношения $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_c$ по величине, так и от их сдвига по фазе. Если векторы $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_c$ равны по величине и сдвинуты по фазе на угол $\alpha = \pi$ (рисунок 8.2, а), то ЭДС $\Delta\dot{E}$ и ток в контуре Г-С равны нулю. Естественно, что ЭДС $E_г$ и напряжение U_c должны иметь одинаковую частоту, тогда векторы $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_c$ сохраняют показанное на рисунке 8.2, а положение друг относительно друга. При этих условиях контакты автомата К могут быть замкнуты и генератор Г подключается на параллельную работу с сетью.

Таким образом, включение однофазного генератора на параллельную работу с сетью допускается при соблюдении трех условий:

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

– равенства действующих значений напряжения сети и ЭДС генератора;

– равенства частот генератора и сети;

– сдвига по фазе между напряжением сети и ЭДС генератора на 180°, т.е.

$$E_г = U_с; f_г = f_с (\text{или } \omega_г = \omega_с); \dot{E}_г = -\dot{U}_с$$

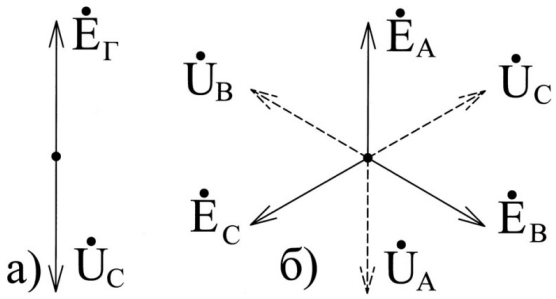


Рисунок 8.2 – Векторные диаграммы одно- и трехфазного СГ для включения на параллельную работу

При выполнении этих условий в цепи подключаемого генератора не возникает уравнительного тока.

При включении трехфазного синхронного генератора на параллельную работу также необходимо, чтобы сразу после включения якоря генератора на общие шины ток якоря оставался равным нулю. Поскольку в данном случае ЭДС генератора и напряжение сети являются периодическими трехфазными величинами, для обеспечения этого требования надо выполнить еще одно условие - согласовать порядок чередования фаз подключаемого генератора и сети. Говорят, что генератор и сеть должны иметь одинаковый порядок чередования фаз. Векторная диаграмма ЭДС трехфазного генератора и напряжения сети показана на рисунке 8.2,б.

Порядок следования фаз сети обуславливается порядком прохождения полюсов под обмотками соответствующих фаз работающих на сеть генераторов, или направлением их вращения. В стационарных условиях направления вращения приводных двигателей (турбины, дизелей и др.) фиксировано и порядок чередования фаз определяют только при первом включении. В судовых условиях порядок чередования фаз обычно проверяется после ремонтных работ, связанных с демонтажем генератора или ГРЩ, при включениях на параллельную работу с береговыми системами или с ЭЭС других судов. В лабораторных условиях при постановке лабораторных работ, в процессе научных исследований очередность фаз проверяют при каждой новой сборке схемы.

Совокупность мероприятий, направленных на соблюдение названных выше условий включения СГ на параллельную работу, называют синхронизацией. При этом ЭДС генератора регулируют путем изменения тока в обмотке возбуждения, частоту - изменением оборотов приводного двигателя, а порядок чередования фаз и фазовый сдвиг ЭДС генератора и напряжения сети проверяют при помощи специальных приборов – синхроноскопов.

8.2.3. Физические процессы в СГ при нарушении условий синхронизации

Рассмотрим, к каким последствиям может привести невыполнение любого из условий синхронизации.

1. Если $E_г \neq U_с$, а остальные условия выполняются, то в цепи обмотки якоря генератора в момент включения возникает уравнитель–

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ный реактивный ток, обусловленный величиной ΔE и равный

$$\dot{I}_a = \frac{\Delta\dot{E}}{jx_c} = \frac{\dot{E}_г + \dot{U}_c}{jx_c} \qquad (8.2)$$

где X_c - синхронное индуктивное сопротивление подключаемого генератора.

На рисунке 8.3,а показана векторная диаграмма для одной фазы перевозбужденного генератора ($E_г > U_c$), включаемого на параллельную работу. В этом случае вектор $\dot{I}_a$, сдвинутый по отношению к вектору $\Delta\dot{E}$ на угол $\frac{\pi}{2}$, отстает от вектора $\dot{E}_г$ на угол $\frac{\pi}{2}$ и в СГ возникает размагничивающая реакция якоря, уменьшающая результирующий магнитный поток и ЭДС генератора.

Если к сети подключается недовозбужденный генератор ($E_г < U_c$), (рисунок 8.3,б,) то вектор тока $\dot{I}_a$ отстает от вектора $\Delta\dot{E}$ и опережает вектор ЭДС $\dot{E}_г$ на 90°, что подчеркивает его подмагничивающее действие на основной магнитный поток.

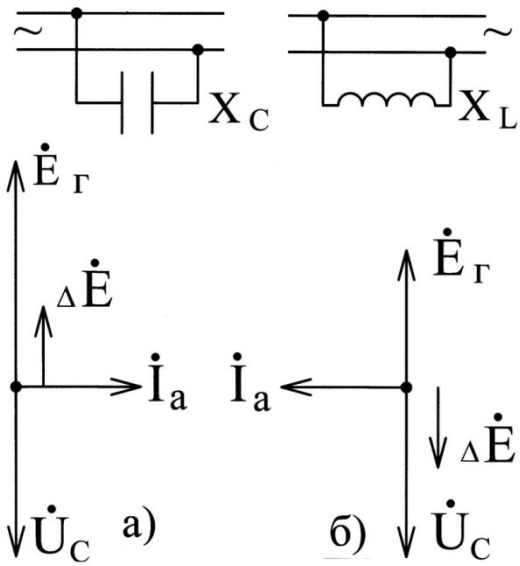


Рисунок 8.3 – Подключение к сети перевозбужденного (а) и недовозбужденного (б) синхронного генератора

Таким образом, по отношению к сети недовозбужденный генератор эквивалентен индуктивной нагрузке, а перевозбужденный – емкостной нагрузке. При этом уравнительный ток $\dot{I}_a$ создает в обмотке якоря падение напряжения $-jI_a x_c$ которое изменяет напряжение на выводах генератора, делая его по величине равным напряжению сети, т.е.

$$\dot{U}_г = \dot{E}_г - j\dot{I}_a x_c \qquad (8.3)$$

Возникновение реактивного уравнительного тока сопровождается процессами обмена реактивной мощностью между генератором и сетью и в рассматриваемом случае не представляет опасности для генератора или для сети. Однако этот ток вызывает дополнительный нагрев обмотки и поэтому является нежелательным.

Более подробно регулирование реактивной мощности генератора рассматривается в разделе 8.8.

2. Если $f_г \neq f_c$, то в цепи генератора возникает биение напряжений, обусловленное постоянно изменяющимся величиной и фазой ΔE

$$\Delta\dot{E} = \dot{E}_г + \dot{U}_c \quad \text{или}$$

$$\Delta e = E_{mr}\sin\omega_г t - U_{mc}\sin\omega_c t = 2E_{mr}\cos\frac{\omega_г + \omega_c}{2}t \cdot \sin\frac{\omega_г - \omega_c}{2}t, \qquad (8.4)$$

что показано на рисунке 8.4, где напряжение сети выражается синусои-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

дальной кривой u_c с частотой $\omega_c = 2\pi f_c$, а ЭДС подключаемого генератора – кривой $e_г$ с частотой $\omega_г = 2\pi f_г$. Величина Δe приобретает характер кривой биения, имеющей минимумы при сдвиге фаз u_c и $e_г$ на 180° и максимумы – при совпадении фаз напряжения сети и ЭДС генератора. При этом периодически изменяется как величина уравнительного тока I_a в цепи якоря генератора, так и его фаза по отношению к $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_c$. Ток $\dot{I}_a$ вызывает не только повышенный нагрев обмоток, но и резкие знакопеременные механические толчки на валу генератора.

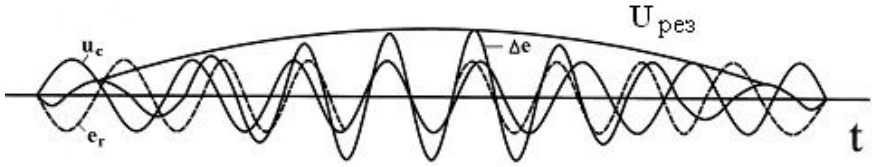


Рисунок 8.4 – Биение напряжений при разности частот генератора и сети

3. Если векторы $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_c$ вращаются синхронно, но не находятся в противофазе, то возникает составляющая $\Delta\dot{E} = \dot{E}_г + \dot{U}_c$, не совпадающая по фазе с $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_c$. Это вызывает в цепи якоря СГ уравнительный ток I_a, который имеет не только реактивную, но и активную составляющие.

На рисунке 8.5, а вектор $\dot{E}_г$ сдвинут по отношению к вектору $\dot{U}_c$ на угол 180°+Θ. Уравнительный ток $\dot{I}_a$, отставая от $\Delta\dot{E}$ на 90° и от $\dot{E}_г$ на угол Ψ, имеет активную составляющую, совпадающую с $\dot{E}_г$. Это значит, что при включении на сеть СГ сразу принимает на себя активную нагрузку, вследствие чего происходит замедление вращения ротора и уменьшение угла Θ до нуля. Если генератор включается на сеть в момент, когда ЭДС $E_г$ сдвинута по отношению к $\dot{U}_c$ на угол 180°- Θ (рисунок 8.5,б), то уравнительный ток будет иметь активную составляющую $I_a\cos\Psi$, сдвинутую по отношению к ЭДС $\dot{E}_г$ почти на 180°. Это соответствует переходу машины в двигательный режим, за счет чего ротор получит некоторое ускорение и угол Θ после некоторых колебаний станет равным нулю.

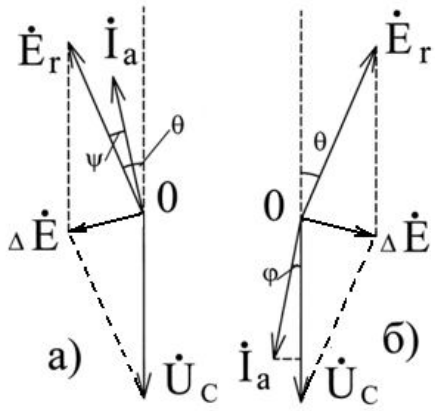


Рисунок 8.5 – Включение СГна параллельную работу с сетью при неполной противофазе ЭДС и напряжения

Во всех случаях нарушения третьего условия синхронизации появление уравнительного тока сопровождается значительными механическими толчками, способными вызвать повреждение генератора или приводного двигателя.

4. Если неодинаково чередование фаз генератора и сети, то включение на параллельную работу невозможно. Предположим, что на общие шины работают четыре одинаковых генератора и к ним на параллельную работу включается пятый такой же генератор с нарушением порядка следования фаз. Эквивалентное индуктивное сопротивле-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ние четырех параллельно работающих генераторов равно $0{,}25x_c$, а включаемого – x_c. Для автономно работающего генератора ток при внезапном коротком замыкании составляет

$$I_k = \frac{E_г}{x''_d} \quad , \tag{8.5}$$

где x''_d – это сверхпереходное индуктивное сопротивление (при наличии успокоительной обмотки).

При нарушенном чередовании фаз пятого генератора уравнительный ток определяется из соотношения

$$I_{ак} = \frac{E_г + U_c}{x''_d + 0{,}25x''_d} \approx 1{,}6\frac{E_г}{x''_d} \approx 1{,}6I_К \, . \tag{8.6}$$

Усилия в лобовых частях обмотки статора, рассчитанных на величину $I_к$, возрастает в $1{,}6^2 \approx 2{,}5$ раза по сравнению с режимом к.з., что может привести к разрушению машины.

Если же на параллельную работу включается два одинаковых генератора, что имеет место в судовых условиях, то уравнительный ток при нарушении чередования фаз составляет

$$I_{ак} = \frac{E_г + U_c}{x''_d + x''_d} = \frac{E_г}{x''_d} = I_К \ , \tag{8.7}$$

т.е. в этом случае уравнительный ток равен току внезапного короткого замыкания самого генератора. Ясно, что и этот режим является аварийным не только для генераторов, но и для всей электроэнергетической системы.

8.2.4. Способы синхронизации

Синхронные генераторы могут быть включены на параллельную работу способами точной синхронизации, грубой синхронизации и самосинхронизации. Осуществляются эти способы вручную, полуавтоматически и автоматически.

Точная синхронизация.

Выполнение всех названных выше условий при включении генератора на параллельную работу называется точной синхронизацией. На современных судах точная синхронизация обеспечивается специальными устройствами автоматической или полуавтоматической синхронизации. Эти устройства изучаются в курсе судовых электроэнергетических систем. Вероятность возникновения в судовых условиях ситуаций, приводящих к выходу из строя систем автоматического управления, требует знания и умения использовать схемы неавтоматической синхронизации и ручного включения генераторов на параллельную работу.

Проверка выполнения первого и предварительная проверка второго условий синхронизации осуществляется сравнением напряжения и частоты генератора и сети с помощью вольтметра и частотомера, которые подключаются к зажимам сети или генератора через вольтметровый переключатель. При этом не имеет значения, на какие фазы включены приборы в том или другом случае. Изменением тока возбуждения генератора добиваются выполнения равенства $E_г = U_c$. Изменением частоты вращения первичного двигателя путем воздействия на серводвигатель подачи топлива (пара) устанавливают приблизительное равенство час-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

тот $f_г \approx f_с$. Окончательная проверка второго, а также проверка третьего и четвертого условий производится при помощи синхроноскопа.

Простейший ламповый синхроноскоп состоит из трех ламп накаливания, рассчитанных на двойное фазное напряжение. Синхроноскоп может работать на потухание, если каждая лампа включена в разрез одной из фаз (рисунок 8.6, а), или на вращение огня, когда одна лампа включена в одну из фаз, например, в разрез фазы А, а две другие лампы подключены перекрестно к фазам В и С, как показано на рисунке 8.6, в. В обоих случаях к одной из фаз желательно подключить нулевой вольтметр.

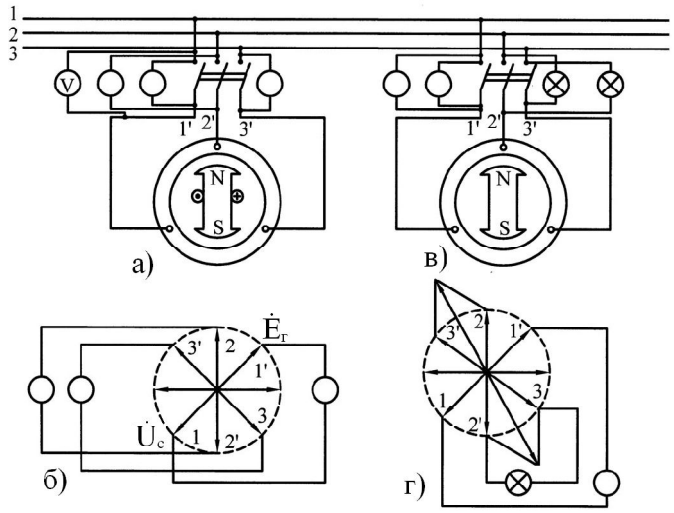


Рисунок 8.6 - Варианты включения лампового синхроноскопа и соответствующие векторные диаграммы

Благоприятный момент для подключения генератора к сети при использовании схемы на рисунке 8.6, а создается тогда, когда все три лампы гаснут. На рисунке 8.6, б представлены диаграммы напряжений сети $\dot{U}_с$ и ЭДС генератора $\dot{E}_г$ по отношению к контуру, включающему обмотки этих генераторов, и фазные лампы. Сумма векторов, к концам которых условно присоединены лампы, дают напряжение на зажимах соответствующей лампы. Из рисунка 8.6,б видно, что результирующее напряжение на каждой лампе в данный момент времени равно нулю, поэтому они не должны гореть. Это и указывает на благоприятные условия включения генератора на шины.

Следует, однако, иметь в виду, что совершенно точного указания на наступление нужного момента включения фазные дампы не дают, так как гаснут они уже при одной трети номинального напряжения. Поэтому при соединении ламп на потухание включение генератора необходимо производить приблизительно в середине их темного периода, когда сумма $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_с$ будет почти точно равна нулю. Лучшие результаты дает одновременное подключение к одной из фаз нулевого вольтметра с нулевой точкой посредине шкалы; прохождение стрелки этого прибора через нуль точно определяет момент полной компенсации $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_с$, показанный на векторной диаграмме рисунка 8.6, б.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Неодновременное загорание и потухание ламп, включенных по схеме рисунка 8.6, а показывает, что чередование фаз у генератора и сети неодинаково. В этом случае необходимо пересоединить любые две фазы со стороны генератора.

Соединение ламп по схеме рисунка 8.6, в при некоторой разности частот $f_г$ и f_c, как это следует из векторной диаграммы рисунка 8.6, г, дает поочередное загорание и потухание ламп, что создает, если их расположить по кругу, впечатление вращения огня. Частота загорания ламп и, следовательно, кажущаяся скорость вращения огня будут соответствовать разности частот $f_г$ и f_c. В том случае, если подключенный к сети генератор вращается со скоростью меньшей, чем синхронная, вращение света происходит в одну сторону, если скорость выше синхронной, вращение света происходит в другую сторону. Таким образом, по направлению вращения света можно определить необходимость увеличивать или уменьшать скорость вращения генератора для приближения его к синхронизму, что не позволяет определить включение ламп на потухание.

Точно момент включения генератора на параллельную работу при такой схеме подключения ламп определяется по потуханию первой лампы, включенной в разрыв одной фазы и прохождению стрелки нуль-вольтметра через нуль. При этом две другие лампы горят самым ярким накалом, что соответствует диаграмме рисунка 8.6, г.

Промышленные генераторы имеют более высокое напряжение, чем обычные лампы накаливания, поэтому лампы синхроноскопа включают через трансформаторы напряжения. Важным условием правильного включения ламп в этом случае является то, чтобы трансформаторы принадлежали к одной и той же группе, например $Y/Y-12$, или $Y/Y-6$. В противном случае потухание или вращение света ламп, включенных по рассмотренным выше схемам, может происходить не в моменты точной синхронизации, а в моменты полного совпадения $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_c$ и при подключении генератора произойдет наброс тока, соответствующий внезапному короткому замыканию.

В судовых системах управления синхронным генератором применяются не ламповые, а стрелочные синхроноскопы, являющиеся серийными приборами морского исполнения, в которых используется электромагнитный принцип действия. Стрелка прибора соединена с вращающимся ротором, направление вращения которого зависит от соотношения частот $f_г$ и f_c, а частота вращения – от их разности. Прибор устроен так, что при равенстве частот стрелка направлена вертикально вверх. Следовательно, включать генератор на параллельную работу следует в тот момент, когда стрелка находится в вертикальном положении, или с некоторым упреждением.

Грубая синхронизация отличается от точной синхронизации тем, что генератор подключают на шины ГРЩ не прямо, а через индуктивное сопротивление $X_р$ (реактор), включенное в каждую фазу. Это сопротивление ограничивает уравнительные токи даже при значительных сдвигах ЭДС $E_г$ и напряжения U_c по фазе и поэтому не требуется высокой точности при выборе момента включения генератора. После включения на параллельную работу генератор втягивается в синхронизм, а реактор шунтируется специальным контактором.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Самосинхронизация. При этом способе синхронизации невозбужденный генератор приводится во вращение со скоростью, близкой к синхронной, обмотка возбуждения замыкается на некоторое активное сопротивление, генератор напрямую подключается к сети, а затем в обмотку возбуждения подается ток. Возбужденный генератор сам втягивается в синхронизм подобно синхронному двигателю при асинхронном пуске. Включение статора генератора в сеть при синхронизации с разомкнутой обмоткой возбуждения недопустимо, так как при этом в обмотке возбуждения поле реакции якоря индуктирует большую ЭДС, опасную для изоляции обмотки.

Несмотря на простоту данного способа синхронизации, в судовых системах он практически не находит применения из-за возникновения больших провалов напряжения в сети.

8.3. Регулирование активной мощности при работе генератора с сетью

Обратимся к рисунку 8.7, а, характеризующему режим холостого хода СГ, включенного на параллельную работу с мощной сетью. На этой векторной диаграмме изображены векторы магнитного потока $\dot{\Phi}_{ог}$, создающего ЭДС генератора и потока $\dot{\Phi}_{с}$, условно изображающего магнитное поле обобщенного генератора сети и создающего свою ЭДС, равную в данном случае напряжению сети.

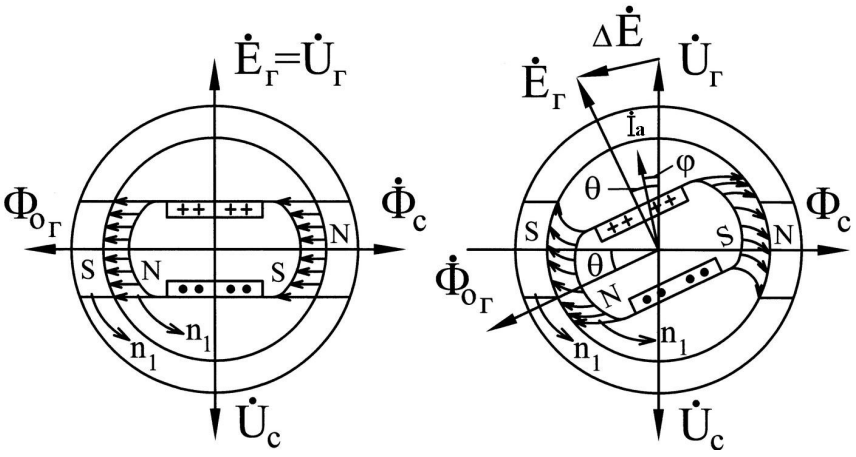


Рисунок 8.7 – Иллюстрация приема нагрузки на генератор, включенный на параллельную работу с сетью

Ротор вращается со скоростью n_1, имеет место равенство $\dot{E}_г = \dot{U}_с$, они сдвинуты на угол 180°, ток в обмотке якоря равен нулю. Для того, чтобы нагрузить данный генератор, необходимо увеличить его электрическую мощность, а это можно сделать только за счет увеличения вращающего момента приводного двигателя путем подачи пара в турбину или топлива в дизель.

С увеличением вращающего момента приводного двигателя ротор нагружаемого генератора получает некоторое ускорение в направлении вращения, и ось ротора смещается по отношению к оси магнитного потока $\dot{\Phi}_{с}$ на некоторый угол Θ, как это показано на рисунке 8.7, б.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Естественно, что на такой же угол Θ смещается и вектор ЭДС генератора $\dot{E}_г$, который отстает от вектора $\dot{Ф}_{ог}$ на $\frac{\pi}{2}$, а угол между векторами $\dot{E}_г$ и $\dot{U}_г$ также равен Θ. В результате такого смещения возникает разность ЭДС $\Delta E = \dot{E}_г + \dot{U}_г$, которая вызывает появление тока якоря

$$\dot{I}_a = -j\frac{\Delta\dot{E}}{x_c}, \qquad (8.8)$$

отстающего от ЭДС $\Delta\dot{E}$ на угол $\frac{\pi}{2}$. Однако в данном случае ток имеет активную составляющую, совпадающую по фазе с напряжением $\dot{U}_г$ и ЭДС генератора $\dot{E}_г$, и генератор отдает в сеть мощность, равную

$$P_г = mE_г I_a \cos\psi = mU_г I_a \cos\varphi, \qquad (8.9)$$

где Ψ – угол между векторами $\dot{E}_г$ и $\dot{I}_a$; φ – угол между векторами $\dot{U}_г$ и $\dot{I}_a$.

Наряду с появлением активной мощности $P_г$ в генераторе возникает тормозной электромагнитный момент, который уравновешивает возросший вращающий момент приводного двигателя. Из-за этого прекращается увеличение угла Θ и ротор вращается синхронно с магнитным полем $Ф_c$ с опережающим углом Θ.

Таким образом, для увеличения активной мощности генератора, включенного на параллельную работу с сетью, т.е. для приема на него нагрузки нужно, не изменяя ЭДС по величине, изменить ее по фазе, увеличить угол Θ между напряжением $\dot{U}_г$ и ЭДС $\dot{E}_г$, что достигается увеличением мощности, подводимой от приводного двигателя.

Необходимо обратить внимание на то, что при Θ = 0 линии магнитной индукции в воздушном зазоре (рисунок 8.7,а) имеют минимальную длину, а при увеличении угла Θ длина этих линий возрастает, они как бы растягиваются подобно пружинам, что символизирует возникновение тормозящей электромагнитной силы.

Из диаграммы рисунка 8.7, б видно, что в рассматриваемом режиме работы ток якоря I_a имеет еще и емкостную составляющую по отношению к напряжению $U_г$. Ее физический смысл заключается в том, что с увеличением нагрузки генератора (тока I_a) возрастает падение напряжения в сопротивлениях обмотки статора, а емкостная составляющая тока I_a обеспечивает подмагничивающее действие реакции якоря генератора, необходимое для поддержания равенства $\dot{U}_г = \dot{U}_c$.

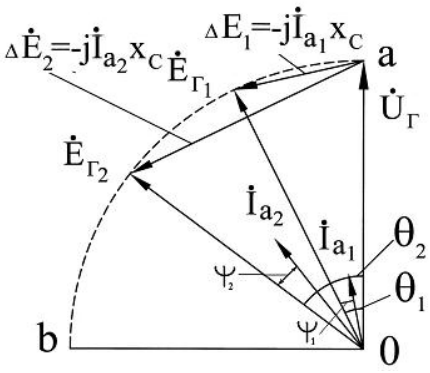


Рисунок 8.8 – Векторные диаграммы СГ при увеличении активной нагрузки

Изменение нагрузки генератора, работающего параллельно с мощной сетью, при изменении ЭДС $\dot{E}_г$ по фазе можно проследить по векторной диаграмме рисунка 8.8. Если после приема нагрузки угол между векторами $\dot{U}_г$ и $\dot{E}_{г1}$ составляет $Θ_1$, то ему соответствует величина $E_{г1}$, ток якоря I_{a1}, а величина на-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

грузки составляет $P_1 = mE_{г1}I_{a1}cos\Psi_1$. Увеличивая подачу пара или топлива к приводимому двигателю, получаем положение вектора, определяемое углом Θ_2, а мощность генератора равна $P_2 = mE_{г1}I_{a2}cos\Psi_2$.

При дальнейшем увеличении подводимой от приводного двигателя мощности конец вектора $\dot{E}_г$ будет перемещаться по дуге окружности ab. При этом будут увеличиваться значения $\Delta\dot{E}$ и $\dot{I}_a$ и электрическая мощность генератора будет также увеличиваться.

Наибольшая мощность достигается при $\Theta=90^0$, что соответствует пределу устойчивой работы генератора с сетью.

8.4. Угловая характеристика неявнополюсного синхронного генератора

При исследовании параллельной работы СГ с сетью, т.е. с другими синхронными машинами, удобно ее электромагнитную мощность выражать через напряжение сети $\dot{U}_г = \dot{U}_c$, ЭДС обмотки статора E_0 и угол Θ между векторами $\dot{U}_г$ и $\dot{E}_0$, определяемый угловым положением ротора по отношению к оси результирующего магнитного поля. Эти величины полностью определяют электромагнитную мощность и при $\dot{U}_c$ = const, f = const (бесконечно мощная сеть) и $\dot{E}_0$ =const (постоянное возбуждение) мощность зависит только от угла Θ. Связь этих величин устанавливается угловой характеристикой.

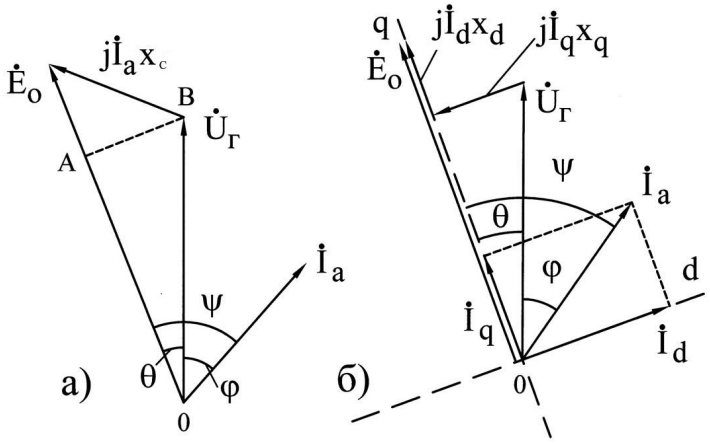


Рисунок 8.9 – Векторные диаграммы неявнополюсного (а) и явнополюсного (б) генераторов

Таким образом, угловой характеристикой синхронной машины называется зависимость активной электромагнитной мощности $P_{эм}$ от угла Θ при постоянных значениях E_0, U_c и f.

Угловая характеристика всегда строится для строго определенного значения тока возбуждения $I_в$.

Аналитическое выражение угловой характеристики неявнополюсной М может быть получено путем несложных преобразований из соотношения

$$P_г = mE_г I_a \cos\psi = mU_г I_a \cos\varphi \qquad (8.10)$$

где Ψ – угол между векторами $\dot{E}_г$ и $\dot{I}_a$; φ – между векторами $\dot{U}_г$ и $\dot{I}_a$.

Из векторной диаграммы, построенной без учета активного сопротивления обмотки статора, (рисунок 8.9,а) следует, что

$$\cos\psi = \frac{AB}{I \cdot x_c} = \frac{U\sin\theta}{I \cdot x_c} \quad . \qquad (8.11)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Подставляя значение $\cos\psi$ в выражение (8.10), получаем

$$P_{эм} = m\frac{U_г E_г}{x_c}\sin\theta \qquad (8.12)$$

При постоянных значениях $E_г$ и $U_г$ угол Θ определяет активную мощность машины и поэтому называется углом нагрузки.

На рисунке 8.10, в соответствии с выражением (8.12) построена угловая характеристика $P_{эм} = f(\theta)$

Электромагнитный момент СМ определяется из соотношения

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\Omega_c} = m\frac{U_г E_г}{\Omega_c x_c}\sin\theta\,, \qquad (8.13)$$

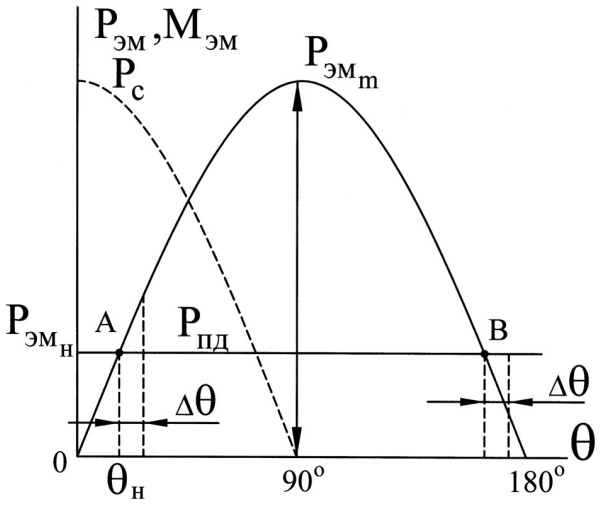


Рисунок 8.10 – Угловая характеристика неявнополюсного синхронного генератора

поэтому угловая характеристика в другом масштабе является и характеристикой электромагнитного момента в зависимости от угла Θ.

Из соотношения (8.12) и рисунка 8.10 следует, что для неявнополюсного синхронного генератора максимум электромагнитной мощности и электромагнитного момента достигаются при Θ = 90° и соответственно равны

$$P_{эмm} = m\frac{U_г E_г}{x_c}\,, \qquad (8.14)$$

$$M_{эмm} = m\frac{U_г E_г}{\Omega_c x_c}\,. \qquad (8.15)$$

Таким образом, предельная мощность генератора зависит от $E_г$, $U_г$ и x_c. Напряжение генератора $U_г$ определяется режимом работы сети и сохраняется, как правило, постоянным. ЭДС $E_г$ при данном режиме работы определяется напряжением $U_г$ и параметрами машины, однако при сравнительно большом изменении параметров ЭДС изменяется не столь значительно. Поэтому максимальная мощность, а значит и перегрузочная способность синхронной машины тем больше, чем меньше индуктивное сопротивление x_c или чем больше ОКЗ

$$ОКЗ \approx \frac{1}{x_c}. \qquad (8.16)$$

Мощность $P_{пд}$, развиваемая приводным двигателем, не зависит от угла Θ, а определяется количеством сгораемого топлива. На рисунке 8.10 эта мощность показана прямой горизонтальной линией. При установившемся режиме работы номинальная электромагнитная мощность генератора $P_{эмн}$ равна мощности приводного двигателя $P_{пд}$ (точка А на рисунке 8.10). Отношение

$$K_п = \frac{P_{эмm}}{P_{эмн}} \qquad (8.17)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

называется перегрузочной способностью синхронной машины или статической перегружаемостью.

Для неявнополюсных машин

$$K_n \approx \frac{1}{\sin \theta_н}, \qquad (8.18)$$

где $\theta_н$- значение угла θ при номинальном режиме работы.

Обычно для турбогенераторов $\theta_н \approx 25\ldots30°$, поэтому $К_п \approx 2{,}0$..

8.5. Статическая и динамическая устойчивость параллельной работы СГ с сетью

Пересечение прямой $P_{пд}$ с кривой $P_{эм}$ на рисунке 8.10 определяет два возможных режима работы генератора - в точках А и В, однако, только режим в точке А является устойчивым.

Действительно, если по случайным причинам ротор генератора получит некоторое ускорение и угол Θ возрастет на некоторую малую величину ΔΘ, то мощность $P_{эм}$ также возрастет, хотя мощность, подводимая с вала, не изменяется. Генератор будет отдавать в сеть большую мощность, чем получит от турбины и его ротор будет затормаживаться, угол Θ уменьшится и генератор вернется к номинальному режиму в точке А. Наоборот в точке В положительному приращению угла Θ соответствует отрицательное приращение мощности $\left(-\Delta P_{эм}\right)$ и устойчивая работа генератора невозможна.

Таким образом, работа синхронного генератора с сетью устойчива, если положительному (отрицательному) приращению угла ΔΘ соответствует положительное (отрицательное) приращение мощности $\Delta P_{эм}$, т.е.

$$\frac{\Delta P_{эм}}{\Delta \theta} > 0 \ . \qquad (8.19)$$

Это условие выполняется для левой (восходящей) ветви угловой характеристики.

Предел отношения

$$\lim \frac{\Delta P_{эм}}{\Delta \theta} = \frac{dP_{эм}}{d\theta} = m \frac{U_г E_г}{x_c} \cos \theta \qquad (8.20)$$

носит название синхронизирующей мощности, которая обозначается P_c.

Физически синхронизирующая мощность определяет силу, которая удерживает машину в синхронизме с сетью, упругую электромагнитную связь ротора в вращающимся магнитным полем. Все параллельно работающие генераторы электрически связаны между собой, а поэтому связаны и их магнитные поля; все они вращаются синхронно. Поскольку эти поля замыкаются через свои роторы, то и роторы генераторов оказываются связанными между собой. Таким образом, электрическая связь генераторов обусловливает связь магнитную, которая может быть условно представлена как эластическая механическая связь, которая позволяет роторам смещаться друг относительно друга в пределах некоторых значений угла Θ (от 0 до 90°), но не позволяет им вращаться с разными скоростями. Такая связь может быть уподоблена действию упругих пружин, связывающих поле генератора и вращающийся ротор. Если по каким-либо причинам угол Θ

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

превысит 90° магнитная связь нарушается, ротор выпадает из синхронизма, что эквивалентно разрыву пружин.

Кривая синхронизирующей мощности сдвинута относительно угловой характеристики на угол 90° влево (пунктир на рисунке 8.10). Синхронизирующая мощность максимальна, когда $P_{эм} = 0$. Когда электромагнитная мощность максимальна, мощность $P_c = 0$, т.е. машина, находится на пределе статической устойчивости. При выпадении из синхронизма она перестает работать как синхронный генератор, переходит в асинхронный режим. В этом режиме работы с синхронной машины должно быть снято возбуждение и она должна быть немедленно выведена из работы.

По аналогии с синхронизирующей мощностью величина

$$M_c = \frac{dM_{эм}}{d\theta} = m\frac{U_г E_г}{\Omega_c x_c}\cos\theta \qquad (8.21)$$

носит название синхронизирующего момента.

Под синхронизирующим моментом следует понимать момент вращения, с которым ротор при его отключении от положения равновесия стремится вернуться к этому положению.

Синхронизирующая мощность P_c и синхронизирующий момент M_c положительны для устойчивой зоны угловой характеристики и отрицательны для неустойчивой зоны. Поэтому критерий статической устойчивости можно записать не только в виде неравенства (8.19), но и в форме

$$P_c > 0 \quad \text{или} \quad M_c > 0 \qquad (8.22)$$

Синхронизирующие мощность и момент обусловлены взаимодействием параллельно работающих генераторов. Поэтому ясно, что для автономно работающего генератора эти понятия не приемлемы.

Под динамической устойчивостью параллельной работы синхронных генераторов понимают их способность воспринимать внезапные и большие возмущения (изменения нагрузки, вращающего момента, тока возбуждения) без нарушения синхронизма.

Анализ динамической устойчивости предусматривает учет инерционных показателей роторов и возможность возникновения их колебаний относительно некоторого положения, соответствующего определенной нагрузке.

Для пояснения сказанного рассмотрим рисунок 8.11,а, на которой установившийся режим работы СГ с сетью характеризуется точкой А. В этой точке $P_{п1} = P_{эм1}$, а угол нагрузки составляет Θ_1. При внезапном возрастании мощности приводного двигателя до значения $P_{пд2}$ ротор генератора получает ускорение и угол Θ будет увеличиваться. Новому значению мощности $P_{пд2}$ соответствует электромагнитная мощность генератора $P_{эм2}$, которая достигается при угле Θ_2, однако в силу инерции ротор пройдет положение, соответствующее углу Θ_2 и достигнет некоторого значения Θ_3, пока не будет погашено приращение кинетической энергии агрегата. Заштрихованные площади на рисунке 8.11,а пропорциональны избыточной кинетической энергии вращающихся масс.

Далее ротор начнет замедляться, а угол Θ уменьшается до значения, близкого к Θ_1 и т.д. Постепенно этот колебательный процесс затухнет и установится режим, соответствующий углу Θ_2 (точка В).

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

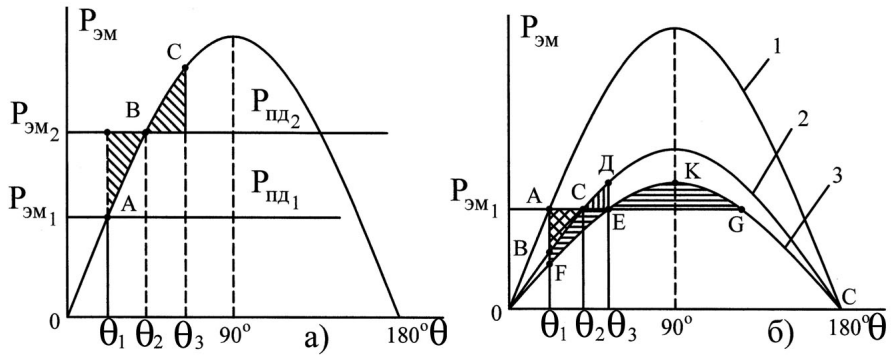


Рисунок 8.11 – К пояснению динамической устойчивости параллельной работы СГ с сетью при отклонении активной мощности (а) и тока возбуждения (б)

Из приведенного примера следует, что работа СГ будет устойчива, если в процессе колебаний угол Q не превысит 90°. В противном случае устойчивость параллельной работы нарушится и генератор выпадет из синхронизма.

Аналогичные процессы происходят и при внезапном изменении тока возбуждения (рисунок 8.11, б). Точка А на этом рисунке соответствует номинальному режиму работы на угловой характеристике I. При уменьшении тока возбуждения генератор сразу переходит на угловую характеристику 2 в точку В и возникает неравенство моментов, $M_{пд} > M_{эм}$, Под действием избыточного момента $M_{изб} = M_{пд} - M_{эм}$ ротор приобретает ускорение, его скорость и угол Θ растут и рабочая точка перемещается по характеристике 2. Под действием сил инерции ротор проходит точку С, соответствующую равенству моментов и достигает некоторой точки Д, в которой избыток кинетической энергии вращающихся масс будет израсходован. Площадки АБС и СДЕ равны между собой. Затем ротор будет замедляться, угол Θ уменьшается до значения, близкого к $Θ_1$ и снова возникает колебательный процесс.

При отсутствии потерь в статоре и в роторе колебание ротора продолжалось бы бесконечно долго. Однако, в процессе колебаний помимо действующих на ротор генератора моментов приводного двигателя, а также электромагнитного и динамического моментов, возникают дополнительные тормозные моменты, под действием которых колебания быстро затухают и генератор переходит на устойчивую работу в точке С при равенстве $M_{пд}$ и $M_{эм}$ или $P_{пд} = P_{эм}$ при угле $Θ_2$.

На рисунке 8.11, б кривая 3 соответствует предельному значению тока возбуждения, при котором ускорение ротора под действием избыточного момента приводного двигателя происходит до критического значения угла Θ (площадь треугольника EKG < площади AFE) и генератор выпадает из синхронизма.

Для повышения динамической устойчивости параллельной работы СГ используют быстродействующие АРН и демпферные (успокоительные) обмотки на роторе. Успокоительные обмотки при изменении положения ротора (при его ускорении или замедлении) создают противодействующий асинхронный момент, который способствует снижению колебаний. В неявнополюсных СГ роль демпферной обмотки выполняют массивные полюса ротора, в которых при колебаниях индуктируются вихревые токи, создающие тормозной электромагнит-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ный момент. Замечательным свойством синхронных машин является также способность автоматически увеличивать свою динамическую устойчивость за счет того, что в переходных процессах в обмотке якоря усиливаются эффекты вытеснения потока на пути рассеяния, синхронное индуктивное сопротивление x_c уменьшается, а это в соответствии с соотношением (8.13) приводит к увеличению максимума электромагнитной мощности.

8.6. Угловая характеристика явнополюсного синхронного генератора

Для явнополюсной синхронной машины формула электромагнитной мощности получается из преобразований путем дополнительных построений на векторной диаграмме (рисунок 8.9,б). Из этой диаграммы видно, что $\varphi = \Psi - \theta$ и соотношение

$$P_{эм} \approx P_1 = mU_r I_a \cos\varphi$$

можно предствить в виде

$$P_{эм} = mU_r I_a \cos(\Psi - \theta) = mU_r I_a \cos\Psi\cos\theta + mU_r I_a \sin\Psi\sin\theta \quad (8.23)$$

Из диаграммы также следует, что

$$U_r cos\theta = aB = E_0 - I_d x_d = E_0 - x_d I_a sin\Psi,$$

откуда

$$I_a sin\Psi = \frac{E_0 - U cos\theta}{x_d}. \quad (8.24)$$

С другой стороны

$$U_r sin\theta = AB = x_q I_a \cos\theta,$$

откуда

$$I_a cos\Psi = \frac{U_r \sin\theta}{x_q}. \quad (8.25)$$

Подставляя (8.24) и (8.25) в (8.23), после преобразований получаем соотношение

$$P_{эм} = \frac{mE_0 U}{x_d}\sin\theta + \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta. \quad (8.26)$$

Первый член выражения (8.26)

$$P_{эм} = \frac{mE_0 U}{x_d}\sin\theta \quad (8.27)$$

определяет основную составляющую мощности генератора, зависящую как от напряжения сети U , так и от тока возбуждения, или от ЭДС E_0

Второй член

$$\frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta \quad (8.28)$$

определяет дополнительную составляющую мощности, не зависящую от тока возбуждения.

В неявнополюсной машине $x_d = x_q$, поэтому $P_{эм2} = 0$.

Электромагнитный момент явнополюсной синхронной машины также имеет две составляющие: основную

$$M_{эм_1} = \frac{mE_0 U}{\Omega_c x_d}\sin\theta \quad (8.29)$$

и дополнительную (реактивную)

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$M_{эм_2} = \frac{mU^2}{2\Omega_c}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta \ . \qquad (8.30)$$

Мощность $P_{эм_2}$ и момент $M_{эм_2}$ имеют место и при отсутствии возбуждения на роторе (при $E_0 = 0$), т.е. явнополюсный ротор, будучи втянутым в синхронизм, способен вращаться синхронно с полем статора при отсутствии возбуждения, при этом генератор развивает мощность $P_{эм2}$ за счет действия реактивного момента.

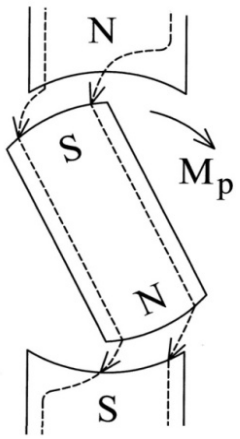


Рисунок 8.12 – К образованию реактивного момента явнополюсного синхронного генератора

Образование реактивного момента поясняет рисунок 8.12. Несимметричный ротор стремится занять положение, при котором энергия магнитного поля будет максимальна; при этом воздушный зазор минимален. Другими словами, магнитный поток реакции якоря стремится пройти через ротор по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, т.е. по продольной оси d.

Угловая характеристика явнополюсного синхронного генератора при r_a=0, E_0=const и U=const показана на рисунке 8.13. При этом принято, что параметры x_d и x_q постоянны.

Из рисунка 8.13 следует, что максимум мощности явнополюсного СГ несколько сдвигается в сторону значений угла $\theta < \frac{\pi}{2}$ и несколько возрастает величина этой мощности. Перегрузочная способность в явнополюсной машине несколько выше, чем в неявнополюсной, а угол, при котором достигается $P_{эммах}$, составляет 70…80°.

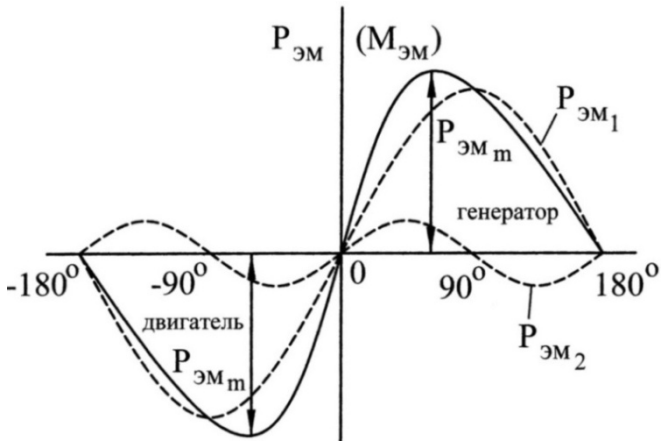


Рисунок 8.13 – Угловая характеристика явнополюсного синхронного генератора

Удельная синхронизирующая мощность явнополюсной синхронной машины равна

$$P_c = \frac{dP_{эм}}{d\theta} = m\frac{UE_0}{x_d}\cos\theta + mU^2\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\cos 2\theta \cdot \qquad (8.31)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Как и величина $P_{эм}$, максимальная синхронизирующая мощность P_c у явнополюсной синхронной машины больше, чем у неявнополюсной.

На рисунке 8.13 угловая характеристика, расположенная симметрично в 3-м квадранте координатной плоскости, соответствуют двигательному режиму работы синхронной машины.

8.7. Регулирование реактивной мощности СГ при параллельной работе с сетью

Важным достоинством синхронных машин перед асинхронными машинами является то, что в зависимости от величины тока возбуждения она отдает в сеть или потребляет из сети реактивную мощность, т.е. наряду е потреблением в режиме двигателя или отдачей в сеть в режиме генератора активной мощности машина ведет себя по отношению к сети как емкость или как индуктивность. Ранее было показано, что изменение тока возбуждения при холостом ходе СГ, включенного на параллельную работу, вызывает лишь появление уравнительного реактивного тока и не приводит к изменению активной мощности. Увеличение нагрузки может быть достигнуто только путем воздействия на регулятор подачи топлива первичного двигателя. При рассмотрении угловых характеристик было отмечено, что у нагруженного генератора изменение тока возбуждения приводит к изменению вида угловой характеристики, при этом при определенной нагрузке изменяется угол Θ.

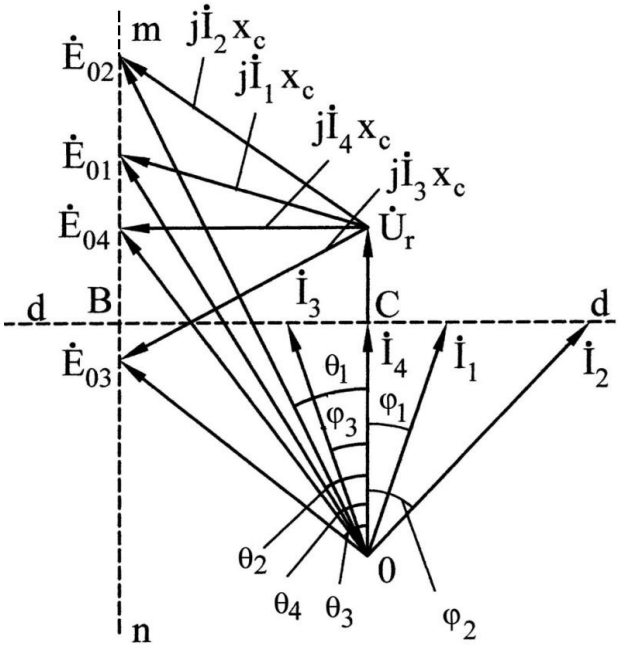


Рисунок 8.14 – Векторная диаграмма СГ при регулировании реактивной мощности и при постоянной активной нагрузке

Рассмотрим векторную диаграмму неявнополюсного СГ при $P_{эм} = const$ и $I_в$ = var, которая является графическим решением уравнения электрического равновесия (рисунок 8.14)

$$\dot{U}_г = \dot{E}_0 - j\dot{I}_a x_c \quad (32)$$

В установившемся режиме работа генератора характеризуется величинами с индексом (I) – $U_г$ и E_{01}, I_1, $Θ_1$ и $φ_1$. На векторной диаграмме ток I_1 отстает от вектора $|\Delta E| - |I_1 x_c|$ на угол $\frac{\pi}{2}$.

При любом изменении тока возбуждения и соответствующем изменении ЭДС E_0 активная мощность $P_{эм} = mUIcos\varphi$, определяемая мощностью приводного двигателя, должна оставаться постоянной. При неизменном напряжении генера-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

тора $U_г = U_c$ это возможно только при условии постоянства произведения $I\cos\varphi$, которое определяет активную составляющую тока нагрузки.

При любом изменении тока возбуждения и соответствующем изменении ЭДС E_0 активная мощность $P_{эм} = mUI\cos\varphi$, определяемая мощностью приводного двигателя, должна оставаться постоянной. При неизменном напряжении генератора $U_г = U_c$ это возможно только при условии постоянства произведения $I\cos\varphi$, которое определяет активную составляющую тока нагрузки. На векторной диаграмме этому произведению соответствует отрезок ОС. Отрезок ВС на векторной диаграмме определяет величину $I_1 x_c \cos\varphi$ и поскольку произведение $I_1\cos\varphi = const$, а синхронное индуктивное сопротивление x_c также постоянно, то величина отрезка ВС в рассматриваемых условиях остается неизменной.

Таким образом, пунктирная линия mn на векторной диаграмме, параллельная вектору напряжения $U_г$, представляет собой геометрическое место концов вектора ЭДС $\dot{E}_0$, а линия d-d, перпендикулярная вектору $\dot{U}_г$, определяет геометрическое место концов вектора $\dot{I}$ при изменении тока возбуждения и неизменной активной электромагнитной мощности.

Так, при увеличении тока возбуждения ЭДС возрастет до величины E_{02}, вектор которой перемещается по линии mn вверх. Отрезок, соединяющий концы векторов $\dot{E}_{02}$ и $\dot{U}_г$ определяет падение напряжения $j\dot{I}_2 x_c$, ток статора увеличивается до значения I_2, при этом угол φ увеличивается до значения φ_2, а конец вектора $\dot{I}_2$ смещается вправо по линии d, располагаясь перпендикулярно к вектору $j\dot{I}_2 x_2$. Если ток возбуждения уменьшается, векторы ЭДС $\dot{E}_3$, падение напряжения $j\dot{I}_3 x_c$ и тока $\dot{I}_3$ располагаются так, как показано на рисунке 8.14.

Из диаграммы рисунка 8.14 следует, что хотя при изменении тока возбуждения активная составляющая тока статора $I\cos\varphi$ не изменяется, изменяется по величине и характеру реактивная составляющая тока статора $I\sin\varphi$; при перевозбуждении (режимы I и 2) синхронный генератор работает с отстающим по отношению к напряжению генератора током ($\varphi > 0$), при недовозбуждении он работает с опережающей фазой тока ($\varphi < 0$). В то же время по отношению к сети в режимах 1 и 2 реактивные токи I_{1p} и I_{2p} являются опережающими, емкостными и генератор отдает в сеть реактивную мощность, а в режиме 3 ток I_{3p} является индуктивным и генератор потребляет из сети реактивную мощность. Можно подобрать такое возбуждение генератора (режим 4), при котором вектор тока I_4 будет совпадать с вектором напряжения $U_г$, т.е. он будет чисто активным и угол $\varphi_4 = 0$.

Из диаграммы следует также, что при изменении тока возбуждения изменяется угол Θ; при увеличении возбуждения угол Θ уменьшается, при уменьшении возбуждения – увеличивается. Физически это объясняется следующим образом. При увеличении возбуждения вели-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

чина ЭДС немедленно возрастает по величине, а угол Θ первоначально не изменяется в силу действия инерционных сил на роторе. Следовательно, возрастает величина ΔE, ток статора и мощность генератора в соответствии с соотношением (8.8). Соответственно возрастает тормозной электромагнитный момент генератора $M_{эм}$, который становится больше вращающего момента приводного двигателя; ротор получает отрицательное ускорение и угол Θ уменьшается. При этом уменьшаются значения ΔE, sinΘ , I и момент $M_{эм}$ до тех пор, пока не восстановится равновесие тормозного и вращающего моментов. Это означает, что и мощность генератора в новом режиме сохраняет исходное значение. Аналогично можно пояснить процессы при уменьшении тока возбуждения.

В соответствии с векторной диаграммой рисунка 8.14 можно построить так называемые V – образные характеристики СГ при $P_{эм}$ = const ≠ 0. Они имеют вид кривых 2,3,4, показанных на рисунке 8.15, причем $P_4 > P_3 > P_2 > P_1$. Кривая I на этом рисунке соответствует изменению тока возбуждения при холостом ходе ($P_1 = 0$).

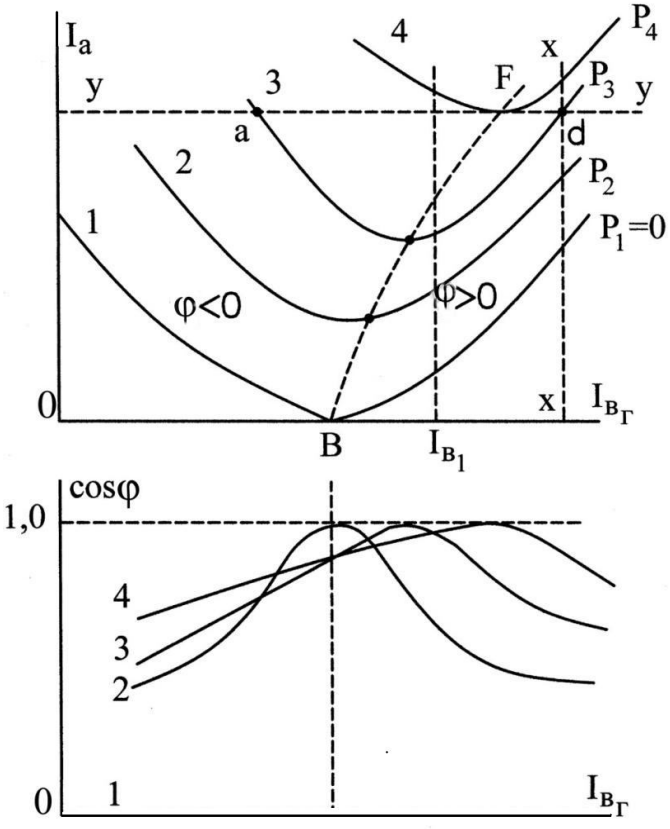


Рисунок 8.15 - V – образные характеристики и зависимости cosφ = f($I_{вг}$) при параллельной работе СГ с сетью

На каждой из этих характеристик наименьший ток якоря соответствует уровню возбуждения, при котором угол φ = 0. Это чисто активный ток, который и определяет мощность генератора в данном режиме. Сдвиг минимумов V – образных характеристик вправо по мере увеличения нагрузки объясняется увеличением падения напряжения в обмотке статора при увеличении тока. Каждой кривой $I_a = f(I_в)$ на рисунке 8.15 соответствует своя зависимость cosφ = $f(I_в)$, максимум которой совпадает с минимумом V – образной характеристики. Естественно, что при холостом ходе ($P_{эм} = 0$) угол $\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$, cos φ = 0 и зависимость cosφ= $f(I_в)$ имеет вид прямой линии, совпадающей с осью абсцисс.

Пунктирная линия BF, проходящая через минимумы V - образных характеристик, представляет собой регулировочную характеристику ге-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

нератора при чисто активной нагрузке. Вправо от нее лежит область перевозбуждения генератора, влево – область недовозбуждения.

Семейство V- образных характеристик позволяет оценить изменение режима параллельной работы СГ с сетью в процессе изменения активной мощности при постоянном токе возбуждения. Для этого при определенном значении тока возбуждения, например при $I_{в1}$, проводят вертикальную линию и в точках ее пересечения с кривыми 2, 3, и т.д. определяют, как изменяется ток якоря I_a и cosφ генератора при увеличении нагрузки.

Для каждого синхронного генератора существуют определенные предельные значения тока возбуждения и тока нагрузки. На рисунке 8.15 они обозначены пунктирными ограничительными линиями, соответственно x – x и y – y. Эти линии означают, что при мощности, например, P_3 можно работать на V -образной характеристике от точки «a» до точки «d» и машина не будет перегружена. Левее точки «a» ток якоря будет больше номинального и будет перегреваться статор, правее точки «d» и ток статора и ток возбуждения больше номинальных и будет перегреваться также обмотка ротора. При нагрузке, равной P_4 (кривая 4), обмотка статора не будет греться только при cosφ=1.

В заключение отметим, что на вид V – образных характеристик оказывает влияние величина синхронного индуктивного сопротивления x_c; чем меньше x_c тем острее получаются эти характеристики. Наоборот, чем больше синхронное индуктивное сопротивление генератора x_c, тем более пологий характер имеют V – образные кривые. Связано это с тем, что в первом случае даже незначительные изменения возбуждения вызывают резкое возрастание тока статора, во втором случае при изменении тока возбуждения изменение тока якоря происходит более плавно, что дает преимущества эксплуатационного характера. В то же время синхронные машины с малым сопротивлением x_c имеют большую перегрузочную способность.

8.8. Переход синхронной машины в двигательный режим работы

Выше мы отмечали, что синхронная машина как и все другие электромеханические преобразователи энергии, обратима, т.е. может работать в режиме генератора или двигателя в зависимости от того, с какой стороны к ней подводится энергия – механическая с вала (это генераторный режим), или электрическая от сети (это двигательный режим).

При параллельной работе синхронной машины с мощной сетью во всех возможных режимах ток обмотки статора определяется только значениями $\Delta\dot{E} = \dot{E}_г + \dot{U}_c$ и сопротивления x_c (или $x_d = x_{ad} + x_s$) и всегда отстает от $\Delta\dot{E}$ по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$. Величина и фаза $\Delta\dot{E}$, в свою очередь, зависят от тока возбуждения генератора и от мощности приводного двигателя в режиме генератора или от момента сопротивления исполнительного механизма в режиме двигателя.

Обратимся снова к рисунку 8.7, б соответствующему генераторному режиму работы СМ на сеть. Электромагнитная мощность генератора $P_{эм}$ определяется мощностью приводного двигателя, а на вектор-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ной диаграмме и угловой характеристике – углом Θ, причем вектор ЭДС $\dot{E}_0$ опережает вектор напряжения $\dot{U}$ на угол Θ. В системе электромагнитной связи между ротором и статором, ведущим звеном является ротор, а его ось сдвинута на угол Θ по отношению к оси магнитного потока $\dot{\Phi}_c$.

Если вращающий момент приводного двигателя постепенно уменьшать, мощность генератора $P_{эм}$ также будет уменьшаться, что на векторной диаграмме отразится уменьшением угла Θ; при холостом ходе СГ угол θ равен нулю, $P_{эм} = 0$, векторная диаграмма приобретает вид, показанный на рисунке 8.7, а.

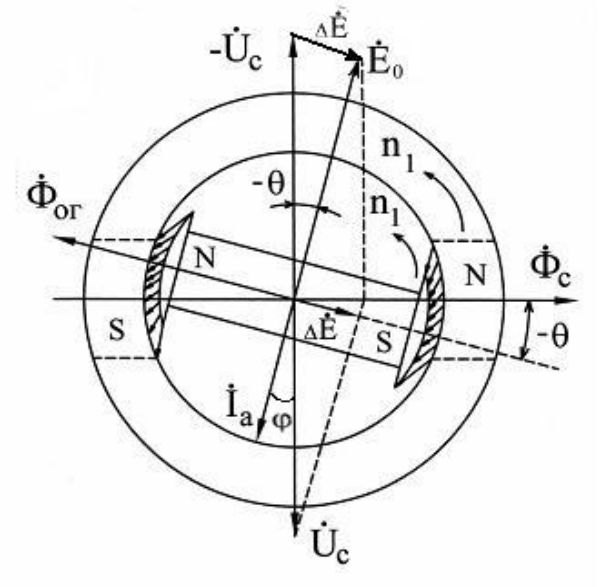


Рисунок 8.16 – К переходу синхронной машины из генераторного в двигательный режим при параллельной работе с сетью

Если теперь к валу ротора приложить тормозной момент, то угол Θ изменит знак и синхронная машина автоматически перейдет в двигательный режим – она будет потреблять из сети активную мощность, создавая вращающий электромагнитный момент.

Физическая сущность явлений при переходе СМ в двигательный режим понятна из векторной диаграммы рисунка 8.16. На этой диаграмме вместо вектора $\dot{U}_г$ изображен вектор $-\dot{U}_C$. Это формальная замена, т.к. не принято говорить "напряжение двигателя", мы всегда говорим "напряжение, подводимое к двигателю", имея в виду, что это напряжение сети.

Под действием тормозного момента исполнительного механизма ротор занимает положение, показанное на рисунке 8.16; его ось сдвинута на угол Θ по отношению к вектору $\dot{\Phi}_c$ в сторону отставания. Поле статора обгоняет ротор и как бы тянет его за собой посредством натяжения линий магнитной индукции. Соответственно поворачивается на угол Θ в сторону отставания по отношению к вектору $\dot{U}_c$ вектор ЭДС $\dot{E}_0$. При этом возникает ЭДС $\Delta\dot{E}$ и отстающий от нее на угол $\frac{\pi}{2}$ ток $\dot{I}_a$, который в данном случае почти совпадает по фазе с вектором напряжения сети $\dot{U}_c$. Это значит, что синхронная машина потребляет из сети активную электрическую мощность, преобразует ее в механическую, создает вращающий момент, равный моменту сопротивления исполнительного механизма, $M_{эм} = M_c$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

При дальнейшем увеличении момента сопротивления угол Θ растет, увеличиваются $\Delta\dot{E}$ и I_a, возрастают $P_{эм}$ и $M_{эм}$ до тех пор, пока снова не установится равенство $M_{эм} = M_c$.

Значения электромагнитной мощности $P_{эм}$ и электромагнитного момента $M_{эм}$ синхронного двигателя определяются по соотношениям 8.12 и 8.13 при неявнополюсном роторе и 8.23, 8.26 и. 8.27 - при явнополюсном роторе. Угловые характеристики СД имеют такой же вид как и у синхронного генератора, однако в соответствии с изменением угла Θ они располагаются в 3-ем квадранте. На практике угловые характеристики синхронных двигателей часто изображают так же, как и для синхронных генераторов, что конечно не меняет сущности происходящих в них физических процессов.

Рассмотрим явления в СД при изменении момента нагрузки на валу и при $I_в, E_0$ и $U_c = const$, для чего воспользуемся векторной диаграммой неявнополюсного двигателя (рисунок.8.17, а).

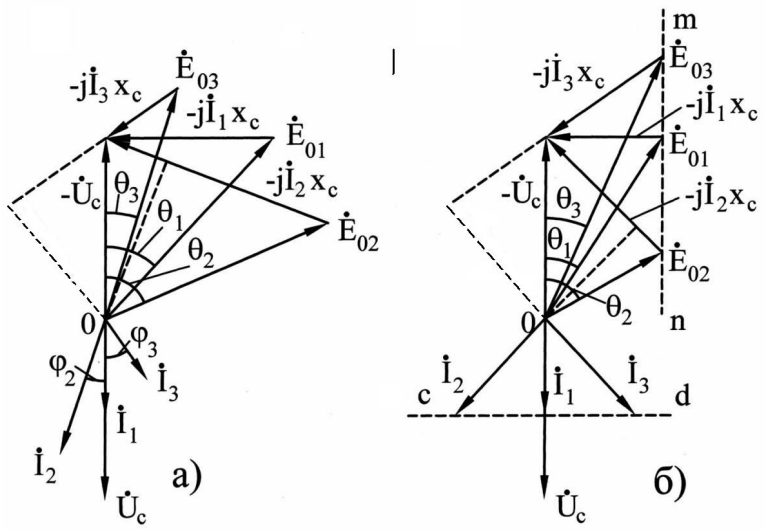


Рисунок 8.17 – Векторные диаграммы синхронного двигателя при изменении момента сопротивления на валу (а) и тока возбуждения (б)

Примем, что в исходном режиме ток возбуждения $I_в$ и момент сопротивления M_{c1} имеют такие значения, что двигатель работает при cosφ=1, чему на векторной диаграмме соответствуют угол $Θ_1$ и ток нагрузки I_1. При увеличении момента нагрузки до значения M_{c2} конец вектора $\dot{E}_{01}$ перемещается по окружности радиуса E_0, угол Θ увеличивается до значения $Θ_2$, а ток нагрузки возрастает до величины I_2 и, располагаясь перпендикулярно вектору $-j\dot{I}_{a2}x_c$, перемещается вокруг точки 0 по часовой стрелке.

Как видно в рассматриваемом случае ток двигателя имеет отстающую реактивную составляющую – двигатель потребляет из сети реактивный ток.

Если нагрузку двигателя уменьшить до величины M_{c3}, то в соответствии с новым значением угла $Θ_3$ изменится положение вектора $\dot{E}_{03}$, а вектор тока $\dot{I}_3$ уменьшится по величине, и будет опережать вектор напряжения $\dot{U}_c$.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Таким образом, изменение активной мощности синхронного двигателя приводит к изменению его коэффициента мощности cosφ; при увеличении нагрузки и при постоянном возбуждении cosφ уменьшается, двигатель потребляет из сети реактивный ток, при уменьшении нагрузки cosφ возрастает и двигатель отдает в сеть реактивный ток.

Процессы, происходящие в двигателе при изменении тока возбуждения при $M_c = const$, иллюстрируются векторной диаграммой на рисунке 8.17, б. Пусть в исходном режиме (режим I) двигатель имеет угол Θ_1, ЭДС E_{01}, и $\varphi_1 = 0$ ($\cos\varphi_1 = 1$). Ток нагрузки в этом режиме чисто активный и вектор $\dot{I}_1$ совпадает по направлению с вектором напряжения $\dot{U}_c$. Поскольку момент нагрузки не изменяется, то электромагнитная мощность $P_{эм} = mUI\cos\varphi$ остается неизменной, а это возможно только при условии $I\cos\varphi = const$.

Из соотношения

$$P_{эм} = \frac{mU_c E_0}{x_c}\sin\theta$$

следует также, что должно выполняться условие $E_0\sin\theta = const$. Это значит, что при любых изменениях тока возбуждения конец вектора ЭДС $\dot{E}_0$ будет перемещаться по линии mn, параллельной вектору $\dot{U}_c$, а конец вектора тока – по линии cd , перпендикулярной вектору $\dot{U}_c$. Все происходит подобно генераторному режиму (см. рисунок 8.14) при подобных начальных условиях с соответствующим изменением положения векторов $\dot{E}_0$ и $\dot{I}$.

Так, при уменьшении тока возбуждения ЭДС снижается до значения E_{02}, угол Θ увеличивается, а вектор тока занимает положение $\dot{I}_2$ и приобретает реактивную составляющую, которая отстает от вектора $\dot{U}_c$ на угол $\frac{\pi}{2}$. Двигатель потребляет из сети реактивный ток. При увеличении тока возбуждения ЭДС увеличивается, угол Θ уменьшается до значения Θ_3, вектор тока $\dot{I}_3$ приобретает опережающую реактивную составляющую, т.е. двигатель отдает в сеть реактивный ток или реактивную мощность.

Из рассмотрения диаграммы (рисунок 8.17, б) следует, что V - образные характеристики синхронного двигателя полностью подобны характеристикам для генератора (рисунок 8.15). Следует только учитывать, что угол φ в данном случае характеризует сдвиг фаз тока и напряжения сети.

Обычно синхронные двигатели рассчитывают на работу при номинальной нагрузке с опережающим током (с перевозбуждением) при cosφ=0.8…0.9. В этом случае улучшается суммарный коэффициент мощности сети, т.к. вырабатываемая ими реактивная мощность компенсирует потребление этой мощности другими потребителями, подключенными к этой сети – асинхронными двигателями, трансформаторами и др.

Способность синхронного двигателя (как и синхронного генератора) вырабатывать при перевозбуждении реактивную мощность нахо-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

дит реализацию в широком применении в электроэнергетических системах синхронных компенсаторов.

Синхронные компенсаторы представляют собой синхронные двигатели облегченной конструкции, работающие в режиме синхронного двигателя при холостом ходе, но с большим перевозбуждением. Действие синхронного компенсатора аналогично действию присоединенной к сети батареи конденсаторов и способствует улучшению коэффициента мощности сети.

8.9. Особенности параллельной работы генераторов соизмеримой мощности

В судовых электроэнергетических системах, на береговых электростанциях реализуется, как правило, параллельная работа СГ соизмеримой или одинаковой мощности. Основным условием такой работы является необходимость распределения активной и реактивной нагрузок пропорционально мощности параллельно включенных генераторов. Наиболее экономичным будет такой режим, при котором коэффициенты мощности генераторов одинаковы, при этом между генераторами отсутствуют уравнительные реактивные токи, вызывающие дополнительные потери и нагрев статорных обмоток.

Для параллельно работающих генераторов 1 и 2 соизмеримой мощности (рисунок 8.18) справедливы соотношения

$$P = P_1 + P_2 ; Q = Q_1 + Q_2 \qquad (8.33)$$

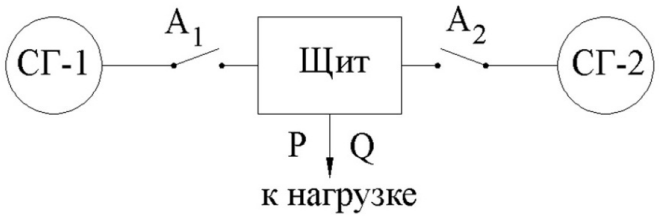


Рисунок 8.18 – К параллельной работе СГ соизмеримой мощности

При одинаковых нагрузках генераторов ($P_1 = P_2, Q_1 = Q_2$) их векторная диаграмма имеет вид, показанный на рисунке 8.19, а. Рассмотрим порядок перевода нагрузки с одного генератора на другой (например, со второго на первый) при условии P = const, U = const и *f* = const.

Для перевода нагрузки необходимо увеличить мощность приводного двигателя первого генератора и уменьшить в таком же отношении мощность, подводимую к валу второго генератора. При этом частоты вращения обоих генераторов должны быть равны синхронным, тогда частота сети остается неизменной.

На векторной диаграмме (рисунок 8.19, б) процесс изменения мощностей приводных двигателей изображается изменением положения векторов ЭДС E_{01} и E_{02}, причем у нагружаемого генератора угол Θ_1 и вектор $j\dot{I}_1 x_c$ возрастают, а у разгружаемого угол Θ_2 и вектор $j\dot{I}_2 x_c$ уменьшаются.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

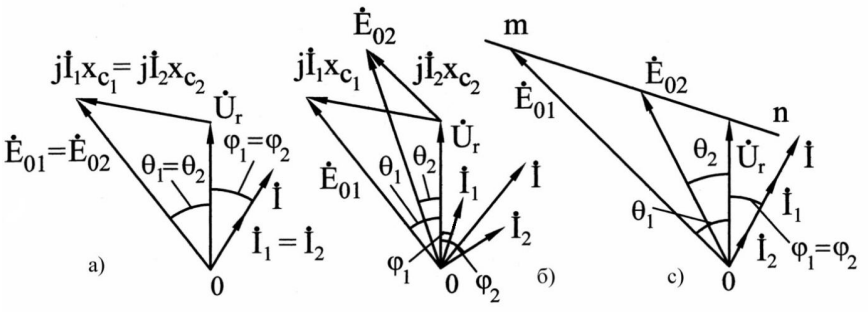


Рисунок 8.19 – Распределение нагрузки при параллельной работе СГ соизмеримой мощности

Как следует из угловой характеристики (рисунок 8.10) изменение угла Θ сопровождается изменением электромагнитной мощности генераторов; у первого генератора она увеличивается, у второго – уменьшается.

Это происходит за счет соответствующего изменения активной составляющей тока статора, что хорошо видно на векторной диаграмме. Следует обратить внимание на то, что векторы токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ на рисунке 8.19, б сдвинуты на угол $\frac{\pi}{2}$ относительно соответствующих векторов $jI\dot{x}_c$, а угол φ_1 меньше угла φ_2. Это означает, что при рассмотренном режиме перевода активной нагрузки нарушается соотношение между реактивными мощностями генераторов. В частности, поскольку $\sin\varphi_2 > \sin\varphi_1$, то реактивная мощность второго генератора оказывается больше, чем у первого.

Для установления одинаковых углов φ в процессе перевода нагрузки необходимо ЭДС нагружаемого генератора увеличивать, а ЭДС разгружаемого генератора уменьшать в таких соотношениях, чтобы напряжение на общих шинах было неизменным. Это достигается изменением тока возбуждения. Идеальным является такой режим, когда в процессе перевода нагрузки концы векторов ЭДС E_{01} и E_{02} скользят по линии mn, один вверх, другой вниз (рисунок 7.19, в), при этом сохраняется условие $\varphi_2 = \varphi_1$.

Итак, для правильного перевода нагрузки с одного генератора на другой необходимо одновременно воздействовать на регуляторы мощности приводных двигателей и на регуляторы возбуждения генераторов, поддерживая неизменными показания вольтметра, частотомера и фазометра сети.

При длительной параллельной работе судовых генераторов одинаковой или соизмеримой мощности пропорциональное распределение нагрузок между ними осуществляется системами автоматического управления.

8.10. Вопросы для самопрверки и контроля знаний

1. Назовите основные условия включения СГ на параллельную работу с сетью.
2. Поясните последствия нарушения условий синхронизации СГ:

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- при неравенстве действующих значений ЭДС и напряжения;
- при отклонениях в фазовом сдвиге ЭДС и напряжения;
- при неравенстве частот СГ и сети.
- при нарушении порядка чередования фаз.

3. Поясните основные способы синхронизации.

4. Поясните физические процессы в СГ, работающего на сеть, при регулировании активной мощности.

5. Изобразите угловую характеристику неявнополюсного СГ.

6. Назовите условие статической устойчивости СГ.

7. Поясните процессы динамической устойчивости СГ, при отклонениях активной мощности или тока возбуждения.

8. Изобразите угловую характеристику явнополюсного СГ.

9. Поясните физические процессы в СГ, работающего на сеть, при регулировании реактивной мощности.

10. Опишите физические процессы при переходе синхронной машины из генераторного в двигательный режим.

11. Изобразите на векторной диаграмме и поясните порядок распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами соизмеримой мощности.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 9. ТИПОВЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

9.1. Общее описание переходных процессов

9.1.1. Сущность переходных процессов

Под переходными процессами в электрических машинах понимают внезапный переход от одного установившегося режима к другому (включение в сеть, отключение, короткое замыкание, резкое изменение нагрузки, обрыв фазы и т.п.), сопровождающийся изменением энергии электромагнитных полей. При этом в машинах возникает апериодическая составляющая магнитного потока, которая вызывает броски тока, во много раз превышающие установившееся значение. Температура обмоток и электромагнитные силы, зависящие от квадрата тока, значительно возрастают, могут превосходить допустимые значения и служить причиной аварии. Поэтому без учета переходных процессов при проектировании трансформаторов, синхронных и асинхронных машин не могут быть правильно определены их размеры, элементы конструкции, условия, в которых они должны эксплуатироваться. Исходя из расчета переходных процессов машин переменного тока, формулируются требования по их защите.

Из множества режимов работы электрических машин, сопровождающихся переходными процессами, наибольший интерес представляют их подключения к сети без нагрузки или с нагрузкой и внезапное короткое замыкание вторичной обмотки при работе под нагрузкой.

9.1.2. Общее описание переходных процессов при коротком замыкании

Анализ переходного процесса при коротком замыкании в электрической цепи заключается в определении величины и характера тока i (t), для чего необходимо найти полные решения дифференциальных уравнений цепи.

Как известно, в случае линейного уравнения полное решение i (t) образуется как сумма частного решения $i'(t)$ неоднородного уравнения, т.е. уравнения, содержащего заданные ЭДС или напряжения, и решения $i''(t)$ однородного уравнения, которое получается из того же уравнения цепи, если положить в нем заданные ЭДС или напряжения равными нулю, т.е.

$$i\,(\mathrm{t}) = i'(t) + i''(t) \qquad (9.1)$$

По мере увеличения t ток $i''(t)$ стремится к нулю, т.к. процесс в цепи, обладающей конечным сопротивлением, должен затухать при отсутствии в цепи источников ЭДС. Поэтому ток $i''(t)$ называют переходным или свободным, т.к. он определяется из уравнений при отсутствии источников ЭДС.

Свободный ток возникает вследствие того, что при включении или выключении цепи, или при любом другом внезапном изменении в ней, имеющие запасы цепи не соответствуютзапасам энергии в полях, которые должны были бы быть в новом установившемся режиме после происходящих изменений в цепи.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Т.к. свободный ток $i''(t)$ стремится к нулю, то ток i (t) стремится к $i'(t)$. Следовательно, частное решение $i'(t)$ является током установившегося режима, который устанавливается после произошедших изменений в цепи.

9.1.3. Короткое замыкание в цепи r – L

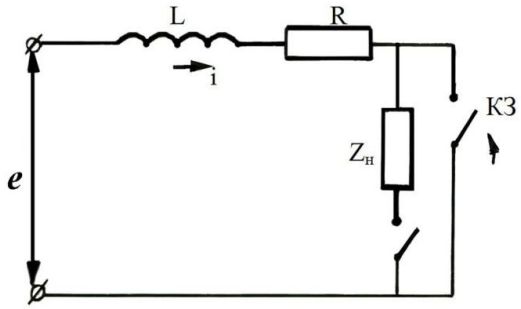


Рисунок 9.1 – Схема для расчета соотношений при коротком замыкании в цепи r -L

Эта цепь может в первом приближении рассматриваться как фаза синхронного генератора (рисунок 9.1).

На входе величина ЭДС равна e = $E_m$sin (ωt).

Дифференциальное линейное уравнение для этой цепи имеет вид

$$L\frac{di}{dt} + iR = E_m \sin \omega t. \quad (9.2)$$

Установившийся ток записывается сразу

$$i_{уст} = \frac{E_m}{z}\sin(\omega t - \varphi) = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (9.3)$$

где $z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$; φ = arctg$\frac{X_L}{R}$.

Соответствующее однородное уравнение, определяющее свободный ток $i_{св}$ имеет вид

$$L\frac{di_{св}}{dt} + Ri_{св} = 0, \quad (9.4)$$

а его характеристическое уравнение

$$L\alpha + R = 0 \quad (9.5)$$

имеет единственный корень

$$\alpha = -\frac{R}{L}. \quad (9.6)$$

Поэтому можно записать

$$i_{св} = Ce^{-at} = C^{-\frac{R}{L}t} = Ce^{-\frac{t}{T}} \quad (9.7)$$

где T = $\frac{L}{R}$ - постоянная времени.

Постоянная интегрирования C определяется по начальному значению тока i. Если до включения цепи ток был равен нулю (как на схеме), то справедливы соотношения

$$i_{(t=0)} = \left(i_{св} + i_{уст}\right)_{t=0} = 0$$

$$\left[Ce^{-\frac{t}{T}} + I_m \sin(\omega t - \varphi)\right]_{t=0} = 0, \quad (9.8)$$

$$C + I_m \sin(-\varphi) = 0; C = I_m \sin\varphi.$$

Таким образом, свободный ток в этом случае равен

$$i_{св} = I_m e^{-\frac{t}{T}} \sin\varphi. \quad (9.9)$$

Общий ток в цепи определяется соотношением

$$i = I_m e^{-\frac{t}{T}} \sin\varphi + I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (9.10)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Как видно, наибольшее значение результирующего тока не превышает двойной амплитуды тока установившегося.

Покажем переходный процесс графически (рисунок 9.2).

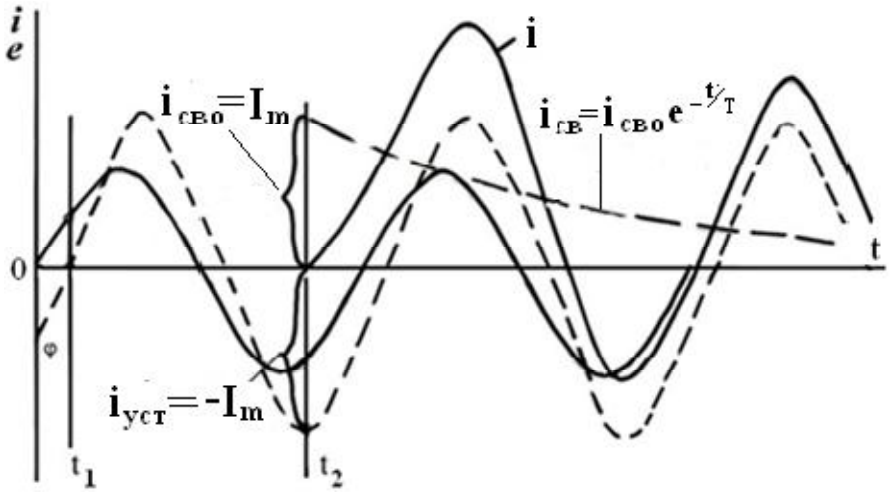


Рисунок 9.2 – Составляющие токов при коротком замыкании в цепи r-L

Если к.з. происходит в момент времени t_1, то $i_{уст} = 0$, а значит и $i_{св} = 0$, переходного процесса не будет и после включения пойдет процесс установившийся.

Это будет при определенном значении ЭДС.

В момент времени t_2 $i_{уст} = i_{уст_{max}} = i_m$, а $i_{св} = i_{св_0} = i_{уст_{max}} + I_m$. По мере увеличения времени ток в цепи будет равен сумме $i_{св} + i_{уст}$.

Если к.з. происходит в цепи с чистой индуктивностью, то $\varphi = \frac{\pi}{2}$: тогда $i_{св} = 0$, когда $i_{уст} = 0$, $e = E_{max}$, $\Phi = 0$ (в СМ); $i_{св} \rightarrow$ max когда $i_{уст} = max$, e= 0; Ф= Φ_{max}.

Суммируя $i_{св}$ и $i_{уст}$, мы можем получить через время $\frac{T}{2}$ результирующий ток i в 2 раза больше, чем $i_{уст}$. Это ударный ток короткого замыкания.

В электрических машинах процессы, конечно, сложнее. Их основное отличие в том, что $e \neq Const$, а в момент к.з. изменяется скачком (увеличивается).

Почему это происходит, мы рассмотрим в разделе 9.4 на примере синхронного генератора.

9.2. Переходные процессы в судовых трансформаторах

9.2.1. Переходные процессы при включении трансформатора в сеть

Будем считать, что магнитная цепь трансформатора ненасыщенна, вторичная обмотка разомкнута, а первичная обмотка подклю-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

чается к сети с напряжением $U_1 = U_{1m}\sin(\omega t + \psi)$, где ψ – угол, определяющий мгновенное значение напряжения в момент включения.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа явления в цепи первичной обмотки описываются нелинейным дифференциальным уравнением

$$U_1 = i_0 r_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \tag{9.11}$$

где i_0 - переходный ток; Ф - магнитный поток взаимной индукции.

Магнитный поток Ф и ток i_0 связаны между собой нелинейной зависимостью (кривой намагничивания), однако для ненасыщенного трансформатора, без большой погрешности можно принять эту зависимость линейной и записать

$$i_0 = w_1 \frac{\Phi}{L_1}, \tag{9.12}$$

где $L_1 = const$ – среднее значение индуктивности первичной обмотки.

В этом случае (9.11) преобразуется в линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами

$$\frac{d\phi}{dt} + \frac{r_1}{L_1}\phi = \frac{U_1}{w_1}, \tag{9.13}$$

решение которого записывается в виде двух составляющих

$$\phi = \phi_y + \phi_{св} \tag{9.14}$$

где $$\Phi_y = \Phi_m \cos(\omega t + \Psi) \tag{9.15}$$

установившаяся составляющая потока, т.е. поток взаимной индукции, который устанавливается в магнитопроводе трансформатора при холостом ходе; $\Phi_{св}$ – свободная переходная составляющая потока, которая определяется из решения однородного уравнения

$$\frac{d\phi}{dt} + \frac{r_1}{L_1}\phi = 0 \tag{9.16}$$

и записывается в виде

$$\Phi_{св} = Ce^{-\frac{r_1}{L_1}t} = Ce^{-\frac{t}{T_1}}. \tag{9.17}$$

Как видно составляющая потока $\phi_{св}$ является апериодической и затухает с постоянной времени $T_1 = \frac{L_1}{r_1}$.

Постоянная С в уравнении (9.17) определяется из следующих начальных условий. Если считать, что магнитный поток остаточного намагничивания в магнитопроводе отсутствует ($\phi_{ост} = 0$), то в момент включения общий магнитный поток ϕ в трансформаторе тоже равен нулю, т.е. при $t = 0$

$$\phi = \phi_y + \phi_{св} = C + \phi_m \cos\psi = 0 \tag{9.18}$$

откуда $$C = -\phi_m \cos\psi. \tag{9.19}$$

Если остаточный поток $\Phi_{ост}$ не равен нулю, то

$$C = -\phi_m \cos\psi \pm \phi_{ост} \tag{9.20}$$

Таким образом, мгновенное значение переходного свободного магнитного потока записывается в виде

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\Phi_{св} = (\Phi_m \cos\Psi + \Phi_{ост})e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (9.21)$$

Характер изменения результирующего магнитного потока трансформатора при переходном процессе зависит от начальной фазы напряжения ψ. Так, если $\psi = \frac{\pi}{2}$ и $\Phi_{ост} = 0$, то $\Phi_{св} = 0$ и в магнитопроводе сразу устанавливается магнитный поток $\Phi_y = \Phi_m \cos(\omega t)$. Включение трансформатора происходит без бросков тока.

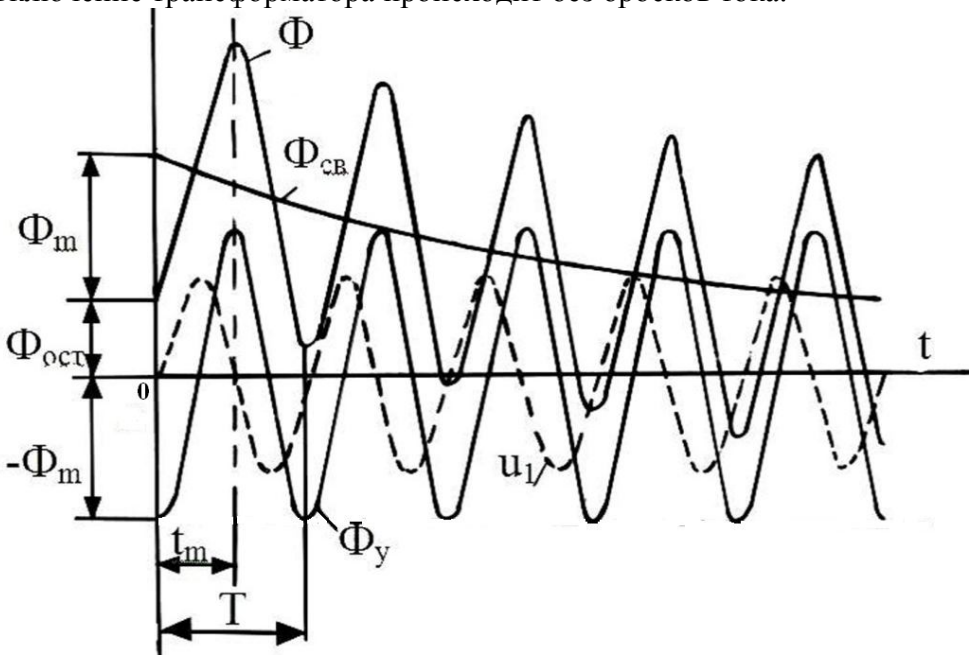


Рисунок 9.3 – Изменение магнитного потока в трансформаторе при включении в режиме холостого хода

На рисунке 9.3 показаны составляющие магнитного потока для наиболее неблагоприятного условия включения при $\psi = 0$. При этом принято, что $\Phi_{ост} \approx 0{,}5\Phi_m$ и этот поток совпадает по знаку с со свободной составляющей потока.

Из рисунка 9.3 следует, что результирующий магнитный поток

$$\Phi = \Phi_m \cos\omega t + (\Phi_m + \Phi_{ост})e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (9.22)$$

достигает максимального значения $\Phi \approx 2{,}5\Phi_m$ примерно через пол – периода после включения, т.е. через время $t \approx 0.01c$. При отсутствии остаточного потока $\Phi_{ост}$ всплеск результирующего потока достигает двойного значения максимального установившегося потока Φ_m

Характер изменения тока в первичной обмотке полностью подобен характеру изменения магнитного потока. В частности, ток имеет также две составляющие – установившуюся i_y и свободную (апериодическую) $i_{св}$, затухающую с той же постоянной времени, что и поток $\Phi_{св}$. Свободный ток отражает реакцию цепи на любой импульс, стремящийся изменить ее режим.

Этот ток как бы «сглаживает» переход к новому состоянию цепи, не допуская мгновенных изменений потока или тока, которые в инерционной системе невозможны.

Для ненасыщенной магнитной цепи величина результирующего переходного тока пропорциональна магнитному потоку, т.е. при ψ=0

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

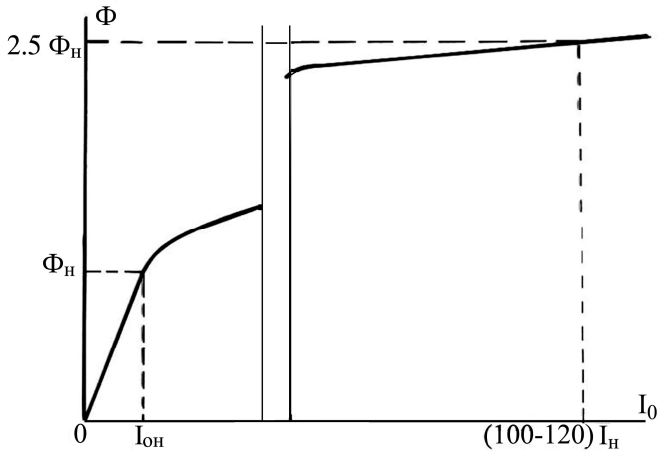


Рисунок 9.4 – Изменение тока намагничивания трансформатора при резком возрастании магнитного потока

бросок тока через полпериода после включения достигает кратности 2,0…2,5 от величины установившегося тока холостого хода i_0. Однако процесс насыщения магнитопровода, связанный с увеличением результирующего магнитного потока, приводит к значительному возрастанию переходного тока.

Обратимся к рисунку 9.4. Обычно рабочая точка, соответствующая номинальному значению магнитного потока взаимной индукции, выбирается на колене кривой намагничивания. При увеличении в переходном процессе магнитного потока, больше, чем в два раза, сердечник чрезвычайно сильно насыщается, что приводит к возникновению больших токов, которые могут в 100 и более раз превышать ток холостого хода трансформатора. Качественно это показано на рисунке 9.4.

Длительность затухания свободных составляющих потока и тока определяется соотношением L_1/r_1. У мощных трансформаторов $r_1 \ll \omega L$ и переходный процесс затухает очень медленно. В трансформаторах малой мощности переходный процесс при включении протекает быстрее и сопровождается меньшими бросками тока. Типичная осциллограмма при включении трансформатора малой мощности в сеть показана на рисунке 9.5.

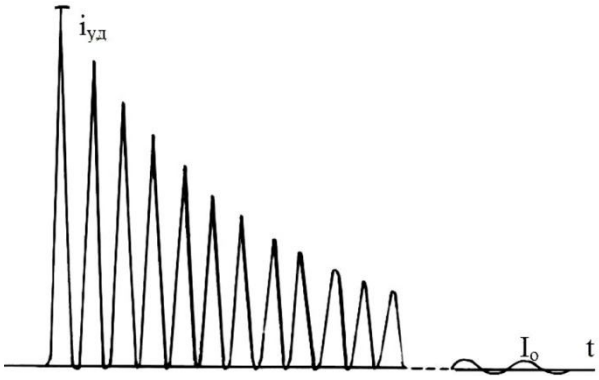


Рисунок 9.5 – Осциллограмма тока при включении трансформатора

В силовых трансформаторах намагничивающий ток составляет (0.4…8.0) % от номинального тока, поэтому кратковременные броски тока при включении у них могут достигать (10…15) $I_н$. Ввиду малой длительности переходного процесса эти токи не опасны для обмоток, а защитуз настраивают таким образом, чтобы не было ложных отключений трансформатора.

9.2.2. Изменение тока включения трансформатора с учетом насыщения

Ток в первичной обмотке трансформатора может быть рассчитан путем решения уравнений трансформатора или определен графи-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

чески с помощью кривой намагничивания $\phi = f(i_0)$ и зависимости $\phi = f(t)$, которая предполагается известной. Эти характеристики показаны на рисунке 9.6.

Порядок построения зависимости $i = f(t)$ заключается в определении для данного момента времени (t_1, t_2, t_3 и т. д.) величины ϕ на кривой $\phi = f(t)$ и нахождении по кривой $\phi = f(i_0)$ соответствующего тока.

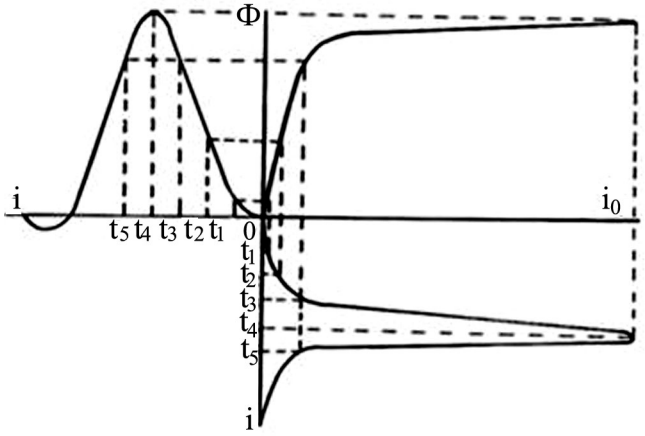


Рисунок 9.6 – Построение кривой тока намагничивания трансформатора с учетом насыщения магнитной цепи

Как следует из рисунка 9.6 кривая тока не синусоидальна и имеет значительную по величине активную составляющую. Это отражает тот факт, что потери энергии возрастают не только в активном сопротивлении обмотки, но и в стали сердечника на вихревые токи, что вызывает закономерное затухание свободной составляющей тока, снижение времени переходного процесса.

9.2.3. Внезапное короткое замыкание трансформатора

В судовых условиях короткое замыкание возникает при различных неисправностях в сетях или в результате ошибочных действий персонала и сопровождается большими токами, способными привести к повреждению трансформатора.

Рассмотрим переходные процессы при внезапном коротком замыкании (ВКЗ) на зажимах вторичной обмотки однофазного трансформатора (рисунок 9.7,а), имея в виду, что они справедливы и для симметричного короткого замыкания трехфазного трансформатора.

Для реального короткого замыкания, также как и для опыта короткого замыкания справедлива упрощенная схема замещения трансформатора (рисунок 9.7,б) в которой параметры

$$\begin{cases} r_k = r_1 + r_2' \ , x_k = \omega L_k = x_1 + x_2' \\ L_k = L_1 + L_2' \end{cases} \qquad (9.23)$$

можно считать постоянными. Кроме того, обычно $z_1 \approx z_2'$, а поскольку ток короткого замыкания достигает очень большой величины, принимают $I_1 z_1 \approx 0.5 U_1$, поэтому ЭДС $\dot{E}_1$ и поток сердечника ϕ почти в два раза меньше, чем в нормальном режиме и сердечник трансформатора не насыщен. Будем считать, что до момента ВКЗ трансформатор был включен в сеть на напряжение $u_1 = U_m \sin(\omega t + \Psi)$ при разомкнутой вторичной обмотке.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

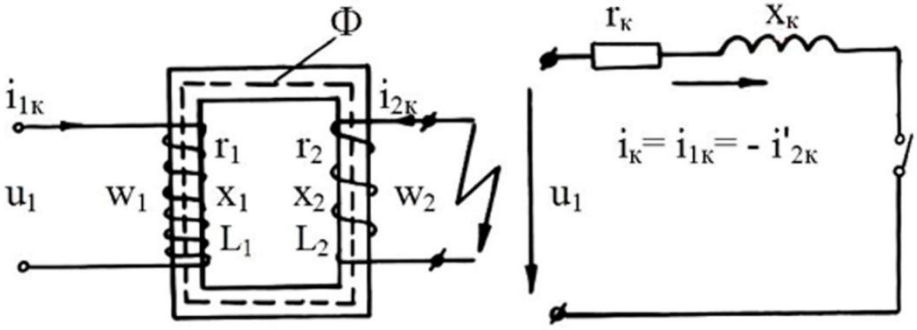


Рисунок 9.7 – Общая схема и схема замещения трансформатора при коротком замыкании

Согласно схеме замещения рисунка 9.7 переходный процесс описывается линейным дифференциальным уравнением

$$u_1 = U_{1m}\sin(\omega t + \Psi) = i_н r_к + L_н \frac{di_н}{dt}, \qquad (9.24)$$

решение которого имеет вид

$$i_н = i_{св} + i_{уст} \qquad (9.25)$$

Это решение совершенно аналогично уравнению (9.14), так как соотношения (9.14) и (9.24) соответствует по существу одному случаю – включению на синусоидальное напряжение реактивной катушки с постоянными параметрами.

Установившаяся составляющая тока $I_н$ представляет собой установившийся ток короткого замыкания

$$i_y = I_{ym}\sin(\omega t + \psi - \varphi_k), \qquad (9.26)$$

где $$I_{ym} = \frac{U_{1m}}{Z_k} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_н^2 + X_н^2}}, \quad \varphi_k = arctg\frac{x_k}{r_k}.$$

Свободная (апериодическая) составляющая тока записывается в виде уравнения

$$i_{св} = Ce^{\frac{t}{T_k}}. \qquad (9.27)$$

$$i_k = 0 = C + I_{ym}\sin(\psi - \varphi_k), \qquad (9.28)$$

откуда

$$C = -I_{ym}\sin(\psi - \varphi_k) \qquad (9.29)$$

Таким образом, на основании выражений (9.25), (9.26), (9.27) и (9.29) полный ток короткого замыкания записывается в виде

$$i_k = i_{1k} = -i'_{2k} = I_{ym}\sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - I_{ym}\sin(\psi - \varphi_k)e^{-\frac{t}{T_k}} \qquad (9.30)$$

Из (9.30) следует, что вид кривой $i_k = f(t)$ зависит от соотношения фаз ψ и φ_k. При значении $\psi - \varphi_k = \pm\frac{\pi}{2}$ свободный апериодический ток и пики общего тока имеют наибольшие значения. В частности, для ψ = 0 и $\varphi_k = \pm\frac{\pi}{2}$ можно записать

$$i_k = -I_{ym}\cos\omega t + I_{ym}e^{-\frac{t}{T_k}} \qquad (9.31)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

График тока $i_k = f(t)$ и его составляющих для этого самого неблагоприятного условия ВКЗ показан на рисунке 9.8, а ударный ток короткого замыкания определяется соотношением

$$i_{kуд} = I_{km}\left(1 + e^{-\frac{r_k}{x_k}\pi}\right) = I_{km}K_{уд}, \qquad (9.32)$$

где множитель

$$K_{уд} = (1 + e^{-\frac{r_k}{x_k}\pi}) \qquad (9.33)$$

называется ударным коэффициентом $K_{уд}$ и показывает во сколько раз ударный ток короткого замыкания больше амплитуды установившегося тока короткого замыкания.

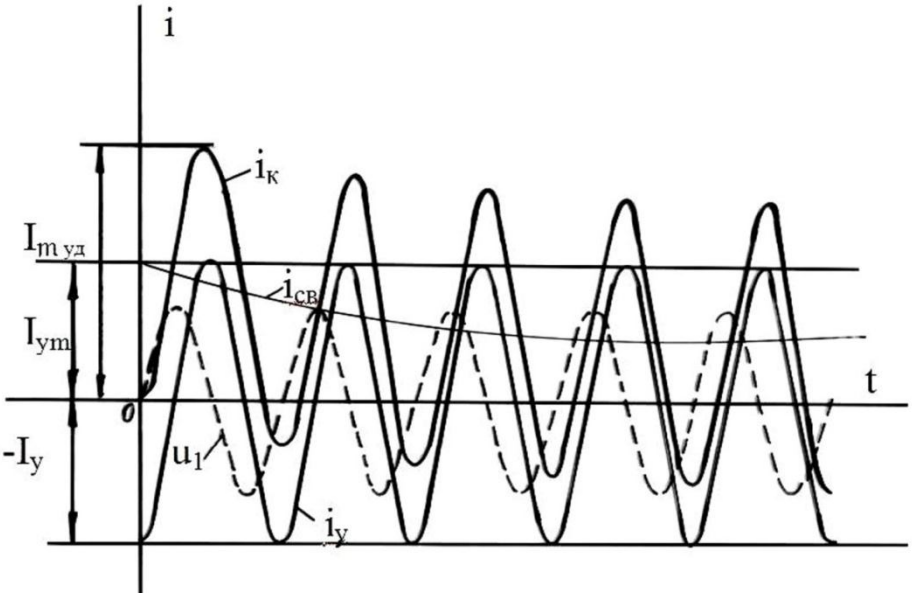


Рисунок 9.8 – Составляющие токов при коротком замыкании трансформатора

В зависимости от величины $\frac{r_k}{x_k}$ этот коэффициент может изменяться в пределах 1…2; для мощных трансформаторов $К_{уд}$ = 1.2…1.8, для трансформаторов малой мощности $К_{уд}$ = 1.2…1.3 .

Коэффициент $К_{уд}$ можно рассчитать через составляющие напряжения короткого замыкания, которые обычно приводятся на табличке трансформатора. Например, для трансформатора мощностью 100 кВА имеем

$$U_k = 6{,}5\%;\ U_{ka} = 1{,}5\%;\ U_{kp} = 6{,}32\% \qquad (9.34)$$

при этом

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{r_k}{x_k}\pi} = 1 + e^{-\frac{U_{ka}}{U_{kp}}\pi} = 1 + e^{-\frac{1.5}{6.32}\pi} = 1 + e^{-0.745} = 1.475 \qquad (9.35)$$

и ударный ток в $\frac{100}{U_k}\%$ $K_{уд} = \frac{100}{6.5}1.475 = 22.7$ раз больше амплитуды номинального тока и в 40 раз превышает ток нагрузки трансформатора.

При внутренних коротких замыканиях в трансформаторе, когда вследствие повреждения изоляции накоротко замыкается часть витков, в поврежденной части обмотки ток еще больше, так как напряжение

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

или ЭДС этой части обмотки уменьшается пропорционально числу витков в первой степени, а индуктивное сопротивление уменьшается пропорционально квадрату числа витков.

9.2.4. Действие токов короткого замыкания

Значительные токи внезапного короткого замыкания вызывают появление опасных для изоляции механических усилий в обмотках трансформатора. Поскольку по первичной и по вторичной обмоткам протекают противоположные по направлению токи, то электромагнитные силы от взаимодействия этих токов стремятся сжать витки внутренней обмотки и растянуть витки наружной обмотки (рисунок 9.10).

Наоборот, силы от взаимодействия одинаковых по направлению токов в ветвях каждой из обмоток стремятся сжать их по высоте.

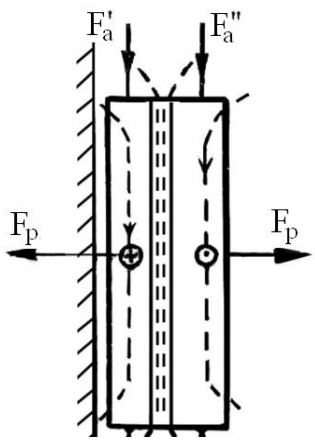


Рисунок 9.10 – Поля рассеяния и силы, действующие на обмотки трансформатора при коротком замыкании

Во время короткого замыкания электромагнитные силы пропорциональны или произведению токов двух обмоток $F_p = i_{1max} \times i_{2max}$, или квадрату тока каждой из обмоток $F_a^{'} = i_{1max}^2$ и возрастают, по сравнению с силами в номинальном режиме, в 600…800 раз. Эти силы пульсируют с частотой $2f = 100$ Гц, не изменяя своего направления. Если механические напряжения в обмотках под действием электромагнитных сил превышают 50…60 Н/см^2, происходит их разрушение.

Поэтому при проектировании трансформаторов тщательно конструируется крепление его обмоток. Детали и узлы крепления испытываются на прочность на специальных испытательных стендах.

Опасными являются также тепловые действия токов короткого замыкания на обмотки, так как электрические потери в обмотках, пропорциональные квадрату тока, возрастают в сотни раз и температура обмоток резко повышается. Скорость нарастания температуры при этом составляет 3…10 ^{0}C/c, а время достижения предельно допустимой температуры (до 250^0 С) составляет 5…25с.

Обычно защита отключает трансформатор от сети значительно раньше этого времени и температура обмоток не достигает предельной. Тем не менее, чтобы избежать возможного взрыва при больших тепловыделениях, в баке масляных трансформаторов предусматриваются предохранительный клапан и выхлопная труба, обеспечивающая выброс масла в специальные емкости.

9.2.5. Витковое короткое замыкание в обмотках трансформатора

При витковых замыканиях, например, во вторичной обмотке трансформатора ток в замкнутых витках можно определить исходя из равенства МДС обмоток

$$I_{2н} = I_{2k} W_{2k} \ , \qquad (9.36)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

откуда $$I_{2k} \approx \frac{W_2}{W_{2k}} I_{2н} \qquad (9.37)$$

Для первичной обмотки индекс «2» в этих соотношениях меняется на индекс «1».

Как следует из (9.37) ток в замкнутых накоротко витках обмотки может в десятки и сотни раз превышать номинальный ток нагрузки, что приводит к недопустимому местному нагреву, а огромные силы, действующие на короткозамкнутые витки, приводят к выходу трансформатора из строя.

При витковом замыкании во вторичной обмотке ток первичной обмотки практически не увеличивается, что исключает создание защиты трансформатора. Единственной надежной гарантией, предохраняющей трансформатора от повреждения в результате витковых замыканий, является правильный расчет, качественная технология и грамотная их эксплуатация.

9.3. Переходные процессы в асинхронных двигателях

9.3.1.Общие представления о переходных процессах в асинхронных двигателях

Переходные процессы в АД возникают при пусках, реверсах, торможениях, изменениях нагрузки, напряжения и частоты, при изменении параметров машины, при регулировании и т.д. Наиболее важными переходными процессами являются процессы пуска, торможения, реверса, повторного включения и изменения нагрузки на валу.

В некоторых электроприводах двигатели непрерывно работают в переходных режимах и понимание происходящих в них физических процессов определяют как уровень проектирования, так и уровень эксплуатации. К таким электроприводам на судах относятся многие устройства энергетической установки, систем управления и защиты, общесудовых систем.

На рисунке 9.11 приведены осциллограммы прямого пуска двигателя АК51/4-42 (2.8 кВт, 1500 об/мин). Как видно, в начале переходного процесса броски токов максимальны. В первый полупериод возникает максимальный момент, называемый ударным моментом $M_{уд}$. Колебания тока и момента отражаются на частоте вращения ротора. В конце переходного процесса колебания тока и момента затухают, а скорость плавно достигает установившегося значения.

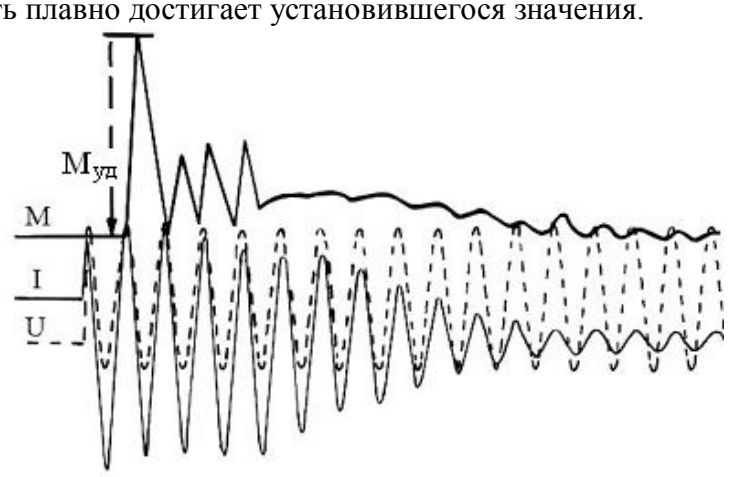


Рисунок 9.11 – Прямой пуск асинхронного двигателя малой мощности

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Переходные процессы во вращающихся механизмах определяются электромагнитными процессами, связанными с созданием полей и механическими процессами, обусловленными изменениями частоты вращения ротора. Длительность электромагнитных процессов определяется электромагнитной постоянной времени $T_{эм}$, электромеханических – моментом инерции ротора и характеризуется постоянной времени $T_м$.

Обычно в асинхронных двигателях $T_{эм}$ на порядок меньше,чем $T_м$, однако электромагнитные процессы оказывают существенное влияние на поведение двигателей и должны учитываться при расчетах.

9.3.2. Пуск асинхронного двигателя в ход

При рассмотрении переходных процессов при пуске рассматривается случай, когда двигатель включается в сеть при разомкнутой и замкнутой обмотке ротора.

В первом случае явления в АД носят такой же характер, что и при включении трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке. И так же, как и в трансформаторе наиболее опасным является включение, когда напряжение проходит через нуль ($\psi = 0$, рисунок 9.1). При этом магнитный поток определенной фазы, имеющий установившуюся $\phi_у = \phi_m cos\omega t$ и свободную $\phi_{св} = \phi_m e^{-\frac{t}{T}}$ составляющие, может в два раза превышать поток машины в нормальном режиме работы. Это приводит к возрастанию тока намагничивания, который может быть в несколько раз выше номинального тока двигателя.

На рисунке 9.12 приведены осциллограммы тока двух фаз при подключении к сети двигателя АК 41/4-42 при разомкнутом фазном роторе. В данном случае ток включения существенно превышает не только установившийся ток холостого хода, но и номинальный ток двигателя.

Если в сеть включается двигатель с замкнутым накоротко и заторможенным ротором (это реальный пуск), то в первый момент времени n=0 и явления качественно те же, что и при внезапном коротком замыкании трансформатора.

Как было показано в разделе «Асинхронные двигатели» вращающий момент образуется в результате взаимодействия токов ротора и результирующего магнитного потока

$$M_{вн} = C_m I_2' \Phi_m \cos\Psi_2. \qquad (9.38)$$

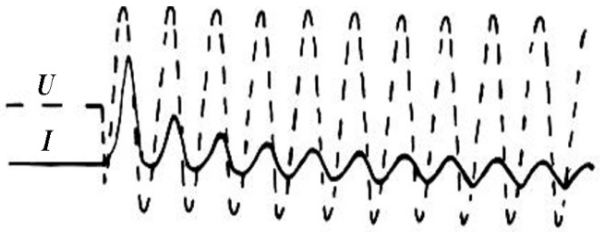


Рисунок 9.12 – Подключение АД к сети при разомкнутой обмотке ротора

Поскольку магнитный поток ϕ_m пропорционален намагничивающему току $I_μ$, то можно записать

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$M_{эм} = KI_2' I_\mu sin\alpha \qquad (9.39)$$

где α - угол между векторами I_2' и I_μ.

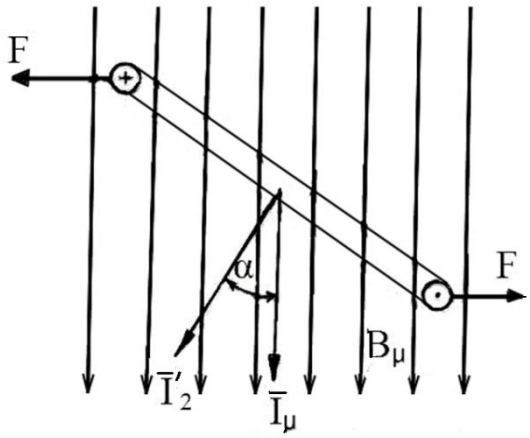


Рисунок 9.13 – К пояснению взаимодействий в АД при образовании вращающего момента

Физический смысл формулы (9.39) поясняется на рисунке 9.13, где обмотки ротора изображены эквивалентной катушкой, а направление магнитного потока ϕ совпадает с направлением намагничивающего тока I_μ Положительное направление вектора тока I_2' совпадает с направлением МДС катушки. Из рисунка 9.13 следует, что для рассматриваемой схемы вращающий момент имеет максимальное значение при $\alpha = 90^0$ и равен нулю при $\alpha = 0$.

Отметим также, что поскольку электромагнитный момент в АД определяется симметричным действием токов фаз, то в (9.39) под токами I_μ и I_2' понимаются не фазные токи, а так называемые изображающие векторы, амплитуды которых равны геометрической сумме токов всех фаз, а направления совпадают с направлениями амплитуды волны МДС, образованной данной составляющей токов.

Следовательно, в установившемся режиме векторы изображающих векторов токов вращаются относительно статора АД с угловой частотой $\omega = 2\pi f_1$.

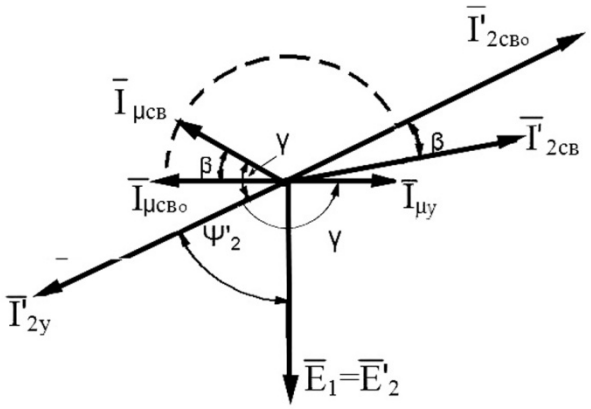


Рисунок 9.14 – Векторная диаграмма составляющих переходных токов АД

Векторная диаграмма, отражающая переходные процессы при пуске АД, дана на рисунке 9.14, где показаны векторы ЭДС и и все составляющие токов: $\bar{I}_{2y}'$ и $\bar{I}_{\mu y}$ - установившиеся значения токов ротора и намагничивания; $\bar{I}_{2cво}'$ и $\bar{I}_{\mu cво}$ - свободные составляющие этих токов при t = 0.

Если статор мысленно вращать в сторону, противоположную вращению поля, то изображающие векторы установивших токов $\bar{I}_{2y}'$ и $\bar{I}_{\mu y}$ будут неподвижными, что и отражается на векторной диаграмме.

Свободные составляющие образуют волну МДС, ось которой неподвижна относительно обмоток статора. Поскольку статор враща-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ется, то изображающие векторы токов $I'_{2св}$ и $I_{\mu св}$ вращаются вместе со статором по часовой стрелке и одновременно затухают с определенными постоянными времени. В частности, вращаясь, они изменяются по величине по закону

$$\bar{I}'_{2св} = \bar{I}'_{2св0} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (9.40)$$

$$\bar{I}_{\mu св0} = \bar{I}_{\mu св0} e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (9.41)$$

где $$T_1 = \frac{L_1+L_2}{r_1+r'_2} = \frac{L_k}{r_k} - \quad (9.42)$$

постоянная времени для свободного тока;

$$T_0 = \frac{L_\mu}{r\mu} \quad (9.43)$$

- постоянная времени для свободной составляющей тока намагничивания.

Соотношения между токами $\bar{I}'_2$ и $\bar{I}_\mu$ и постоянными времени T_1 и T_0 различно. При пуске двигателя приведенный ток ротора почти равен току статора и в 15…20 раз превосходит по величине намагничивающий ток. Наоборот, постоянная времени T_0 почти на два порядка больше, чем T_1. По мере разгона двигателя свободные составляющие вращаются по часовой стрелке с угловой скоростью ω и спустя время t поворачиваются на угол β=ωt. Текущие значения этих токов на векторной диаграмме обозначены $\bar{I}'_{2св}$ и $\bar{I}_{\mu св}$.

В результате взаимодействия составляющих токов при пуске АД образуется, по меньшей мере, четыре составляющих момента.

1. $$M_{п1} = M_{пу} = kI'_2 I_\mu \sin\alpha = kI'_2 I_\mu \cos\varphi_2. \quad (9.44)$$

Это положительный установившийся момент, направленный против часовой стрелки и приводящий ротор во вращение.

2. $$M_{п2} = -kI'_2 I_{\mu св} \sin\gamma = -kI'_2 I_{\mu св0} e^{-\frac{t}{T_0}} \sin\gamma, \quad (9.45)$$

где $$\gamma = 90 + \beta - \psi_2, \qquad \psi_2 - arctg\frac{x_k}{r_k}. \quad (9.46)$$

Знак минус в (9.46) отражает то, что направление угла от I'_2 к $I_{\mu св}$ отсчитывается против часовой стрелки. Учтя (9.44) и приняв во внимание, что $I_\mu = I_{\mu св}$, после преобразований получаем

$$M_{п2} = -M_{пу}(cos\omega t + \frac{x_k}{r_k} sin\omega t) e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (9.47)$$

3. $$M_{п3} = kI'_{2св0} I_\mu sin(90 - \psi_2 - \beta) e^{-\frac{t}{T_1}} = kI'_{2св0} I_\mu cos(\psi_2 + \beta) e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (9.48)$$

Учтя (9.44) и приняв во внимание, что $I'_{2св0} = I'_2$, после преобразований получаем

$$M_{п3} = -M_{пу}(cos\omega t - \frac{x_k}{r_k} sin\omega t) e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (9.49)$$

4. $$M_{п4} = kI'_{2св} I_{\mu св} \sin(\omega t + \psi_2) \ . \quad (9.50)$$

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Составляющая тока $I'_{2св}$ затухает значительно быстрее, чем составляющая $I_{\mu св}$ (так как $T_1 \ll T_0$), поэтому можно считать, что $I_{\mu св} = I_{\mu сво} = I_{\mu}$. При этом предположении получаем

$$M_{п4} = M_{пу} e^{-\frac{t}{T_2}}. \quad (9.51)$$

Поскольку составляющие момента, изменяющиеся с постоянной времени T_1, быстро затухают, переходный электромагнитный момент при пуске определяется, главным образом, составляющей (9.47), а соотношение для полного электромагнитного момента имеет вид

$$M_{эм} \approx M_{пу}\left[1 - (cos\beta + \frac{x_k}{r_k} sin\beta) e^{-\frac{t}{T_0}}\right]. \quad (9.52)$$

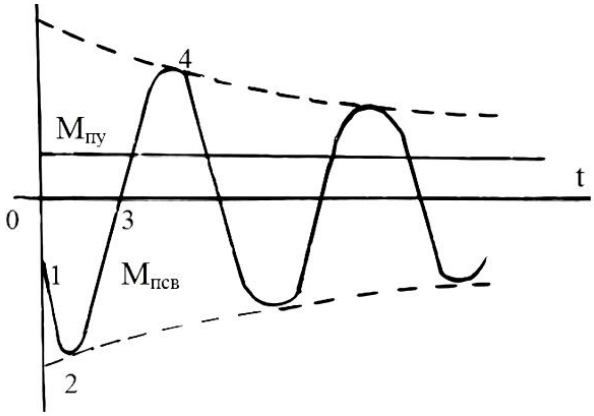


Рисунок 9.15 – Составляющие момента АД в переходном режиме

При включении переходный момент равен и противоположен пусковому установившемуся моменту (т.1 на рисунке 9.15).

По мере разгона двигателя составляющая момента $M_{п2}$ пульсирует, а ее затухание в двигателях малой и средней мощности происходит за 0,3…1,5 сек. Это и находит отражение в осциллограмме, показанной на рисунке 9.11.

Отношение переходного момента к пусковому установившемуся моменту определяется отношением x_k/r_k и может превышать десятикратное значение.

9.4. Переходные процессы в синхронном генераторе при коротком замыкании

9.4.1. О постоянстве потокосцеплений в сверхпроводящем контуре

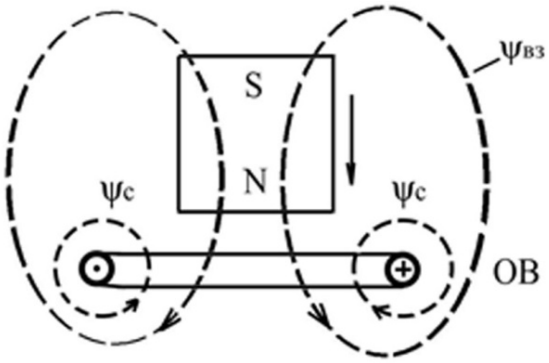


Рисунок 9.16 – Пояснение к теореме о постоянстве потокосцеплений в сверхпроводящем контуре

Активные сопротивления обмоток СГ (статора, возбуждения, успокоителей) малы по сравнению с индуктивными сопротивлениями и ими можно пренебречь. В таком случае каждая обмотка может быть представлена как сверхпроводящий контур, для которого справедлив закон постоянства потокосцепления.

Рассмотрим схему (рисунок 9.16), на которой демонстрируются взаимо-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

действия перемещающегося постоянного магнита N – S и катушки ОВ, не имеющей активного сопротивления.

Для такой схемы при $t = 0$ имеем $i = 0$, , а при $t > 0$, $i \neq 0$ и потокосцепления взаимоиндукции $\Psi_{вз}$ и самоиндукции Ψ_c составляют $\psi_{c2} = -\varphi_c$, при этом $\Psi_{полн}$=0.

Если к контуру приблизить магнит (по стрелке), то под действием потокосцепления взаимной индукции $\psi_{вз}$ возникает такой по величине и по направлению ток, который создает поток самоиндукции $\psi_c = -\psi_{вз}$.

По закону Кирхгофа для катушки ОВ можно записать, что

$$e_{вз} + e_c - 0,$$

где $$e_{вз} = -\frac{d\psi_{вз}}{dt}; e_c = -\frac{d(Li)}{dt} = -\frac{d\psi_c}{dt}.$$

Таким образом, для сверхпроводника справедливы соотношения

$$\frac{d(\psi_c + \psi_{вз})}{dt} = 0; \psi_c + \psi_{вз} = Const = \psi.$$

Этот поток остается постоянным (в первый момент) при любых обстоятельствах. Если, например, первоначально поток $\psi_{вз} \neq 0$, то он должен сохраняться.

Характер изменения тока в контуре при различных начальных условиях показан на рисунке 9.17.

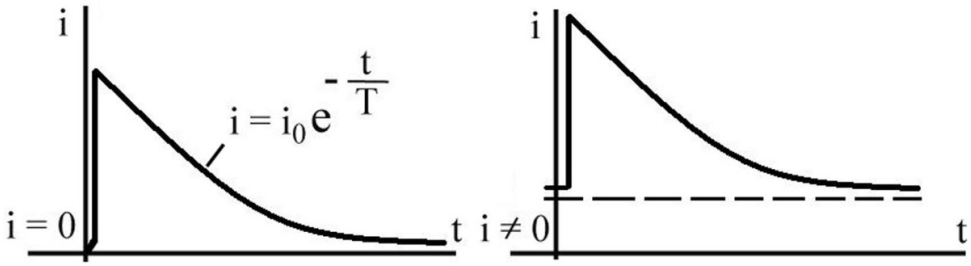


Рисунок 9.17 – Изменение тока в контуре при различных начальных условиях

Свободный ток $i_{св}$, наводимый внешним полем, затухает с постоянной времени Т, а вместе с ним затухает и поле самоиндукции. С течением времени $i_{св}$ затухает совсем, $\varphi_c = 0$, и в контуре остается только поле взаимоиндукции.

Мы можем представить себе, что контур – это обмотка возбуждения синхронного генератора, а магнит – это поле продольной размагничивающей реакции якоря, возникающей в результате к.з. В ответ на продольную реакцию якоря образуется скачок тока возбуждения, а следовательно – скачок ЭДС, являющейся функцией тока и потока

$$e_a = f(\phi) = f(i_c)$$

и ток короткого замыкания, определяемый соотношением $I_{кз} = \frac{E}{x_d}$, возрастает.

Это показано на рисунке 9.18.

Из рисунка 9.18 видно, что в СМ (в отличие от цепи r - L) после

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

к.з. ЭДС увеличивается скачком и точно также увеличивается ток, соответствующий этой ЭДС. Суммарный ток в начальный момент времени может превосходить номинальный ток в 10…20 раз. Хорошо видно также, что в СМ затухает не только свободный (апериодический) ток $i_{св}$, но и установившийся (периодический) ток $i_{уст}$.

Это важное отличие СМ от электрической цепи r – L.

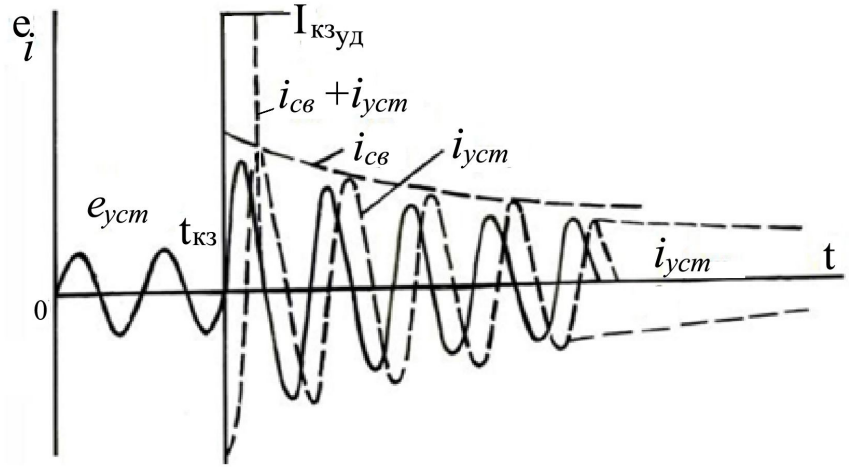


Рисунок 9.18 – Составляющие тока при коротком замыкании СГ

9.4.2. Симметричное внезапное короткое замыкание СГ

Вначале рассмотрим процессы в одной фазе при допущении, что до момента к.з. ток фазы $I_a = 0$ и в момент к.з. при $t = 0$ $\psi_0 = 0$, а ЭДС $e_a = E_m$ (рисунок 9.19, а)

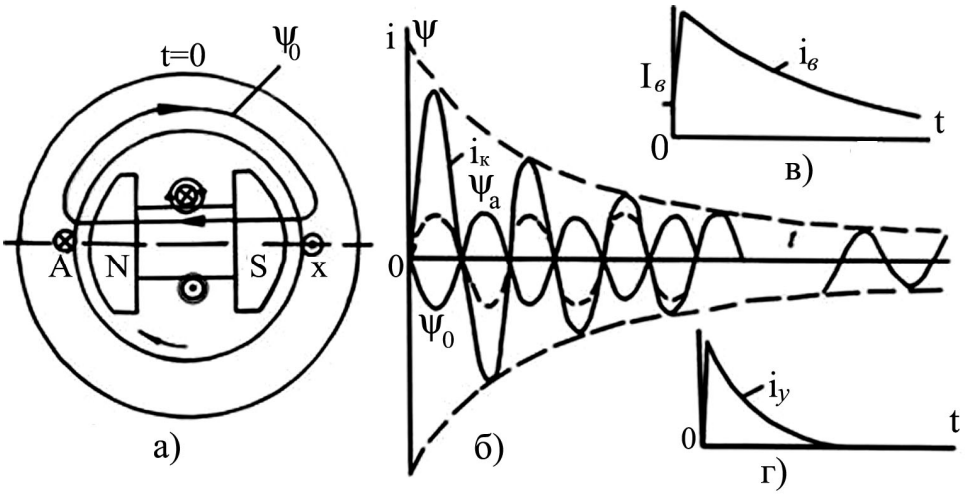


Рисунок 9.19 – Потокосцепления и токи при внезапном коротком замыкании СГ

В этот момент времени, согласно условию, $i_k = 0$. Потокосцепление с фазой A – X при вращении ротора изменяется по синусоидальному закону; исходя из постоянства потокосцепления после к.з. ток i_k имеет такое направление и величину, что потокосцепление в любой момент времени равно и противоположно , т.е.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$\psi_0 + \psi_a = 0.$$

Однако, при внезапном коротком замыкании поток Ψ_a, являющийся потоком реакции якоря, замыкается не по то тем путям, как он замыкался бы при установившемся коротком замыкании (рисунок 9.20,а – пунктир).

В данном режиме потокосцепления успокоительной обмотки и обмотки возбуждения в первый момент времени также должны остаться неизменными, а это возможно, если в этих обмотках возникают такие по величине и направлению токи, которые не дают потоку Ψ_{ad} замыкаться по пунктирной линии, а вытесняют его на путь, показанный на рисунке 9.20,а сплошной линией.

Магнитная проводимость этого пути мала, поэтому для создания необходимого по величине потока Ψ_{ad} требуется значи тельно большая МДС статора, т.е. больший ток, чем $i_{куст}$

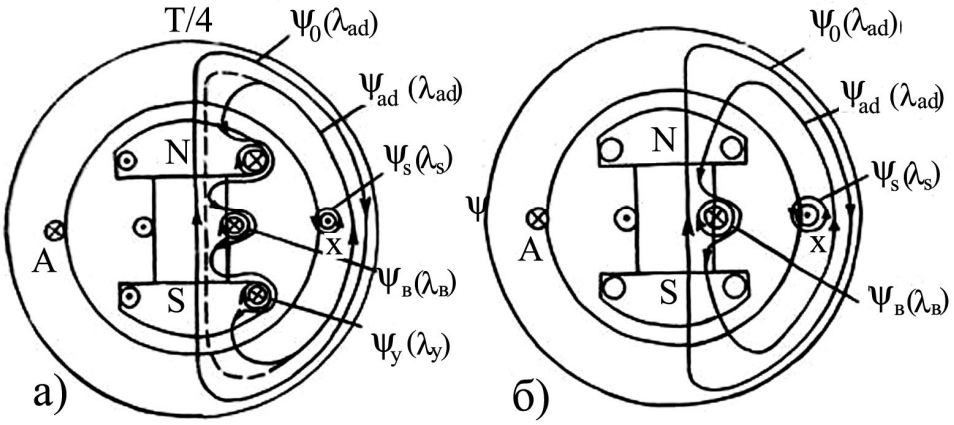


Рисунок 9.20 – Пути потокосцеплений на различных этапах короткого замыкания

в соответствии с соотношением $\psi = i\lambda$. В статоре возникает бросок тока i_k, достигающий своего наибольшего значения через время T/4 после к.з. (рисунок 9.19, б). Соответствующие броски токов i_s и i_y показаны на рисунке 9.19, в и г.

Поскольку обмотки СГ в действительности не являются идеальными сверхпроводниками, а обладают некоторыми активными сопротивлениями, то переходные процессы постепенно затухают и картина распределения потоков постепенно переходит к установившемуся к.з. с гораздо меньшим током $i_{к\,установ}$.

Затухание процесса зависит, как уже отмечалось, от постоянной времени $T = \frac{L}{R}$, т.е. происходит тем быстрее, чем больше R и меньше L.

Сначала затухает переходный процесс в успокоительной обмотке, имеющей малую постоянную времени T'', а затем – в обмотке возбуждения, имеющий постоянную времени T', Это отражено в кривых тока $i_s = f(t)$ и $i_y = f(t)$ (рисунок 9.19, в и г). Следует обратить внимание на то, что токи в обмотках ротора, хотя и меняются по величине, но имеют постоянное направление, т.е. являются апериодическими. Действительно, только в этом случае создаваемые ими поля уравнове-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

шивают определенные составляющие потоков якоря. Поток якоря проникает сначала в успокоительную обмотку (рисунок 9.20, б), а затем – в контур обмотки возбуждения, после чего наступает режим установившегося короткого замыкания (рисунок 9.21, а).

Токи в обмотке статора создают вращающиеся (со скоростью вращения ротора) МДС и потоки, имеют частоту 50 Гц и носят, таким образом, периодический характер.

Составляющая тока в статоре, соответствующая успокоительной обмотке, называется сверхпереходной составляющей тока внезапного к.з (в.к.з.), а составляющая, соответствующая обмотке возбуждения – переходной составляющей тока в.к.з. Их затухание соответствует туханию токов i_y и $i_в$ (рисунок 9.21, б и в). Ток установившегося к.з. показан на рисунке 9.21, г.

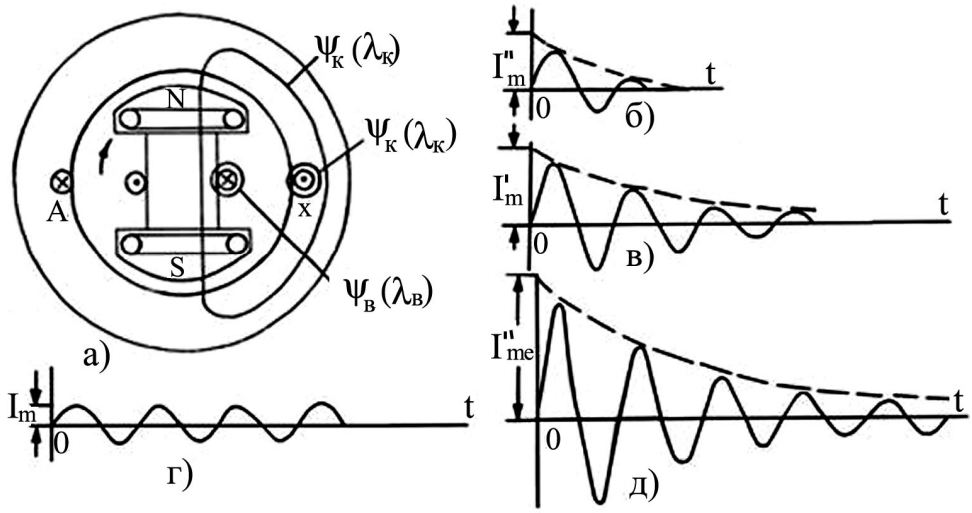


Рисунок 9.21 – Составляющие тока статора при симметричном ВКЗ СГ

Таким образом, ток внезапного к.з. может быть представлен как сумма трех составляющих: сверхпереходного (рисунок 9.21, б), переходного (рисунок 9.21, в) и установившегося токов (рисунок 9.21, д), т.е.

$$i_k = i'' + i' + i_{уст} \qquad (9.53)$$

Амплитуда этого тока I''_{mc} определяется суммой $I''_{mc} = I''_m + I'_m + I_m$.

Кривая тока внезапного короткого замыкания (ВКЗ) (рисунок 9.21,д) для рассмотренного случая носит название симметричной или периодической составляющей тока внезапного короткого замыкания.

9.4.3. Апериодическое внезапное короткое замыкание СГ

Этот случай ВКЗ рассматривается при условии, что при $t = 0$, $\psi_0 = \psi_m$, е$= 0$, а обмотка фазы А - х пронизывается наибольшим потоком (рисунок 9.22, а).

Исходя из принципа постоянства потокосцепления (для катушки *А-х*), по ней должен протекать такой по величине и направлению ток, чтобы ее потокосцепление в момент к.з. и в последующие моменты времени не изменялось. Поэтому ток статора должен быть постоянным во времени, а лучше сказать сразу – апериодическим, поскольку контур *А-х* не является идеальным сверхпроводником.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

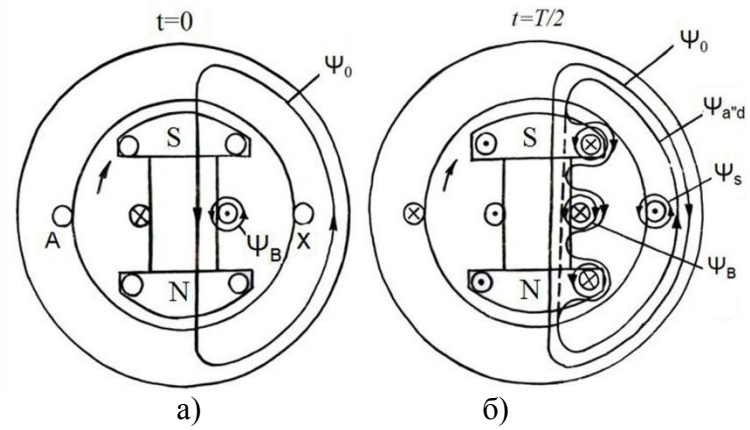


Рисунок 9.22 – Потокосцепления при апериодическом ВКЗ СГ

Т.е. этот ток будет затухать по закону показательной функции со скоростью, определяемой постоянной времени $T_a = \frac{L_a}{R_a}$. Ток этот так и называют – апериодической составляющей тока внезапного короткого замыкания.

Наряду с этим в обмотке статора возникают и все три ранее рассмотренные составляющие, возникающие в соответствии с законом замыкания потока якоря через ротор (рисунок 9.22, б).

Периодическая составляющая i_a тока короткого замыкания (рисунок 9.23, а) отстает от ЭДС e_a на угол $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ (т.к. $R_a \approx 0$) и поэтому при $t = 0$ достигает наибольшего значения I''_{mc}.

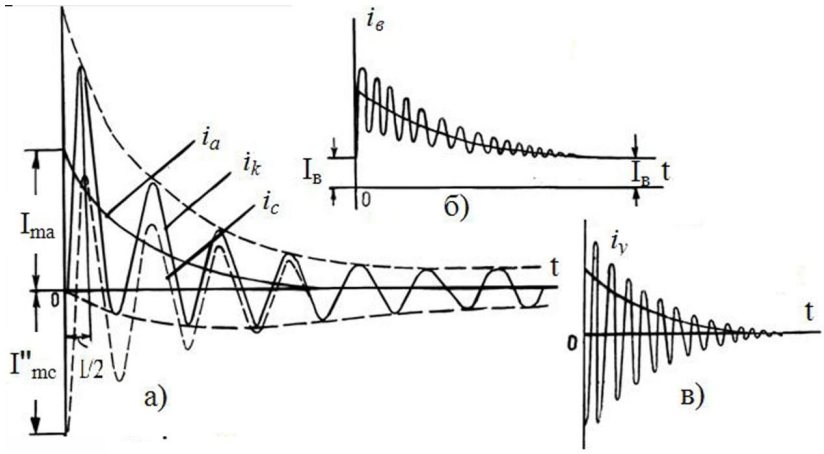


Рисунок 9.23 – Составляющие тока якоря при апериодическом ВКЗ СГ

Так как по условию потокосцепление статора с ротором должно остаться неизменным и максимальным, то i_k должно быть равно нулю и начальная амплитуда апериодической составляющей тока i_a должна быть равна по величине и направлена в обратную сторону к I''_{mc} т.е. $I_{ma} = -I''_{mc}$.

Результирующая кривая тока внезапного короткого замыкания в этом случае получается в результате сложения кривых i_c и i_a.

Так как апериодический ток создает в пространстве неподвижное магнитное поле, в котором вращается ротор, то в обмотках ротора наводятся переменные токи основной частоты, налагающиеся на соот-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ветствующие апериодические составляющие и взаимодействующие с апериодической составляющей тока в статоре (рисунок 9.23, б и в).

9.4.4. Переходные и сверхпереходные индуктивные сопротивления

Как в нормальном режиме, так и при ВКЗ поток продольной реакции якоря имеет две составляющие Ψ''_{ad} и Ψ_s. Составляющая Ψ''_{ad} замыкаются по трем участкам, имеющим соответствующие сопротивления или проводимости:

- сердечник статора и воздушный зазор, имеющий удельную магнитную проводимость λ_{ad}. Эта величина такая же, как и при установившемся к.з., так как определяется, в основном, воздушным зазором;
- участок потока рассеяния успокоительной обмотки с проводимостью λ_y;
- участок потока рассеяния обмотки возбуждения с проводимостью $\lambda_в$.

Суммарная магнитная проводимость зазора, успокоительной обмотки и обмотки возбуждения определяется по соотношению

$$\frac{1}{\lambda''_{ad}} = \frac{1}{\lambda_{ad}} + \frac{1}{\lambda_y} + \frac{1}{\lambda_в} \qquad (9.54)$$

Таким образом для сверхпереходной продольной составляющей λ''_d можно записать

$$\lambda''_d = \lambda_s + \lambda''_{ad} = \lambda_s + \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{ad}} + \frac{1}{\lambda_y} + \frac{1}{\lambda_в}}. \qquad (9.55)$$

Каждой проводимости соответствует определенная индуктивность L и при заданной частоте – определенное индуктивное сопротивление:

X''_d – сверхпереходное продольное индуктивное сопротивление;

X_s – индуктивное сопротивление рассеяния статора;

X''_{ad} – сверхпереходное продольное индуктивное сопротивление реакции якоря;

X_{ad} - продольное синхронное индуктивное сопротивление реакции якоря;

X_y и $X_в$ - индуктивные сопротивления рассеяния успокоительной обмотки и обмотки возбуждения.

Схема соединений этих сопротивлений показана на рисунке 9.24

Тогда по аналогии с соотношением (9.55) имеем

$$X''_d = X_s + X''_{ad} = X_s + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_y} + \frac{1}{X_в}} \qquad (9.56)$$

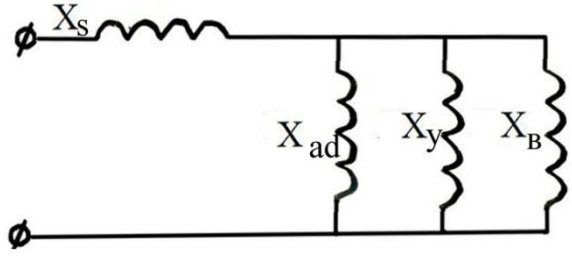


Рисунок 9.24 – Составляющие индуктивного сопротивления магнитной цепи СГ при коротком замыкании

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Поскольку сопротивление X_y достаточно мало, то величина $\frac{1}{X_y} \approx \infty$ и в сверхпереходном режиме выполняется условие

$$X_d'' \approx X_s, \qquad (9.57)$$

т.е. сверхпереходное индуктивное сопротивление X_d'' определяется только рассеянием обмотки якоря.

Примерно через 0,05-0,5 секунд процессы в успокоительной обмотке затухают, что эквивалентно величине $X_y = \infty$. В этом случае приходим к значению суммарного индуктивного сопротивления

$$x_d' = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_в}}, \qquad (9.58)$$

называемом переходным продольным сопротивлением.

Значения этих сопротивлений приведены в таблице

Тип генератора	X_d''	X_d'
НЯПСГ	0.11…0.14	0.2…0.24
ЯПСГ	---	0.21…0.36

9.4.5. Величина токов внезапного короткого замыкания СГ

При наличии только симметричной составляющей тока ВКЗ начальные действующие значения токов при 3^x фазном к.з. определяются соотношениями:

$$I_c'' = \frac{E_0}{X_d''}; \qquad I_c' = \frac{E_0}{X_d'}.$$

С учетом апериодической составляющей тока ВКЗ начальные действующие значения результирующего тока ВКЗ

$$I_k'' = 1.73\frac{E_c}{X_c''}; \; I_k' = 1.73\frac{E_0}{X_d'};$$

Токи I_k внезапного двухфазного и однофазного к.з. имеют – первые несколько меньше, а вторые несколько большие значения, чем при 3^x фазном к.з.

В отношении нагревов мгновенное к.з. не представляет особой опасности, т.к. продолжается короткое время. Главную опасность представляют большие динамические усилия, которые могут привести к аварии генератора.

9.5. Вопросы для самопроверки и контроля знаний

1. Запишите уравнение тока для короткого замыкания r-L цепи.
2. Изобразите составляющие токов при коротком замыкании цепи r-L.
3. Запишите уравнение магнитного потока при включении трансформатора в сеть.
4. Изобразите составляющие магнитного потока при включении трансформатора на сеть в режиме холостого хода.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

5. Изобразите кривую изменения тока намагничивания трансформатора при возрастании магнитного потока.

6. Запишите уравнение для тока при внезапном коротком замыкании трансформатора.

7. Запишите соотношение для ударного коэффициента при ВКЗ трансформатора.

8. Поясните возникновение и действие электромагнитных сил, действующих на обмотки трансформатора при коротком замыкании.

9. Опишите физические процессы при витковых замыканиях в обмотках трансформатора.

10. Запишите формулу для электромагнитного момента асинхронного двигателя.

11. Запишите соотношения для составляющих тока статора при пуске АД.

12. Запишите соотношения для составляющих вращающего момента при пуске АД.

13. В чем принципиальное отличие к.з. в цепи r – L и в обмотке якоря СГ.

14. Сформулируйте закон постоянства потокосцеплений в контуре электрической цепи.

15. Назовите составляющие тока короткого замыкания синхронного генератора.

16. Поясните характер изменения потокосцепления при внезапном коротком замыкании СГ.

17. Назовите составляющие тока статора при симметричном внезапном коротком замыкании СГ.

18. Поясните особенности изменения потокосцеплений при апериодическом внезапном коротком замыкании СГ.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 10. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

10.1. Основные понятия, определения и задачи технической эксплуатации судовых электрических машин (СЭМ)

10.1.1. Основные понятия и определения

Развитие морского флота сопровождается непрерывным ростом электрификации морских судов, усложнением судового электрооборудования (СЭО) и возрастанием интенсивности его использования, широким внедрением средств автоматизации (СА). При этом увеличиваются трудовые и материальные затраты на техническое обслуживание (ТО) и ремонт СЭО и СА для поддержания их в работоспособном состоянии. С возрастанием технической сложности систем и оборудования возрастают и требования к квалификации обслуживающего персонала, которой должен хорошо знать и выполнять Правила технической эксплуатации СЭО и СА.

Общие задачи, содержание, систему технической эксплуатации и требования к техническому состоянию СЭО и СА определяет нормативный документ морского транспорта Украины – «Правила технической эксплуатации морских и речных судов; Электрооборудование (КНДЗ 31.2.002.07-96)». В соответствии с этими Правилами *под технической эксплуатацией СЭО и СА понимается совокупность требований к техническому использованию (ТИ), техническому обслуживанию (ТО) и ремонту, обеспечивающих безотказную работу при обязательном соблюдении правил безопасности и пожарной безопасности.*

Техническое использование (ТИ) *– использование СЭО и СА по назначению с технико-экономическими показателями, предусмотренными инструкциями и нормативно-техническими документами заводов-изготовителей. ТИ, осуществляемое экипажем, заключается в контроле за техническим состоянием, проверке готовности к действию, вводе и выводе из действия, поддержании заданных режимов работы, сопоставлении заданных и фактических параметров, оценке и регистрации отклонений.*

Техническое обслуживание (ТО) *– это комплекс операций, направленных на поддержание СЭО и СА в работоспособном состоянии, которые могут выполняться при использовании электрооборудования, при хранении и при транспортировке. ТО выполняется электротехническим персоналом с привлечением, при необходимости, других членов экипажа или специалистов береговых служб. Работы по ТО выполняются в соответствии с утвержденным судовладельцем планом-графиком, инструкциями по эксплуатации заводов-изготовителей или другой технической документацией, определяющей номенклатуру, состав, периодичность и трудоемкость работ.*

В зависимости от назначения, объема и периодичности работ по ТО электрооборудования различают:

ТО-1 - проводится не реже одного раза в месяц без разборки для поддержания ЭО в работоспособном состоянии и предусматривает наружную чистку;

ТО-2 - проводится не реже одного раза в три месяца с частичной

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

разборкой для контроля технического состояния и поддержания работоспособности;

ТО-3 - предназначен для всестороннего контроля технического состояния и наиболее полного восстановления работоспособности с периодичностью 6-12 месяцев со значительной степенью разборки.

В процессе ТО определяется техническое состояние изделий. Вид технического состояния характеризуется соответствием или несоответствием качества изделия определенным техническим требованиям, изложенным в нормативно-технической документации на это изделие (ГОСТ 20911-75). С помощью установленных критериев качества различают следующие виды технических состояний: исправное и неисправное, работоспособное и неработоспособное. Исправным называется такое состояние изделия, при котором оно соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документации (НТД). Неисправным называется состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований НТД. Работоспособное состояние - состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных НТД. Неработоспособное состояние - состояние изделия, при котором хотя бы один параметр не соответствует требованиям НТД. Работоспособное изделие может быть неисправным, но его неисправности не настолько существенны, чтобы нарушать работоспособность.

Ремонт *- это комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности. Под операцией ремонта в соответствии с ГОСТ 18322 - 78 понимают законченную часть ремонта, выполняемую на одном рабочем месте исполнителями определенной специальности. В ремонт могут входить разборка, дефектовка, контроль технического состояния, восстановление деталей, сборка и другие операции.*

Содержание части операций ремонта может совпадать с содержанием некоторых операций ТО. Ремонт, как правило, сопровождается выдачей определенных гарантий на последующий срок эксплуатации. В зависимости от характера неисправностей, сложности и объема работ, необходимых для приведения электрооборудования (ЭО) в исправное или работоспособное состояние различают следующие виды ремонта:

текущий – ремонт, выполняемый для обеспечения или восстановления работоспособности изделия и состоящий в замене и (или) восстановлении отдельных частей;

средний - выполняемый для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса изделия с заменой или восстановлением составных частей и контролем технического состояния составных частей, выполняемом в обьеме, установленном в НТД;

капитальный - ремонт, выполняемый для восстановления исправности и полного или близкого к полному восстановлению ресурса изделия с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые.

При ремонте судов часто применяется вид ремонта как агрегатная замена изделия.

Для судового электрооборудования как правило проводится средний ремонт

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

10.1.2. Общие положения по организации эксплуатации судового электрооборудования

Эксплуатация электрооборудования должна осуществляться в строгом соответствии с действующими в отрасли Правилами техники безопасности на судах (в дальнейшем – Правила техники безопасности), Правилами пожарной безопасности на судах (в дальнейшем – Правила пожарной безопасности), Санитарными правилами для морских судов (в дальнейшем – Санитарные правила), и судовой эксплуатационной документацией.

Технические описания и инструкции по эксплуатации (Руководства по эксплуатации) заводов-изготовителей электрооборудования (в дальнейшем - Инструкции по эксплуатации), являются основными документами для обслуживающего персонала. Если отдельные положения Правил эксплуатации не согласуются с требованиями инструкций по эксплуатации, должны выполняться требования инструкций. Все инструкции по эксплуатации судового электрооборудования зарубежного производства должны быть переведены на русский язык.

Ответственность за организацию эксплуатации и исправное состояние электрооборудования несет главный (старший) механик.

Ответственность за поддержание в исправном состоянии электрооборудования в процессе эксплуатации возлагается на электромеханика и подчиненный ему электротехнический персонал.

Расписание по заведованиям составляется электромехаником, согласовывается с главным (старшим) механиком и инженерно-технической службой судовладельца.

На судах, где электротехнический персонал штатным расписанием не предусмотрен, эксплуатация судового электрооборудования возлагается по назначению главного (старшего) механика на членов судомеханической службы. Ответственность за исправное состояние электрооборудования в этом случае возлагается, как правило, на третьего механика.

10.1.3. Нормативная документация по обеспечению технической эксплуатации судового электрооборудования

Для обеспечения эксплуатации судового электрооборудования на судне должна быть следующая техническая документация:

- правила техники безопасности на судах;
- правила пожарной безопасности на судах;
- санитарные правила для морских судов;
- правила эксплуатации судового электрооборудования;
- эксплуатационная документация по электрооборудованию;
- документы учета по электротехнической части.

Указанные нормативные документы должны быть представлены на судне последними действующими изданиями.

Эксплуатационная документация по электрооборудованию должна включать:

- технические описания и инструкции по эксплуатации, формуляры, паспорта и другие эксплуатационные документы, поставляемые заводами-изготовителями электрооборудования и комплектуемые предприятием-строителем судна;

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- отчетную эксплуатационную документацию по электрооборудованию судна - чертежи, схемы, инструкции и др. (по перечню предприятия - проектанта);

- инструкции, планы-графики проведения ТО электрооборудования судовладельца.

Эксплуатация электрооборудования должна отражаться в следующих документах учета по электротехнической части:

- машинном электротехническом журнале;

- журнале технического состояния;

- формулярах электрооборудования и электротехнических устройств;

- аккумуляторном журнале;

- книгах учета запасных частей и материально-технического снабжения;

- других документах учета (номенклатуру их устанавливает судовладелец).

Все журналы и книги учета должны быть прошнурованы, пронумерованы и заверены подписью капитана и судовой печатью.

Сведения, отражающие техническое состояние СЭМ, длительность и условия работы, ТО, ремонт и другие данные в период эксплуатации должны также вноситься в формуляры электрооборудования.

В журнал технического состояния СЭМ записывают данные о проведенных в течении дня работах, фиксируют отклонения от номинального режима работы и регистрируют результаты осмотров электрооборудования. В нем обязательно делается отметка о сдаче СЭМ для ремонта и наладки береговым производственным участкам (БПУ). После ремонта регистрируется приемка работ, которая заверяется подписями лица, ответственного за проведение ремонта, и помощника механика.

В формуляр СЭМ в процессе ее эксплуатации заносят сведения о проведенных ремонтах, случаях аварий и обнаруженных дефектах, устранение которых возможно только при ремонте.

В формулярах также приводят результаты измерений зазоров в подшипниках, воздушных зазоров между статором и ротором, нажатия щеток, сопротивления изоляции с указанием даты проведения работ. Указывается также число часов работы механизма за год и результаты инспекторских проверок. Записи должны вестись кратко и предельно четко. Все они обязательно заверяются подписью механика судна.

Помимо этих документов находит применение график технического обслуживания, содержащий перечень и периодичность проведения работ по техническому обслуживанию. В нем указывается оборудование, подлежащее ежедневному осмотру, и приводятся основные параметры, измерение которых необходимо производить.

Все виды ремонтов выполняют в соответствии с ремонтными документами, среди которых необходимо отметить руководство по ремонту, ведомости норм расхода запасных частей и материалов, ремонтных документов и каталог деталей и сборочных единиц.

На судах, где не предусмотрен электротехнический персонал, соответствующие записи о работе электрооборудования должны вестись вахтенным механиком в машинном журнале, а о проведении ТО

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

СЭМ – лицами, ответственными за его заведование в журнале технического состояния.

Форма отчета электротехнического персонала о работе в рейсе устанавливается судовладельцем.

При эксплуатации СЭМ кроме указанной документации необходимо также руководствоваться следующими нормативными документами:

- правилами классификации и постройки морских судов Регистра;
- правилами классификационных освидетельствований судов;
- директивными документами по вопросам эксплуатации судового электрооборудования судовладельцев.

10.1.4. Обязанности электротехнического персонала

Судовой электротехнический персонал обязан:

- знать состав, устройство и технические характеристики электрооборудования, требования инструкций по эксплуатации, других нормативных документов, касающихся его эксплуатации;
- осуществлять приемку электрооборудования в эксплуатацию (при приемке вновь построенного судна или после ремонта и при приеме - сдаче дел);
- подготавливать электрооборудование к действию при выходе судна в море, плаванию в сложных условиях, работе на промысле, к специальным задачам эксплуатации судна, к осмотрам и ремонтам;
- подготавливать и предъявлять электрооборудование к освидетельствованию Регистром или другими органами надзора и обеспечивать устранение замечаний;
- осуществлять использование электрооборудования по назначению в соответствии с требованиями эксплуатационной и нормативно-технической документации в объеме, предусмотренном должностными инструкциями;
- обеспечивать исправное техническое состояние электрооборудования путем регулярного ТО и устранения неисправностей;
- осуществлять контроль за правильным использованием электрооборудования с соблюдением требований Правил техники безопасности и Правил пожарной безопасности при его использовании членами экипажа судна;
- комплектовать, пополнять, сохранять и экономно использовать запасные части, расходные материалы, инвентарь и инструмент (при комплектовании запасных частей следует руководствоваться требованиями Правил Регистра и нормативно-технической документацией);
- комплектовать и содержать в нормальном состоянии техническую документацию по электрооборудованию;
- отражать состояние электрооборудования в процессе эксплуатации в документах учета по электротехнической части;
- поддерживать порядок в электротехнических помещениях.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

10.2. Техническое использование судовых генераторов

10.2.1. Общие положения

Количество генераторов, включаемых на шины ГРЩ, определяется из условия обеспечения потребности в электроэнергии с учетом безопасности мореплавания в каждом эксплуатационном режиме судна. Для сокращения затрат на выработку электроэнергии необходимо обеспечить максимально возможное использование валогенераторов (ВГ) и утилизационных генераторов (УГ).

При использовании генераторов необходимо контролировать:

- основные параметры генераторов (напряжение, ток, частоту, мощность и др.) по штатным щитовым измерительным приборам;
- сопротивление изоляции генераторов и судовой сети по штатным приборам на ГРЩ;
- работу щеточного аппарата, контактных колец (коллектора);
- температуру нагрева генераторов;
- работу подшипников, их температуру нагрева, подачу и давление масла в подшипниках с принудительной смазкой;
- отсутствие постороннего шума и вибрации;
- действие средств АПС (сигнальных ламп, световых табло, звуковых сигналов);
- температуру воздуха в помещении;
- состояние воздушных фильтров;
- исправность защитных заземлений.

По сигналу о высокой нагрузке или неисправности работающего генераторного агрегата (ГА) необходимо принять меры к немедленному вводу в действие резервных ГА, если не предусмотрен автоматический ввод в действие.

По сигналу о низкой нагрузке работающих ГА необходимо вывести из действия один из ГА.

При срабатывании защиты генератора от перегрузки с отключением части потребителей и при необходимости принять меры по дополнительной разгрузке электростанции (ЭС) или вводу резервного ГА, если не предусмотрен их автоматический ввод в действие.

При отключении автомата одного из параллельно работающих генераторов (в случае срабатывания защиты генератора, неисправности ГА или самопроизвольного отключения АВ) при необходимости немедленно выключить часть малоответственных потребителей или ввести в действие резервный ГА, если не предусмотрен автоматический ввод его в действие.

При использовании ВГ и УГ резервные ГА с автономным приводом и средства их автоматического ввода в действие (при наличии) должны находиться в постоянной готовности к действию.

Обеспечить на электростанциях с ВГ и УГ переход на питание потребителей от автономных ГА по сигналу об отклонении контролируемых параметров ВГ и УГ (частоты вращения, давления пара и др.) от допустимых норм.

При обесточивании судна вахтенный механик (ВМХ) и электромеханик (ЭМХ) должны принять все меры к немедленному восстановлению работы ЭС и включению ответственных потребителей, руководствуясь инструкциями, которые должны быть разработаны су-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

довладельцем для каждого типа судна и вывешены в машинном помещении (ЦПУ).

Старший механик (СТМ) и ЭМХ по вызову лиц вахтенной службы должны немедленно прибыть в машинное помещение и не покидать его до восстановления работы ЭС и устранения причины обесточивания.

При неисправности ГА должны быть приняты меры к немедленному вводу в действие резервного ГА и остановке неисправного.

Если ВГ выведен из действия, но ротор (якорь) ВГ вращается, возбуждение ВГ рекомендуется отключать.

При наличии средств автоматического перевода нагрузки с ВГ или УГ на автономный ГА следует не реже одного раза в год проверять исправность действия этих средств путём имитации отклонении норм параметров, вызывающих автоматический перевод нагрузки (уменьшение частоты тока, понижение давления пара и др.).

Вставки на автозапуск резервных ГА при увеличении нагрузки ЭС рекомендуется регулировать на основе опыта эксплуатации с учетом необходимости сокращения времени одновременной работы нескольких ГА, максимально возможной длительной загрузки первичных двигателей и их технического состояния.

При непосредственной угрозе затопления СЭО должно быть выведено из действия, а резервные ГА сняты с автозапуска.

10.2.2. Ввод в действие генератора для автономной работы

Перед пуском производится тщательный осмотр генератора, при этом необходимо:

- убедиться в отсутствии посторонних предметов на генераторе, вблизи соединительных фланцев, вентиляционных отверстий;
- включить систему принудительной смазки подшипников скольжения, если они имеются и проверить уровень масла в подшипниках скольжения;
- убедиться в отсутствии внутри генератора конденсата и масла (при наличии смотровых лючков);
- проверить состояние щеточного аппарата и контактных колец (коллектора);
- проверить состояние выпрямителей и других вращающихся устройств системы возбуждения;
- проверить исправность защитных заземлений;
- произвести измерение сопротивления изоляции генератора (не менее 0.7 МОм);
- отключить гашение поля;
- отключить элетроподогрев;
- проверить надежность контактных соединений;
- включить независимую вентиляцию и водяную систему воздухоохладителей (при их наличии);
- произвести проворачивание ротора (при наличии валоповоротного устройства).

О готовности генератора к пуску делается доклад вахтенному механику (ВМХ).

После пуска первичного двигателя (ПД) и достижения номинальной частоты вращения необходимо:

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- убедиться в отсутствии постороннего шума и недопустимой вибрации;

- убедиться в нормальной работе щеточного аппарата генераторов постоянного тока и скользящего контакта колец синхронных генераторов;

- проверить отключение выключателя гашения поля (при наличии) синхронного генератора (СГ);

- у генератора постоянного тока (ГПТ) включить цепь возбуждения, регулятором возбуждения (при ручном регулировании) установить напряжение генератора номинальным, при наличии автоматического регулятора напряжения (АРН) уставкой установить номинальное напряжение;

- убедиться, что СГ нормально возбудился;

- если генератор не возбуждается, необходимо проверить цепь его возбуждения и устранить неисправность, а в случае размагничивания или перемене полярности колец СГ, необходимо подмагнитить генератор;

- при достижении напряжения холостого хода генератора номинального значения, по согласованию с ВМХ, производится подключение генератора на шины главного распределительного щита (ГРЩ) с помощью автоматического выключателя (АВ) генератора;

- нагрузить генератор, поддерживая напряжение и частоту номинальными.

10.2.3. Ввод в действие генераторов постоянного тока для параллельной работы

Необходимые условия - равенство и одинаковая полярность напряжений генератора постоянного тока (ГПТ) и шин ГРЩ. Неравенство напряжений приводит к броску тока, провалу напряжения, перегрузке или переходу ГПТ в двигательный режим и обесточиванию судовой электростанции (СЭС) из-за срабатывания защиты генератора или остановки дизеля. Несовпадение полярности сопровождается крупной аварией ГПТ и ГРЩ.

Включение ГПТ на параллельную работу с работающими ГПТ необходимо производить в следующем порядке:

- подготовить ГА к пуску (выполнить операции, перечисленные в параграфе 10.2.2. при пуске одиночного ГА);

- доложить ВМХ о готовности генератора к пуску;

- после пуска ПД и достижения номинальной частоты вращения установить напряжение (ЭДС) генератора на 2…3 В больше, чем напряжение на шинах ГРЩ;

- подключить ГПТ на шины ГРЩ.

Далее осуществляется перевод нагрузки малыми ступенями, перевозбуждая загружаемый ГПТ и недовозбуждая разгружаемый ГПТ, а также поочередно воздействуя на серводвигатели реек топливных насосов ДГА, ускоряя загружаемый и замедляя разгружаемый ДГА. Перевод нагрузки контролируется амперметром, при этом напряжение на шинах ГРЩ должно быть неизменным.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

10.2.4. Ввод в действие синхронного генератора для параллельной работы

Анализ известных аварий, происходивших в судовых электроустановках [13] показывает, что сравнительно часты случаи выхода из строя СГ и их ПД по причине возникновения ошибок при включении СГ в параллель, а также в процессе последующего перераспределения нагрузки между ними.

Результаты расчетов, выполненных по материалам отдельных аварийных случаев, показывают, что броски моментов, соответствующих ударным токам, возникающих при ошибках, допущенных в ходе синхронизации СГ, превышали номинальные величины моментов в 15….17 раз [8]. На подобные перегрузки как конструкции СГ так и их ПД не рассчитываются. Не удивительно, что наблюдались случаи выхода из строя систем СЭС.

Очевидно, что ВМХ и ЭМХ должны обладать достаточными знаниями по данному вопросу. Важно, чтобы они имели необходимые практические навыки по выполнению соответствующих операций.

На судах возможны следующие способы включения СГ на параллельную работу:

- точная ручная синхронизация;
- ручная синхронизация через реактор;
- точная полуавтоматическая синхронизация;
- полуавтоматическая синхронизация через реактор;
- точная автоматическая синхронизация;
- автоматическая синхронизация через реактор.

Включение СГ на параллельную работу с работающими СГ необходимо производить в следующем порядке:

- подготовить ГА к пуску (выполнить операции, перечисленные в параграфе 10.2.2 при пуске одиночного ГА);
- доложить ВМХ о готовности генератора к пуску;
- после пуска ПД убедиться в отсутствии постороннего шума, повышенной вибрации;
- проверить отключение выключателя гашения поля.

Порядок дальнейших операций зависит от принятого способа синхронизации.

Точная ручная синхронизация.

- довести частоту вращения включаемого ГА до частоты на шинах ГРЩ;
- довести напряжение (ЭДС) включаемого СГ до величины напряжения на шинах ГРЩ;
- включить средства синхронизации (синхроноскоп);
- по согласованию с ВМХ включить СГ на шины ГРЩ, сообразуясь с показаниями синхроноскопа.

Точная полуавтоматическая синхронизация.

В отличие от точной ручной синхронизации, после доклада ВМХ о готовности и подключения устройства синхронизации генераторов, подключение СГ к шинам ГРЩ осуществляется автоматически.

Точная автоматическая синхронизация.

После подготовки ГА к пуску, пуска и достижения им номинальной частоты вращения включается устройство синхронизации ге-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

нераторов (УСГ). Включение генераторного автоматического выключателя (АВ), подключающего генератор на шины ГРЩ, должно происходить автоматически.

Ручная синхронизация через реактор.

- довести частоту вращения включаемого ГА до частоты на шинах ГРЩ (разность частот не должна превышать 1…1,5 Гц);
- довести напряжение (ЭДС) включаемого СГ до величины напряжения на шинах ГРЩ;
- включить устройство синхронизации;
- включить СГ на параллельную работу через реактор;
- после уменьшения бросков тока и колебаний напряжения (обычно через 3…5 сек) включить АВ генератора (прямое подключение на шины ГРЩ);
- отключить реактор;

Полуавтоматическая синхронизация через реактор.

В отличие от ручной синхронизации через реактор включение АВ генератора происходит автоматически, а отключение реактора - в зависимости от принятой схемы - автоматически или вручную.

Автоматическая синхронизация через реактор.

В отличие от полуавтоматической синхронизации через реактор после подготовки ГА к пуску и достижения им номинальной частоты вращения включение реактора, АВ генератора и последующее отключение реактора должны происходить автоматически.

Самосинхронизация.

В аварийных случаях, как исключение, применяют самосинхронизацию. При этом необходимо:

- частоту вращения невозбужденного генератора довести до надсинхронной (частота генератора на 1…2 Гц должна быть выше частоты работающего генератора);
- генератор подключается на шины ГРЩ при включенном добавочном активном сопротивлении в цепи обмотки возбуждения.

Необходимость добавочного активного сопротивления обьясняется тем, что включение генератора сопровождается скачком тока, приводит к броску потока якоря и ЭДС, наводимой в обмотке возбуждения. Чтобы избежать возникновения перенапряжений и возможного в связи с этим электрического пробоя изоляции обмотки возбуждения, она и замыкается на сопротивление. В качестве такого добавочного сопротивления может использоваться сопротивление гашения поля.

После установления тока якоря обмотку возбуждения необходимо переключить с активного сопротивления на источник постоянного тока. После втягивания СГ в синхронизм с помощью серводвигателя подачи топлива увеличивается активная нагрузка генератора до требуемого значения.

После включения синхронных генераторов на параллельную работу необходимо:

- отключить устройство, применявшееся для осуществления синхронизации;
- убедиться в фактическом отключении реактора после окончания синхронизации;
- включить уравнительные связи между параллельно работающими генераторами, если это не осуществляется автоматически;

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- перераспределить нагрузку между генераторами пропорционально их мощностям.

Перераспределение нагрузки должно осуществляться без перерыва подачи электроэнергии и нарушения режимов работы потребителей, поэтому частота тока и напряжение на шинах ГРЩ должны оставаться неизменными. Операция перевода нагрузки зависит от ее характера. Для перевода активной нагрузки поочередно воздействуют на ключи серводвигателей топливных реек генераторных агрегатов, плавно повышая подачу топлива у загружаемого и понижая у разгружаемого ГА. Перевод нагрузки контролируется по ваттметру.

Неосторожные действия при пониженной подаче топлива в дизель могут вызвать двигательный режим разгружаемого СГ.

Распределение реактивной нагрузки между параллельно работающими СГ происходит автоматически за счет уравнительных связей пропорционально мощности работающих СГ. Если перераспределение реактивных нагрузок отличается от пропорционального на 10% и более, производится подрегулировка коэффициентов статизма АРН потенциометрами реактивных компенсаторов.

10.2.5. Вывод из действия генераторов

Для вывода из действия генератора необходимо:

- разгрузить генератор либо плавно перевести нагрузку на другой генератор, следя за тем, чтобы напряжение и частота тока на шинах ГРЩ оставались неизменными, и не допуская перерыва подачи электроэнергии или перехода отключаемого генератора в двигательный режим, для чего нагрузку отключаемого генератора рекомендуется снизить до 10% по мощности;
- по согласованию с ВМХ отключить автомат генератора;
- снять возбуждение с генератора, полностью введя регулятор возбуждения (при ручном регулировании напряжения) или включив гашение поля (при наличии);
- произвести осмотр генератора.

Экстренный вывод из действия генераторов без предварительной разгрузки и согласования с ВМХ допускается при угрозе несчастного случая, аварии генераторов или пожаре на ГРЩ. О причинах экстренного вывода генератора из действия необходимо немедленно доложить ВМХ, отключить автомат генератора, включить гашение поля (при наличии), произвести запись в машинном журнале. После остановки ПД произвести осмотр генератора.

10.3. Техническое использование гребных электрических установок

Использование гребных электрических установок (ГЭУ) должно выполняться с учетом требований правил технической эксплуатации (общие требования), инструкции по эксплуатации и указаний судовладельца.

Эксплуатация ГЭУ должна производиться квалифицированным, специально обученным персоналом.

При получении распоряжения о подготовке ГЭУ к действию вахтенный электромеханик (ВЭМ) должен:

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- тщательно осмотреть главные генераторы, гребные электродвигатели (ГЭД), агрегаты возбуждения, преобразователи (напряжения, частоты), распределительные устройства (щит электродвижения), пульты управления (ПУ) и посты управления, отключить обогрев электрических машин;

- убедиться в отсутствии воды в льялах помещения гребного электродвигателя;

- измерить сопротивления изоляции всех электрических машин, цепей главного тока, возбуждения и управления ГЭУ;

- проверить в действии совместно с ВМХ системы смазки, охлаждения и вентиляции ГЭУ;

- провернуть валоповоротным устройством ГЭД с разрешения вахтенного помощника капитана (ВП). После проворачивания валоповоротное устройство должно быть разобщено;

- ввести в действие агрегаты возбуждения;

- набрать заданную схему ГЭУ по готовности всех первичных двигателей, электрических машин, РУ и ПУ;

- предупредить ВМХ, вахтенного электрика отделения ГЭУ и другой персонал, находящийся в помещении ГЭД о предстоящем опробовании ГЭУ;

- опробовать ГЭУ в действии из центрального поста управления (ЦПУ) с разрешения ВП при минимальной частоте вращения винтов вперед и назад;

- на судах с ВРШ при пуске и опробовании ГЭУ в действии лопасти ВРШ должны находиться в положении нулевого упора (нулевого шага), опробование следует проводить при номинальной частоте вращения гребных электродвигателей.

- доложить ВП о готовности ГЭУ к работе и передать управление ГЭУ на мостик; ВП должен проверить ГЭУ в действии с мостика и о результатах сообщать ВЭМ;

При использовании ГЭУ ВЭМ обязан:

а) контролировать работу главных генераторов, ГЭД, агрегатов возбуждения, РУ, ПУ и постов управления, систем вентиляции;

б) обеспечивать заданный режим работы ГЭУ и следить за заданной нагрузкой главных генераторов и ГЭД;

в) контролировать показания приборов;

г) следить за средствами сигнализации и в случае появления тревожных сигналов принимать меры к немедленному устранению неисправности; если устранить неисправность без вывода ГЭУ из действия не представляется возможным, сообщить ВМХ и ВП о необходимости ее вывода;

д) контролировать температуры нагрева обмоток электрических машин, а также входящего и выходящего воздуха, вентилирующего электрические машины, которые не должны превышать величин, рекомендованных инструкциями по эксплуатации;

е) контролировать температуру и давление воды и отсутствие протечек в воздухоохладителях;

ж) контролировать давление в трубопроводе смазки подшипников;

з) контролировать температуру нагрева подшипников электрических машин.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Примечание. Порядок контроля по подпунктам е, ж, з определяется должностной инструкцией для лиц вахтенной службы исходя из особенностей эксплуатации конкретной ГЭУ.

и) в установившемся режиме работы ГЭУ делать обход с осмотром
работающего ЭО не менее двух раз за вахту с уведомлением ВМХ;

к) вести электромеханический журнал;

л) следить за чистотой наружных поверхностей ЭО.

Переход на другой режим работы ГЭУ производится ВЭМ только по указанию капитана или ВП по согласованию с ВМХ. В случае неисправности ГЭУ ВЭМ совместно с ВМХ могут перейти на другой режим, предварительно получив на это разрешение ВП с уведомлением старшего механика (СТМ) и старшего электромеханика (ЭМХ). В экстренных случаях ВЭМ действует самостоятельно.

Вывод ГЭУ из действия должен проводиться в последовательности, установленной инструкцией по эксплуатации.

После остановки ГЭУ необходимо:

- измерить сопротивление изоляции всех электрических машин, цепей главного тока, возбуждения и управления ГЭУ;
- произвести осмотр главных электрических машин, преобразователей (напряжения, частоты), устройств возбуждения, распределительных устройств, пультов и постов управления;
- включить электрообогрев электрических машин.

10.4. Техническое использование электроприводов вспомогательных механизмов и устройств

На судах, где штатным расписанием предусматривается электротехнический персонал, подготовка к пуску и пуск электромеханизмов ответственного назначения должны производиться только лицами электротехнического персонала в присутствии вахтенного механика. При подготовке к действию электроприводов насосов, вентиляторов, компрессоров необходимо:

- осмотреть электродвигатель;
- провернуть электродвигатель вручную, если это возможно, следя за тем, чтобы не было заеданий;
- убедиться в технической исправности и готовности к работе пускорегулирующей аппаратуры электродвигателя;
- измерить мегаомметром сопротивление изоляции электродвигателя, пускорегулирующей аппаратуры и питающего кабеля.

Если пуск электродвигателя и приводимого им механизма требует от окружающих внимания, то о пуске такого механизма должно быть сделано соответствующее предупреждение.

Пуск электродвигателей при помощи магнитных станций (пускателей) или при наличии командно-контроллерного (контроллерного) управления независимо от рода тока производится в следующем порядке:

- включить выключатель (автомат) питания и выключатель управления (последний - для электродвигателей, имеющих командо-контроллерное, контроллерное управление);

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- нажать кнопку «пуск» или поставить рукоятку командо-контроллера (контроллера) в положение, соответствующее первой скорости.

Если при этом электродвигатель не будет работать, то необходимо его обесточить и выяснить причину неисправности. Если электродвигатель нормально работает на первой скорости (при командно-контроллерном или контроллерном управлении), необходимо опробовать его работу на всех положениях командо-контроллера (контроллера) и в обоих направлениях вращения.

Пуск асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором путем переключения обмотки статора со «звезды» на «треугольник» необходимо производить в следующем порядке:

- включить выключатель (автомат), подающий питание от судовой сети;

- перевести переключатель из нулевого положения в положение «звезда»;

- после того как скорость электродвигателя перестанет нарастать, перевести переключатель в положение «треугольник».

Пуск асинхронных электродвигателей с фазным ротором с помощью пускового реостата должен производиться в следующем порядке;

- повернуть маховик реостата против часовой стрелки до упора;

- включить выключатель (автомат) питания, плавно повернуть маховик реостата по часовой стрелки до упора, при этом сопротивление пускового реостата полностью выводится из цепи ротора;

- поднять щетки с помощью специального устройства, обмотка ротора при этом должна оказаться замкнутой накоротко.

Пуск электродвигателей постоянного тока с помощью реостата необходимо производить в следующем порядке:

- включить выключатель (автомат) питания;

- плавно поворачивать маховик пускового реостата до тех пор, пока сопротивление реостата не будет выведено полностью;

- при наличии пускорегулирующего реостата установить требуемую скорость вращения электродвигателя изменением сопротивления в цепи параллельной (шунтовой) обмотки возбуждения путем плавного поворота маховика реостата в соответствующее положение зоны «регулирование».

Электроприводы с автоматическим управлением должны быть, как правило, включены на это управление. Переход на ручное управление допускается только при неисправности автоматического управления.

После пуска электродвигателя необходимо убедиться в отсутствии перегрузки (при наличии амперметра), ненормальных шумов в электродвигателе и в подшипниках, искрения под щетками, вибрации.

Во время работы электродвигателя необходимо регулярно следить за:

- нагревом электродвигателя (по термометру, наощупь, по температуре воздуха в воздухоохладителе);

- работой контактных колец (коллектора);

- нагревом подшипников (наощупь или по термометру) и характером их шума;

- работой системы охлаждения электродвигателя (при наличии);

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- отсутствием вибрации электродвигателя.

Остановка электродвигателя при наличии кнопочного управления производится нажатием кнопки «стоп».

Для остановки электродвигателя, имеющего командно - контроллерное (контроллерное) управление, необходимо рукоятку управления установить в нулевое положение, после чего выключить выключатель управления, расположенный на корпусе командо-контроллера (контроллера).

Остановка электродвигателя, работающего в автоматическом режиме, производится путем установки его универсального переключателя в отключенное положение.

Остановку асинхронного электродвигателя, включенного путем переключения обмотки статора со «звезды» на «треугольник», необходимо производить следующим образом:

- установить переключатель из положения «треугольник» в нулевое положение;

- выключить автомат (выключатель) питания.

Остановку электродвигателей, имеющих реостатный пуск, следует производить путем быстрого поворота маховика реостата против часовой стрелки до упора, после чего выключить автомат (выключатель) питания.

10.5. Техническое обслуживание судовых электрических машин

10.5.1 Общие требования по техническому обслуживанию судового электрооборудования

ТО судового электрооборудования должно осуществляться в соответствии с утвержденными судовладельцем планами – графиками технического обслуживания (ПГТО), определяющими номенклатуру, состав, периодичность и трудоемкость работ без вывода судна из эксплуатации.

ТО электрооборудования включает комплекс операций по поддержанию изделия в исправном состоянии при использовании его по назначению в течение всего срока службы.

ТО электрооборудования предусматривает осмотровой, инструментальный контроль и оценку технического состояния изделия или его элементов с выполнением ТО с установленной периодичностью.

Объем и периодичность проведения ТО для конкретного электрооборудования устанавливаются в соответствии с указаниями инструкций по эксплуатации заводов - изготовителей, при отсутствии последних - в соответствии с рекомендациями ПГТО.

График ТО электрооборудования по срокам проведения работ необходимо координировать с графиком предъявления электрооборудования на освидетельствование Регистру.

ТО электрооборудования в зависимости от объема и сроков проведения работ подразделяется на ежедневные осмотры и периодическое ТО.

Ежедневным осмотрам подлежит электрооборудование (основное и резервное) ответственных устройств и механизмов:

1) главные, вспомогательные и аварийные генераторы;

2) гребные электродвигатели;

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

3)щит электродвижения, главный распределительный щит (ГРЩ) и аварийный распределительный щит (АРЩ), а также принадлежащие им трансформаторы;

4) электроприводы рулевого устройства, подруливающих устройств и винта регулируемого шага (ВРШ);

5) электроприводы якорно-швартовных устройств;

6) электроприводы осушительных и пожарных насосов;

7) электроприводы вспомогательных механизмов главной энергетической установки;

8) электрооборудование других устройств и систем, действие которых непосредственно влияет на безопасность плавания, движение судна и управление им.

Ежедневным осмотрам подлежит также электрооборудование механизмов, устройств и систем, выполняющих производственные функции в соответствии с назначением судна (холодильная установка, технологическое и промысловое оборудование и т.п.).

При ежедневных осмотрах должно контролироваться исправное техническое состояние электрооборудования, готовность к действию генераторов и электрооборудования механизмов, предназначенных для работы в автоматических режимах.

ТО электрооборудования должно выполняться силами судового электротехнического персонала с привлечением при необходимости лиц, ответственных за заведование судовыми техническими средствами, или членами судомеханической службы, ответственными за исправное состояние электрооборудования, при отсутствии электротехнического персонала.

Работы по ТО электрооборудования, которые не могут быть выполнены силами судового экипажа, должны выполняться силами базы технического обслуживания судовладельца, специализированными организациями, или специалистами предприятий-изготовителей (фирм) при нахождении судна в порту.

Выполнение работ по ТО электрооборудования должно быть подробно отражено в журнале технического состояния.

Работы по ТО электрооборудования должны фиксироваться в машинном электротехническом журнале.

До начала и после окончания работ по ТО электрооборудования необходимо произвести проверку его сопротивления изоляции.

Работы по ТО электрооборудования должны выполняться с соблюдением требований Правил техники безопасности и Правил пожарной безопасности.

ТО, как правило, должно производиться при снятом напряжении.

Особое внимание следует уделить мерам по предотвращению случайной (ошибочной) подачи напряжения на электрооборудование во время проведения работ по его ТО в обесточенном состоянии.

Изменения, вносимые в штатные схемы и конструкции электрооборудования в процессе эксплуатации судна, должны выполняться с разрешения судовладельца и после согласования с Регистром технической документации.

Все изменения штатных схем и конструкций электрооборудования, произведенные в процессе ремонта, модернизации или переоборудования, должны быть внесены в эксплуатационную документацию.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

10.5.2. Общие положения технического обслуживания судовых электрических машин

Оценка технического состояния СЭМ производится на основании:

– величины сопротивления изоляции;
– температуры нагрева;
– оценки степени искрения;
– оценки шума, вибрации;
– зазоров в подшипниках;
– биения коллектора (колец);
– смещения якоря (ротора) в осевом направлении;
– величин воздушных зазоров;
– состоянии коллектора (колец);
– состоянии подшипников;
– состоянии бандажей;
– состоянии вентиляционных крылаток.

Перечисленные состояния определяются при ТО:

– без разборки;
– с частичной разборкой;
– с полной разборкой.

Во всех случаях ТО необходимо тщательно осмотреть изоляцию машины чтобы выявить:

– нарушения изоляции;
– следы износа;
– следы задевания;
– следы выкрашивания;
– следы отслаивания;
– следы местной выработки;
– изменения окраски и т. д.

10.5.3. Техническое обслуживание генераторов

При ежедневном осмотре генераторов необходимо:

- убедиться в отсутствии посторонних предметов на генераторах, вблизи соединительных фланцев, вентиляционных отверстий;
- проверить уровень масла в подшипниках скольжения;
- убедиться в отсутствии внутри генератора конденсата и масла (при наличии смотровых лючков);
- проверить состояние щеточного аппарата и контактных колец (коллектора);
- проверить состояние выпрямителей и других вращающихся устройств системы возбуждения;
- проверить исправность защитных заземлений;
- убедиться в отсутствии недопустимой вибрации и посторонних шумов, а также повышенного нагрева корпусов и подшипников генераторов, находящихся в работе.

Во избежание наклепа подшипников качения неработающих генераторов необходимо не реже одного раза в неделю поворачивать их роторы (якоря).

При периодическом ТО генераторов в дополнение к перечню операций, выполняемых при ежедневном осмотре необходимо:

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- проверить сопротивление изоляции;
- проверить исправность устройств обогрева;
- убедиться в отсутствии внутри генератора конденсата и масла;
- проверить состояние щеточного аппарата и контактных колец (коллектора), затянуть контактные соединения, переключить полярность контактных колец (при необходимости);
- продуть сжатым воздухом, протереть внутренние части генератора и устройств системы возбуждения бельевой ветошью, смоченной моющим средством;
- очистить воздушные фильтры;
- вскрыть коробки выводов и проверить состояние контактных соединений;
- проверить зазоры между железом статора и ротора (якоря);
- просушить генератор (при необходимости);
- заменить смазку подшипников качения (при необходимости);
- проверить исправность защитных заземлений;
- окрасить наружные поверхности (при необходимости).

Разборку генераторов следует производить в случае крайней необходимости или в установленные планом-графиком сроки.

Сушке подлежат генераторы в случае понижения сопротивления изоляции ниже нормы в результате увлажнения.

Периодическое ТО генераторов следует производить ориентировочно один раз в шесть месяцев, если в инструкции по эксплуатации не оговорено иное.

10.5.4. Контроль и поддержка требуемого уровня сопротивления изоляции судовых электрических машин

Анализ аварий и опыт эксплуатации судовых электрических машин(СЭМ) показывает, что срок их службы в основном определяется сроком службы их изоляции [30,32].

Качество электрической изоляции характеризуется следующими параметрами:

– сопротивлением изоляции;
– коэффициентом абсорбции;
– электрической прочностью.

Так как электроизоляционные материалы обладают хотя и не большой, но вполне определённой проводимостью, то под действием приложенного к изоляции напряжения через неё протекает ток, называемый током утечки. Установившаяся величина этого тока и используется для определения сопротивления изоляции $R_и$ по формуле

$$R_и = U / I_y .$$

На рисунке 10.1. приведены графики изменения сопротивления изоляции $R_и$ и тока утечки I_y в зависимости от времени, прошедшего после приложения напряжения. Так как ток устанавливается не сразу, а через некоторый промежуток времени, то считывание показаний прибора для определения сопротивления изоляции следует производить не ранее чем через 60 с после приложения напряжения.

Предельно допустимые значения сопротивления изоляции СЭМ указываются в стандартах или технической документации.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

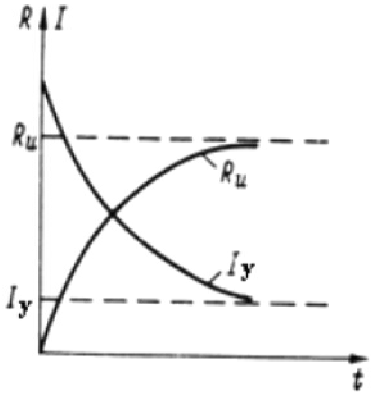


Рисунок10.1. - Характер изменения сопротивления изоляции и тока утечки в зависимости от времени

Правилами [22] для СЭМ мощностью до 100 кВт и напряжением до 500 В величина сопротивления изоляции в период эксплуатации установлена не менее 0,7 МОм. Допустимое значение сопротивления изоляции машин большей мощности и работающих при больших напряжениях, рассчитывают по формуле

$$R_и = 3U/(S+1000),$$

где $R_и$ сопротивление изоляции, МОм; U – номинальное напряжение, В; S – номинальная мощность, кВА (кВт – для машин постоянного тока). При получении значения, меньшего 0,5 МОм, допустимое значение сопротивления изоляции, независимо от расчета, принимается равным 0,5 МОм.

Отмеченное выше свойство изоляции – изменение сопротивления во времени после приложения напряжения, положено в основу суждения о степени увлажнения изоляции по скорости изменения показаний прибора. Изоляция считаетс сухой при коэффициенте абсорбции k_a , равном

$$k_a = {}^{R_{60}}/_{R_{15}} \geq 1{,}3,$$

где R_{60} - показания мегаомметра через 60 с после приложения напряжения; R_{15} - то же через 15 с.

Электрическая прочность изоляции характеризует способность электроизоляционного материала сохранять свои свойства при приложении напряжения и численно выражается значением напряжения, при котором материал разрушается и теряет изоляционные свойства.

Однако следует иметь в виду, что применяемые на практике проверки изоляции обмоток с помощью мегомметров и даже испытания электрической прочности изоляции не дают точной информации о механической прочности изоляции, определяемой, прежде всего, ее тепловым старением.

Из практики известны случаи выхода из строя вследствие витковых замыканий или пробоя на корпус [10] электрических машин, успешно прошедших контроль сопротивления изоляции и выдержавших испытания электрической прочности.

Приборных методов оценки механического состояния изоляции СЭМ в настоящее время не существует. Данная оценка осуществляется визуально и требует от электротехнического персонала достаточно высокой квалификации. При оценке состояния изоляции визуально проверяют внешние лакокрасочные покрытия обмотки: наличие трещин, изломов, следов обгорания, потеков масла и компаунда, изменение цвета лака и эмали.

Во многих случаях изоляцию обмоток, у которых обнаружены внешние повреждения, но сопротивление находится в допустимых пределах, можно восстановить путем перепропитки и нанесением эмали на поврежденные части. В сомнительных случаях производят частичное вскрытие изоляции и оценивают ее эластичность. Если изоляция

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

утратила эластичность, стала хрупкой, при нажатии ломается, трескается или шелушится, то обмотку следует заменить.

Допустимое снижение механической прочности изоляции можно установить, сняв бандажи обмотки и проверив эластичность изоляции под бандажами.

При внешнем осмотре изоляции обмоток необходимо проверить прочность ее закрепления в пазах сердечников статора и ротора (якоря). Обмотки с ослабленным закреплением в пазах подлежат перемотке.

Старение, а затем и повреждение изоляции электрических машин происходят под действием четырех основных факторов – тепловых, электрических, механических и окружающей среды. Каждый из этих факторов влияет на изоляцию по-разному. Обычно тепловое и механическое воздействия являются наиболее активными и поэтому наиболее разрушительными.

Тепло в машине образуется за счет потерь в железе и обмотках. С повышением нагрева изоляции уменьшаются ее механическая прочность и теплопередача; за счет коэффициента линейного расширения меди, изоляции и активной стали, куда вложена обмотка, в изоляционных конструкциях возникают механические напряжения, трещины и разрывы. Сталь сердечника при работе машины нагревается меньше, чем медь обмотки.

От нагрева изоляции происходит тепловое старение, которое вызывает усадку и, как следствие, разрушительную подвижку обмотки в пазах и лобовых частях, катушек главных и дополнительных полюсов. От перемещения секций обмотки в пазах при усадке изоляции во время вращения якорей (роторов), на которые воздействуют центробежные силы, возникает вибрация.

Основным фактором, определяющим срок службы самой изоляции, во многих случая является тепловое воздействие – её нагрев. По этой причине при использовании СЭМ особое внимание должно быть уделено контролю за температурными режимами их обмоток. Заботиться следует о том, чтобы не происходил перегрев их изоляции.

Необходимо ориентироваться на допустимые величины температур нагрева изоляции отдельных элементов машины. Предельно допустимый нагрев электроизоляционных материалов, применяемых в электрических машинах, определяется классами их нагревостойкости (приложение В). Представление о классах изоляции СЭМ оказывается определяющим фактором при решении вопросов эксплуатации электромашин.

Следует знать, что в каждой электромашине могут быть применены одновременно электроизоляционные материалы различных классов. При этом машина в её паспортных данных классифицируется по одному классу. Необходимо учитывать и то, что Правила морских квалификационных обществ ряда стран допускают применение электроизоляции низшего класса для включений в изоляцию СЭМ наряду с её элементами, имеющих более высокий класс. Это нужно иметь в виду, чтобы не допускать необоснованных претензий к фирмам, специализирующихся на производстве и ремонте СЭМ.

Несмотря на то, что формулировки этого допущения в Правилах различных классификационных обществ в определённой мере различны, они абсолютно идентичны по существу и определяют условия обеспечения работы изоляции низшего класса при температурных ре-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

жимах, ей соответствующих. Важно, что никакие изменения механических и диэлектрических свойств изоляции низшего класса не должны подвергать опасности работу машины. Указанное должно быть подтверждено соответствующими расчётами и испытаниями, проведёнными фирмами - поставщиком оборудования.

Оценку технического состояния изоляции СЭМ и режима её работы производят на основе данных о величине и динамики изменения во времени сопротивления изоляции, её увлажнённости, температур нагрева обмоток, а также температур входящего и выходящего охлаждающего воздуха. Оценку также производят на основе визуального внешнего осмотра, определяя степень загрязнения изоляции.

Техническое состояние межвитковой изоляции обмоток, повреждение которых является одной из самых распространённых причин появления отказов в работе электродвигателей, определяют судовые электромеханические или соответствующие береговые службы.

Абсолютная величина сопротивления изоляции зависит от температуры. Она уменьшается примерно вдвое на каждые 18…20ºС увеличения температуры, соответственно, она увеличивается при понижении температуры. Поскольку во многих случаях измерить сопротивление изоляции именно при температуре 70ºС не представляется возможным (за время от остановки машины до момента измерения температура машины успевает снизиться), необходимо делать соответствующий пересчёт. Для обоснования последнего следует, наряду с измерением сопротивления изоляции, производить замер температуры обмотки.

В тех случаях, когда замер сопротивления изоляции обмоток производят при их “холодном” состоянии (например, после длительной остановки машины), за температуру обмотки можно принять температуру окружающей среды. За рабочую же температуру при этом принимают 75ºС.

Номинальное напряжение мегаомметра, предназначенного для измерения сопротивления изоляции, следует принимать в зависимости от величины номинального напряжения обмотки. В настоящее время принято: для обмоток с номинальным напряжением до 100 В применяют мегаомметр на 100 В; с номинальным напряжением до 500 В мегаомметр на 500В; с номинальным напряжением 1000 В мегаомметр на 1000 В; с номинальным напряжением 3000 В и более – мегаомметры на 2500 В.

Недопустимо пользоваться мегаомметром повышенного напряжения по отношению к $U_н$ во избежание возможного нарушения состояния испытуемой изоляции. В связи с этим имеет смысл при использовании на судне, например, двух мегаомметров, рассчитанных на различные напряжения, на лицевой стороне каждого из приборов сделать хорошо читаемую надпись, фиксирующую его номинальное напряжение.

О качестве состояния изоляции СЭМ следует судить не только по абсолютному значению её сопротивления, но так же по характеру изменения этой величины во времени. Соответствующие колебания свидетельствуют об изменении степени увлажнённости обмотки. Существенно, однако, что даже при повышенной влажности изоляции, что весьма опасно в смысле возможного её пробоя, сопротивление – формально – может оставаться в пределах действующих норм. Об этом

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

не следует забывать, поскольку эксплуатация СЭМ с увлажнённой изоляцией сопряжена с аварийными последствиями.

Оценка увлажнённости изоляции. Оценку степени увлажнённости изоляции СЭМ с достаточной для практики точностью производят измерением коэффициента абсорбции k_a, как отношения значений сопротивления изоляции, определённых для двух промежутков времени, истекших после приложения напряжения мегомметра. На отечественных судах в качестве таковых приняты промежутки времени 15 и 60 с.

Коэффициент абсорбции зависит от температуры, причём зависимость эта нелинейна. С увеличением температуры машины величина k_a уменьшается. При температуре в пределах 20…30°С коэффициент абсорбции может достигать величин $k_a = 2{,}0 \ldots 3{,}0$.

При сухой изоляции даже при увеличении температуры машины значение k_a не опускается обычно ниже $k_a = 1{,}5 \ldots 2{,}0$. Для решения вопроса о необходимости сушки машины следует применять норму $k_a \geq 1{,}3$ [30] при температуре обмотки, равной 20°С.

В настоящее время коэффициент абсорбции является практически основным показателем при решении вопроса о необходимости сушки машины, хотя он и не является абсолютным показателем степени увлажнённости ее обмоток.

Поддержание и восстановление состояния изоляции СЭМ. Меры, направленные на поддержание и восстановления качества изоляции СЭМ, в основном сводятся к следующему. В главном их определяют Правила технической эксплуатации судовых технических средств (ПТЭ), принятые судовладельцем.

Сопротивления изоляции судового ЭО в нагретом состоянии, измеренные относительно корпуса судна, должны быть не менее величин, указанных в приложении Б или в инструкциях по эксплуатации.

Измерение общего сопротивления изоляции судовых сетей щитовыми приборами должны производиться не реже одного раза в сутки.

Независимо от ежедневного измерения сопротивления изоляции щитовыми приборами необходимо не реже одного раза в месяц измерить переносным мегаомметром сопротивления изоляции всего ЭО с занесением результатов в журнал учета технического состояния.

Измерения сопротивлений изоляции ЭО, в состав которого входят элементы электроники, необходимо выполнять приборами, рекомендованными инструкцией по эксплуатации конкретного ЭО.

Электрические машины с сопротивлением изоляции ниже нормы должны быть выведены из действия, после чего необходимо принять меры к повышению сопротивления их изоляции. Ввод в действие СЭМ, имеющих сопротивление изоляции ниже нормы, запрещается.

Устройства автоматического контроля сопротивления изоляции должны быть постоянно включены. При срабатывании устройств следует отключать только звуковой сигнал, который сразу после отключения участка с пониженным сопротивлением изоляции должен быть снова включен.

Рекомендуется постоянное включение встроенных электрообогревателей неработающих СЭМ.

Использование аппаратов для поддержания и восстановления сопротивления изоляции СЭМ, основанные на наложении разности по-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

тенциалов между токоведущими частями и корпусом, должно производиться в соответствии с инструкциями по эксплуатации.

Защитные заземления стационарного, передвижного и переносного ЭО должны соответствовать требованиям Регистра и правил техники безопасности на судах. Исправность защитных заземлений должна проверяться во время осмотров и ТО ЭО. Заземляющее контакты рекомендуется зачищать до металлического блеска и смазывать техническим вазелином.

Оценку состояния изоляции СЭМ производят в ходе очередных технических осмотров (ТО). Периодичность проведения ТО определяют инструкции судовладельца. При интенсивном снижении сопротивления изоляции по причине её сильного загрязнения, затопления водой (особенно морской), значительного увлажнения, в связи с попаданием на изоляцию нефтепродуктов, химических веществ, при пробивании изоляции и т.д., меры по поддержанию и восстановлению изоляции должны приниматься вне сроков, указанных в ПТЭ и соответствующих инструкциях. В качестве основных мер по поддержанию и восстановлению состояния изоляции СЭМ применяют: продувку, протирку, промывку, сушку изоляции, а также её восстановление после попадания морской воды.

Продувку машины осуществляют сухим сжатым воздухом под давлением не более 0,2 МПа. При проведении продувки полагается щётки машин предварительно извлечь из щёткодержателей и подвязать. Машины постоянного тока, синхронные и асинхронные с фазным ротором целесообразно продувать со стороны, противоположной щёточному устройству.

Чистка, протирка, промывка СЭМ. В процессе эксплуатации электрические машины загрязняются кондесирующимися на них парами масел, топлива, а также оседающей на поверхности обмоток пылью. Под действием масел и топлива электроизоляционные лаки и эмали размягчаются, их защитные свойства ухудшаются. Но особенно опасна грязь, образовавшаяся от смешивания пыли с маслом. Масло, попавшее на обмотку, разъедает её изоляцию, разлагает компаунд, которым она пропитана, и резко снижает её электрическую прочность.

Запыленность статора и ротора, особенно их вентиляционных каналов, и лобовых частей обмоток резко ухудшает эффективность охлаждения машины. Температура обмоток и активной стали становится выше допустимой. В наиболее тяжелых случаях дело заканчивается тем, что от прогрева изоляции обмотка разрушается.

Кроме нарушения охлаждения, пыль вредна и еще по одной причине. Перемещаясь внутри машины с большой скоростью вместе с воздухом, она стирает наружные слои изоляции, уменьшает ее толщину и снижает электрическую прочность.

Поэтому при эксплуатации СЭМ, в качестве основных мер по поддержанию и восстановлению состояния их изоляции, применяется продувка, чистка, протирка, промывка, сушка изоляции, а также ее восстановление после попадания морской воды.

При любом виде ТО, рекомендуется производить чистку и протирку обмоток. Перед протиркой СЭМ отсоединяется от сети, а на коммутационной арматуре вывешиваются предупреждающие плакаты.

Обмотки протирают чистой сухой ветошью. При необходимости ветошь наматывают на деревянную оправу.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В зависимости от степени загрязнения машины допускается влажная чистка – обмотки протирают ветошью, слегка смоченной бензином. Допускается протирка с помощью кистей или щеток, смоченных бензином или рекомендованной моющей жидкостью.

Влажную чистку любым моющим средством рекомендуется выполнять только при значительном загрязнении машины, когда наблюдается нарастающее и устойчивое снижение сопротивления изоляции и когда продувка не дает должного эффекта.

При выполнении работ следует строго соблюдать правила пожарной безопасности. В помещении, выделенном для протирки на время выполнения работ, должна быть включена вентиляция, а по окончании работ вентиляцию не выключать до полного проветривания помещения. После окончания работ по протирке, машину необходимо продуть сухим сжатым воздухом.

Промывка СЭМ на судне допускается в исключительных случаях, когда машина сильно загрязнена, а чистка и протирка не дает должного результата. Промывка допускается только для малых машин при условии, что это невозможно проделать вне судна.

Промывку рекомендованной моющей жидкостью производят одним из способов: протиркой загрязненных поверхностей ветошью или кистями (ершами), смоченных в ней; струей жидкости под давлением 0,2 МПа в сочетании с протиркой; подачей на обмотки жидкости при помощи пульверизатора или шприца.

Протирку и промывку СЭМ необходимо выполнять рекомендованными моющими средствами [30]: бензином Б-70; Уайт спиртом; смесью топлива ТС-1 и фреона-113 в объемном соотношении 3:1; спиртом; водными растворами щелочных поверхностно активных веществ и т.д. Следует знать, что бензин, спирт, Уайт спирт наряду с моющими качествами обладают и сравнительно сильным растворяющими свойствами, что может неблагоприятно сказаться на состоянии поверхностей плёнки изоляции и её связующих веществ. В силу этого такие средства, по возможности, лучше не применять.

Для целей промывки нередко используют различные соединения хлора: электросол, пероклин и другие, обладающие достаточно высокой растворяющей поверхностью, приемлемой скоростью испарения. Важно, что эти вещества являются практически негорючими. Они, однако, в определённой мере токсичны и это следует учитывать, в частности, при использовании обильно смоченной моющими средствами ветоши. При работе с этими веществами должно быть обеспечено ограничение длительности работы персонала (до 30 минут) с обязательными перерывами.

В судовых условиях наиболее приемлем способ протирки, так как при этом меньше расход моющей жидкости, уменьшается увлажнение обмоток и сокращается продолжительность сушки.

Промывку производят при проведении ТО с частичной или полной разборкой, так как для ее качественного выполнения необходим хороший доступ к обмоткам. Перед началом промывки машину продувают сжатым сухим воздухом. Затем, во избежание попадания грязи на нижние части обмоток, в воздушный зазор вводят прессшпан, края которого должны выступать за лобовые части обмоток. Для сбора отработанной моющей жидкости под станину машины устанавливают поддон.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Промывку выполняют по возможности быстро, чтобы увлажнение обмоток было незначительным. После промывки машину продувают сухим сжатым воздухом, подвергают сушке (операции сушки обмоток машин рассмотрены ниже). Производится замер сопротивления изоляции машины и если она не повысится до 20 МОм, то промывку и сушку повторяют несколько раз. После сушки обмотки пропитывают электроизоляционным лаком, сушат и покрывают эмалью.

Промывку производят с соблюдением всех правил пожарной безопасности и требований промсанитарии. Лица, производящие промывку, должны пройти специальное обучение и инструктаж в соответствии с положением о безопасных приемах и методах работы на морском транспорте.

Внимание! В практике эксплуатации СЭМ наблюдались случаи, когда вследствие обильной пульверизации обмоток бензином Б-70 происходило невосстановимое снижение сопротивления изоляции СЭМ по причине образования спекшихся проводящих мостиков в труднодоступных местах обмоток машины.

Нежелательно применять для чистки и мойки СЭМ высокотоксичные моющие вещества, такие как четырёххлорный углерод и др., поскольку при их использовании на судах даже при соблюдении надлежащих мер безопасности случались тяжёлые отравления работающих.

*Пропитка обмоток***.** При длительной эксплуатации СЭМ происходит естественное старение изоляции. Она теряет свои механические и диэлектрические свойства, становится немонолитной, в ней появляются трещины, точечные поры и капилляры, происходят отслоение изоляции от меди, шелушение эмалевых покрытий, устойчивое снижение сопротивления как в холодном, так и в горячем состоянии. Для восстановления монолитности изоляции, механической и электрической прочности, замедления процесса старения обмотки пропитывают изоляционным лаком и покрывают изоляционной эмалью. Надежность изоляции определяется не только свойствами электроизоляционных материалов, но также качеством пропитки и применяемых при этом пропиточных лаков. Качественная пропитка обмоток изоляционными лаками удлиняет срок службы электрических машин.

Сущность процесса пропитки заключается в удалении влаги из пор изоляционных материалов, их заполнении жидким лаком и его сушке до твердого состояния. В процессе пропитки пропиточным лаком заполняются пустоты и трещины обмотки, поры и капилляры. Происходит цементация витков обмотки между собой, а также витковой и корпусной изоляции, повышаются электрическая прочность и теплоотдача, замедляются процессы теплового разрушения изоляции и ее увлажнения, возрастает стойкость к воздействию агрессивных сред — масла, паров топлива, пыли. После пропитки на поверхность обмотки наносят покровные лаки или эмали для создания дополнительного наружного защитного слоя, предохраняющего внутренние слои изоляции от внешних воздействий и способствующего меньшему загрязнению обмоток.

Процесс пропитки обмоток состоит из следующих этапов: подготовки обмоток к пропитке, сушки до пропитки, про-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

питки, сушки после пропитки, эмалирования, сушки после эмалирования. Перед пропиткой тщательно осматривают обмотки машины и определяют необходимость протирки, промывки и сушки, устраняют обнаруженные дефекты. Осмотр, протирку или промывку, сушку проводят, как было описано выше. Число пропиток определяется условиями эксплуатации машины, состоянием изоляции обмоток и типом выбранного лака. Обычно в судовых условиях пропитку производят не более двух раз.

При выборе лака необходимо стремиться к тому, чтобы новый лак хорошо соединялся со старым, поэтому для пропитки рекомендуется применять такой же лак, которым обмотки были покрыты раньше.

Электроизоляционные лаки представляют собой коллоидные растворы различных пленкообразующих веществ в специально подобранных органических растворителях. Пленкообразующими называются такие вещества, которые в результате испарения растворителей и процессов отвердевания (полимеризации) способны образовать твердую пленку.

К пленкообразующим веществам относятся смолы (природные и синтетические), растительные высыхающие масла, эфиры, целлюлозы и др. В качестве растворителей пленкообразующих веществ применяют легкоиспаряющиеся (летучие) жидкости: бензол, толуол, ксилол, спирты, ацетон, скипидар и др.

Чтобы создать электроизоляционный лак, удовлетворяющий ряду требований, подбирают несколько пленкообразующих веществ, которые составляют основу лака.

Для полного растворения лаковой основы и равномерного высыхания лака иногда приходится применять несколько растворителей. Для разбавления загустевших лаков в них вводят разбавители, которые отличаются от растворителей меньшей испаряемостью. Кроме того, они могут растворять лаковую основу только в смеси с растворителями. В качестве разбавителей применяют бензин, лаковый керосин, скипидар и некоторые другие жидкости.

В состав электроизоляционного лака могут еще входить пластификаторы и сиккативы. Пластификаторы — вещества, придающие лаковой пленке эластичность. К ним относятся касторовое масло, жирные кислоты льняного масла и другие маслообразные жидкости. Сиккативы представляют собой жидкие или твердые вещества, вводимые в некоторые лаки (масляные и др.), чтобы ускорить их высыхание.

При сушке слоя лака, нанесенного на какую-либо поверхность, содержащиеся в нем органические растворители улетучиваются (испаряются), а пленкообразующие вещества в результате процессов полимеризации образуют твердую лаковую пленку. Эта пленка может быть гибкой (эластичной) или негибкой и хрупкой в зависимости от свойств пленкообразующих веществ, составляющих лаковую основу.

По своему назначению электроизоляционные лаки делятся на пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки применяют для пропитки обмоток в электрических машинах и аппаратах с целью цементации (соединения)

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

витков обмотки друг с другом, а также с целью устранения пористости в изоляции обмоток.

Пропиточный лак, проникая в поры изоляции обмоток, вытесняет оттуда воздух и после своего отвердевания делает обмотку влагостойкой. При этом повышается электрическая прочность изоляции обмотки и ее коэффициент теплопроводности. Одной из главных характеристик пропиточных лаков является их пропитывающая способность.

Покровные лаки применяют для создания на поверхности уже пропитанных обмоток влагостойких или маслостойких лаковых покрытий. К покровным лакам также относятся эмальлаки, применяемые для эмалирования обмоточных проводов, а также лаки, применяемые для изоляции листов электротехнической стали в магнитопроводах.

Клеящие лаки применяют для склеивания различных электроизоляционных материалов: листочков слюды (в производстве слоистой слюдяной изоляции), керамики, пластмасс и др. Основное требование, предъявляемое к клеящим лакам, состоит в том, чтобы эти лаки обладали хорошим прилипанием (адгезией) и образовывали бы прочный шов.

Следует заметить, что в практике бывает так, что один и тот же лак может применяться в качестве пропиточного и покровного или в качестве покровного и клеящего.

Все лаки по способу сушки делятся на две группы: лаки воздушной (холодной) сушки и лаки печной (горячей) сушки.

У электроизоляционных лаков воздушной сушки отвердевание пленки происходит при комнатной температуре. К лакам воздушной сушки относятся шеллачные, эфироцеллюлозные и некоторые другие.

У электроизоляционных лаков печной сушки отвердевание пленки возможно лишь при температурах значительно выше комнатной (от 100°С и выше). В лаках печной сушки применяют термореактивные пленкообразующие вещества (глифталевые, резольные и другие смолы), отвердевание которых обусловлено процессами полимеризации, требующими повышенных температур. Лаки горячей сушки, как правило, обладают более высокими механическими и электрическими характеристиками.

По лаковой основе электроизоляционные лаки делятся на смоляные, масляные, масляно-битумные и эфироцеллюлозные.

Смоляные лаки представляют собой растворы природных или синтетических смол в органических растворителях. К смоляным лакам относятся шеллачные, глифталевые, бакелитовые, кремнийорганические и др. Смоляные лаки могут быть термопластичными (поливинилацеталевые, полихлорвиниловые и др.) и термореактивными (глифталевые, бакелитовые и др.).

Масляные лаки представляют собой растворы растительных (высыхающих и полувысыхающих) масел в органических растворителях. К высыхающим маслам относятся тунговое и льняное масла.

Тунговое масло добывается из орешков тунгового дерева, оно быстро высыхает, образуя эластичную влагостойкую пленку. Льняное масло получается из семян льна. Уваренное до определенной плотности льняное масло служит основой масляных лаков.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В масляные лаки обычно вводят сиккативы — вещества, ускоряющие высыхание лаков. Пленки масляных лаков являются термореактивными веществами, т. е. не размягчаются при нагревании.

Область применения масляных лаков в электротехнике весьма ограничена по сравнению со смоляными лаками. Масляные лаки применяют для пропитки электроизоляционных лакотканей, эмалирования обмоточных проводов и как покровные лаки, отличающиеся стойкостью к влаге.

Масляно-битумные лаки представляют собой растворы масляно-битумных смесей в органических растворителях (скипидар, толуол, ксилол и др.). Для этого применяют битумы нефтяные и природные (асфальты). Из растительных масел применяется главным образом льняное масло.

Пленки этих лаков имеют черный цвет. Они обладают хорошими электроизоляционными свойствами, отличаются эластичностью и водостойкостью. Пленки масляно-битумных лаков термопластичны и легко растворяются в минеральных маслах и в ряде растворителей, что является их недостатком. Масляно-битумные лаки широко применяют в качестве пропиточных лаков для обмоток электрических машин.

Эфироцеллюлозные лаки представляют собой растворы эфиров целлюлозы (нитроцеллюлоза, ацетилцеллюлоза и др.) в смеси растворителей (амилацетат, ацетон, спирты и др.). Пленки этих лаков прозрачны, имеют характерный блеск и обладают стойкостью к минеральным маслам, бензину и озону.

Эфироцеллюлозные лаки применяют преимущественно для лакирования хлопчатобумажных оплеток проводов с резиновой изоляцией — для защиты резины от действия бензина, минеральных масел и озона. К металлам эти лаки прилипают плохо. Применение эфироцеллюлозных лаков облегчается тем, что они являются лаками воздушной сушки, но область применения их в электротехнике относительно невелика.

В судовых условиях наиболее приемлема пропитка путем погружения обмоток в лак. Обмотки, подготовленные к пропитке и высушенные при температуре 60…70°С, погружают в ванну, наполненную лаком, и выдерживают до полного прекращения выделения пузырьков воздуха, но не менее 15…30 мин при первой пропитке и 10 мин — при последующих. Якоря и роторы малых электрических машин погружают в ванну вертикально так, чтобы уровень лака на 5…10 мм не доходил до коллектора (контактных колец), или пропитывают их прокатывая в ванне с лаком.

При пропитке якорей крупных электрических машин постоянного тока поднимают верхнюю половину станины. В воздушный зазор. между якорем и нижними полюсами вводят специальную ванну со съемной боковой крышкой. После строго горизонтальной установки ванны закрывают боковую стенку и наливают лак с таким расчетом, чтобы были полностью покрыты обмотки якоря в нижней части. Поворачивая якорь, поочередно выдерживают каждый сектор обмотки в лаке до полного выделения пузырьков воздуха (выдержка в каждом положении должна быть не менее 15 мин). При повороте якоря необходимо следить

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

за тем, чтобы пропитываемый сектор включал в себя не менее 10% поверхности ранее пропитанного сектора. По мере выхода пропитанных участков якоря из нижней половины статора лак удаляют с железа якоря и бандажей ветошью, смоченной растворителем.

После пропитки сливают лак из ванны, медленно проворачивают якорь на 2…3 оборота для удаления остатков лака и вынимают ванну. К сушке приступают через 2…3 ч. после удаления из растворителя ароматических компонентов.

Обмотки статоров при пропитке располагают в ванне под углом 45° к вертикали так, чтобы уровень лака покрывал весь сердечник статора. Обмотки статоров крупных машин, не помещающихся в ванну, пропитывают путем обливания. Статор устанавливают на торец в противень на деревянные подставки и, переворачивая его, поочередно с обеих сторон обливают обмотки лаком, следя за тем, чтобы лак затекал в пазы статора.

После каждой пропитки дают возможность стечь излишкам лака. Затем все места машины, где не должно быть лаковой пленки (поверхности сердечников статора, ротора, якоря, валы, зажимы и т. д.), протирают ветошью, смоченной растворителем, а после сушки с пропитанных обмоток удаляют натеки лака. После этого сушат детали или машину, при этом из пор изоляции удаляется растворитель и происходит запекание лаковой пленки на поверхности изолированных обмоток. При запекании под действием продолжительного нагрева лаковая пленка переходит в нерастворимое и неплавкое состояние. Сушку начинают при температуре воздуха 50…60**°C,** которую постепенно (не более 5°С в час) повышают до температуры, соответствующей классу нагревостойкости изоляции и лака. Кремнийорганические лаки и эмали сушат в два этапа – при низкой и высокой температуре. Низкие значения температур необходимы для удаления растворителей, так как температура запекания лаков и эмалей отличается от температуры, при которой происходит удаление растворителей. Более высокая температура нагрева при удалении растворителей нежелательна, так как это может привести к пористости пленки и ухудшению ее защитных свойств.

В процессе сушки периодически проверяют сопротивление изоляции.

Сушку заканчивают через 2…3 ч. после достижения обмоткой установившегося сопротивления изоляции. Хорошо просушенная после пропитки обмотка должна иметь гладкую блестящую, совершенно не липнущую к пальцам однородную лаковую пленку.

Пропитка (с последующей сушкой) может быть двух-, трех- и шестикратной. Повторными пропитками увеличивают влагостойкость изоляции.

Для защиты лаковой пленки и для придания изоляции повышенной влагостойкости, маслостойкости, дугостойкости, химостойкости и т. д. детали (обмоткодержатели и др.) и пропитанные обмотки покрывают покровными лаками и эмалями.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Покровные эмали наносят дважды на поверхность якоря, ротора и на лобовые части обмоток статора кистью или пульверизатором. После каждого покрытия обмотки обязательно просушивают.

Компаунды - это электроизоляционные составы, изготовляемые из нескольких исходных веществ. В момент применения компаунды представляют собой жидкости, которые постепенно отвердевают.

В отличие от лаков и эмалей компаунды не содержат летучих растворителей. Это обеспечивает монолитность компаунда после его отвердевания. Согласно своему назначению компаунды разделяются на пропиточные, заливочные и обмазочные.

Пропиточные компаунды применяют для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов с целью цементации витков обмотки и защиты их от влаги.

Заливочные компаунды применяются для заливки полостей (свободных пространств) в кабельных муфтах и воронках, а также в корпусах электрических аппаратов - трансформаторов тока, дросселей и т. п.

Обмазочные компаунды применяются для обмазки лобовых частей обмоток электрических машин с целью защиты их от влаги, масла и др.

Компаунды могут быть термореактивными материалами, не способными размягчаться после своего отвердевания, или термопластичными, могущими размягчаться при последующем нагреве. К термопластичным относятся компаунды на основе битумов, воскообразных диэлектриков (парафин, церезин и др.) и термопластичных полимеров (полистирол и др.). К термореактивным относятся компаунды на основе эпоксидных, полиэфирных и других синтетических смол.

Широкое применение в электротехнике получили термопластичные компаунды на основе битумов, так как последние являются дешевыми материалами, стойкими к воде, и обладают хорошими электроизоляционными свойствами.

Одной из главных характеристик компаундов является их объемная усадка - сокращение объема компаунда после его отвердевания. Характеристики некоторых лаков, эмалей, компаундов представлены в приложении Е.

При выполнении работ по пропитке необходимо помнить, что все разбавители и растворители токсичны. Работать с ними следует в специальных камерах с вытяжной вентиляцией и в респираторах. Необходимо строго выполнять правила техники безопасности и противопожарной охраны. Надо твердо помнить, что все растворители и разбавители (кроме метиленхлорида) огнеопасны, а их пары могут образовывать взрывоопасную смесь.

Сушка электрических машин. Сушка СЭМ является неотъемлемой операцией при выполнении любого вида работ по восстановлению сопротивления изоляции, в том числе после транспортировки или длительного бездействия, расконсервации машины. Сушке подвергают электрические машины, если они были залиты водой, отсырели, подверглись обильной мойке водными растворами, а также после пропитки обмоток.

Цель сушки – удалить влагу из обмотки машины. Удаление влаги из изоляции обмотки происходит за счет так называемой термической диффузии, вызывающей перемещение влаги в направлении пото-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ка тепла, т.е. от более нагретой части к более холодной. Перемещение влаги происходит вследствие перепада влажности в разных слоях изоляции: из слоев с большей влажностью влага перемещается в слои с меньшей влажностью. Перепад влажности создается перепадом температуры.

Чем больше температурный перепад, тем интенсивнее происходит сушка. Поэтому, нагревая внутренние части обмотки (например, током), можно создать перепад температуры между внутренними и внешними слоями изоляции и тем ускорить процесс сушки. Температурный перепад можно создать также быстрым периодическим охлаждением наружных слоев изоляции путем периодического продувания холодного воздуха и последующего повторного нагревания. Подобными приемами можно пользоваться при сушке сильно увлажненных обмоток.

Сушка электрических машин в судовых условиях может производиться различными методами: внешним нагреванием, нагреванием током от постороннего источника, током короткого замыкания, потерями в активной стали или корпусе машины и др. В тех случаях, когда одним каким-либо методом не удается получить необходимую температуру сушки или же когда нагрев отдельных
частей получается неравномерным, применяют комбинированный метод сушки,
представляющий собой сочетание двух каких-либо методов.

Выбор метода сушки зависит, главным образом, от местных условий, имеющихся технических возможностей, мощности СЭМ и в некоторых случаях от степени увлажненности изоляции. Наиболее интенсивной сушкой сильно увлажненных обмоток является сушка током, при которой внутренние слои изоляции нагреваются сильнее наружных. Однако сушка током, пропускаемым по обмотке с сильно увлажненной изоляцией, может привести к вспучиванию последней, а сушка такой обмотки постоянным током может оказать и электролитическое действие. Поэтому в подобных случаях рекомендуется сушку производить другими методами, например потерями в активной стали, методом внешнего нагревания и т.д. После предварительной подсушки этими методами можно применить сушку током.

Перед сушкой надо машину осмотреть и продуть сжатым воздухом. Перед сушкой током необходимо проверить все контактные части, а если эта сушка связана с вращением машины, то и зазоры между ротором (якорем) и статором (полюсами) и в подшипниках. Корпус машины следует заземлить. Во время сушки машину надо вентилировать – это ускоряет процесс сушки. Однако слишком сильная вентиляция препятствует нагреванию до необходимой температуры.

Чтобы избежать излишней потери тепла во время сушки, машину следует защищать снаружи от окружающего воздуха, но сохранить при этом вентиляцию, способствующую удалению влаги. Для этой цели машину закрывают щитами или покрывают брезентом и т.п. В наиболее высоком и наиболее низком местах обшивки (или брезента) делают вентиляционные отверстия, обеспечивающие непрерывность вентиляции. В машинах закрытого типа следует открыть смотровые люки (в станине, в щитах и т.п.), а в машинах водозащищенного и взрывобезопасного исполнения с обеих сторон снимают торцевые крышки.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В процессе сушки температуру обмоток и стали измеряют термометрами, установленными в нескольких местах. В машинах с замкнутой или проточной вентиляцией термометры устанавливают также на входе и выходе воздуха. Если внутрь машины заложены температурные детекторы, то ими можно пользоваться вместо термометров.

Температуру обмоток можно определить также по методу сопротивления. Наивысшая температура во время сушки в наиболее горячем месте обмотки или стали не должна превышать: по термометру 80 °С, по методу сопротивления 100 °С, по температурному детектору 90 °С.

При сушке машин с проточной вентиляцией температура выходящего воздуха из машины не должна превышать 65 °С.

В отдельных случаях при необходимости сокращения времени сушки указанные температуры могут быть повышены на 10…15 °С. При современной технологии монтажа статорных обмоток с термообработкой изоляции лобовых частей и деталей крепления статорной обмотки температуру сушки (термообработки) доводят до 120…130 °С.

Нагревать обмотку и сталь нужно постепенно – при быстром нагревании температура внутренних частей машины легко может достигнуть опасного значения, в то время как нагрев наружных частей будет еще незначительным. Кроме того, разница в постоянных времени нагрева и в коэффициентах линейного расширения обмотки и активной стали, а также и конструктивных частей машины может при быстром нагреве послужить причиной повреждений (разрывов) изоляции и механических повреждений станин, роторов и пр.

При сушке крупных машин, например турбогенераторов, скорость нагрева должна быть такой, чтобы температура 50 °С (по термометру) обмотки и стали или температура выходящего воздуха 40 °С были достигнуты не ранее 20…30 ч. с момента начала сушки, а наивысшая температура – не ранее чем через 40…50 ч.

При сушке током необходимая скорость подъема температуры достигается либо постепенным ступенчатым повышением тока, либо временным отключением его. Увеличивать ток надо лишь после того, как температура обмоток установилась.

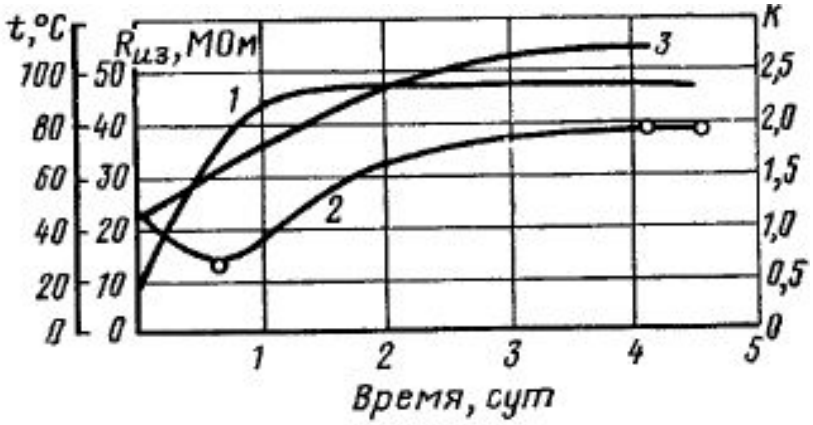


Рисунок 10.2 – Кривые изменения температуры (1), сопротивления изоляции (2) и коэффициента адсорбции (3) при сушке обмоток электрических машин

Во время сушки необходимо также измерять сопротивление изоляции всех обмоток машин, а при сушке током – и значение тока.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В процессе сушки ведут протокол и вычерчивают кривые зависимости сопротивления изоляции и температуры обмоток от времени сушки. Эти кривые облегчают суждение об успешности сушки (характерные кривые сушки приведены на рисунке 10.2).

Измерения производятся в начале сушки через 20…30 мин., а при достижении установившейся температуры – через час. Измерения температуры и сопротивления изоляции продолжаются до полного охлаждения машины. Если машину сушат током, то на время измерения изоляции ток необходимо выключать. В этом случае измерения сопротивления изоляции можно производить каждые два-три часа.

Сушка внутренним нагреванием. Для нагревания этим методом можно использовать различные нагревательные устройства. Простейшим способом сушки внешним нагревом является нагрев лампами накаливания, помещаемыми внутрь статора машины на лист железа или асбеста. Лучше брать две лампы, мощность которых зависит от мощности двигателя, например при мощности двигателя 30 кВт можно взять две лампы мощностью по 300 Вт, для двигателя 75 кВт – две лампы по 500 Вт, для двигателя 110 кВт – две лампы 1000 Вт.

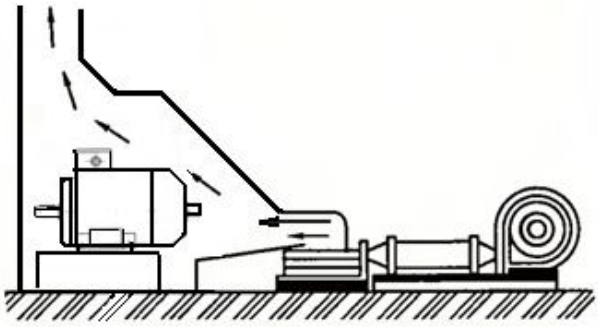


Рисунок 10.3 – Сушка машины с помощью электрокалорифера

Вместо ламп накаливания внешний нагрев может осуществляться также с помощью трубчатых электронагревателей (ТЭН) соответствующих размеров и мощности, устанавливаемых внутрь статора на теплостойкую подкладку. Нагрев машины может осуществляться также струей горячего воздуха от воздухонагревателя, например, электрокалорифера (рисунок 10.3).

Во избежание неравномерного нагревания обмоток горячий сухой воздух направляется на корпус машины, который нагревается и равномерно передает теплоту обмоткам машины, вызывая сушку их изоляции.

Сушка потерями в активной стали статора. Нагревание в этом случае получается за счет создания в активной стали статоров машин переменного тока магнитного потока путем накладывания на статор специальной намагничивающей обмотки, питаемой однофазным током (рисунок 10.4, а). Обмотка охватывает также и корпус статора. Благодаря значительной разнице в магнитных проводимостях корпуса и активной стали в корпус будет ответвляться незначительный поток.

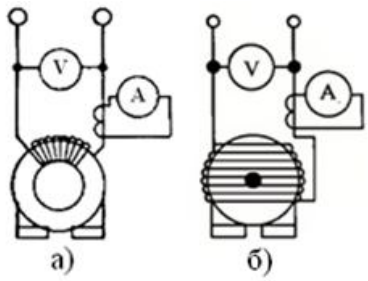


Рисунок 10.4 – Схема подключения при сушке машин индукционным методом

Сушка машин с большим воздушным зазором, например турбогенераторов, может производиться при вынутом и вставленном роторе. В первом случае ротор можно су-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

шить отдельно. Сушка машин с малым воздушным зазором, например асинхронных двигателей, производится при вынутом роторе, так как небольшой зазор в этих двигателях не позволяет поместить намагничивающую обмотку.

При сушке методом потерь в активной стали необходимо соблюдать меры предосторожности. В расточке статора не должно быть металлических предметов, которые могут вызвать замыкание листов активной стали и ее повреждение. При использовании термопар нельзя в процессе переключений замыкать концы двух термопар. В противном случае может образоваться контур, в котором также будет индуктироваться ЭДС, равная ЭДС одного витка намагничивающей обмотки.

Число витков намагничивающей обмотки определяется по формуле

$$w=45U/(SB),$$

где U – напряжение на концах намагничивающей обмотки, В; S – сечение активной стали, см^2; В – индукция, Тл;

$$S=kl_ch_c=k(l-nb)h_c,$$

где k – коэффициент заполнения стали, который для лакированной стали принимается равным 0,95, а для бумажной изоляции 0,9; l_c – длина активной стали статора без вентиляционных каналов, см; h_c – высота активной стали (без зубцового слоя), см; l – полная длина активной стали, см; b – ширина вентиляционного канала, см; n – число каналов.

Индукция B берется обычно в пределах 0,6…0,8 Тл. Для определения тока необходимо вычислить требуемую магнитодвижущую силу:

$$F=\pi D_{ср}H,$$

где $D_{ср}$ – средний диаметр активной стали статора, см; H – напряженность магнитного поля, А/см (на 1 см длина магнитопровода), зависящая от сорта активной стали.

Ориентировочно при слабо- и среднелегированной стали для B = 0,6; 0,7 и 0,8 Тл можно принять H, равным соответственно 1,4; 1,8; 2,2 А/см, а для электротехнической стали – соответственно 2,2; 2,8; 3,7 А/см.

Силу тока определяют по формуле

$$I=F/w.$$

Сушка потерями в корпусе статора.

Этод метод сушки рекомендуется для всех видов электрических машин. Нагревание машины достигается за счет индукционных потерь в корпусе статора от воздействия тока намагничивающей обмотки, наматываемой на корпус и питаемой однофазным переменным током. Для сушки машин крупных габаритов этим способом требуется намотка большого числа витков и нужен источник питания большой мощности, поэтому в этих случаях он не применяется.

Схема включения намагничивающей обмотки дана на рисунке 10.4, б. В качестве источников питания наиболее удобными являются сварочные трансформаторы, дающие низкое напряжение и позволяющие регулировать силу тока.

Намагничивающую обмотку накладывают поверх корпуса, при этом ее можно располагать горизонтально или вертикально. Для более равномерного нагревания рекомендуется при горизонтальном расположении обмотки большую часть витков помещать в нижней половине корпуса. При наличии отверстий в корпусе обмотка может быть про-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

пущена через них. Регулирование температуры нагрева производится периодическим выключением тока.

Мощность, необходимая для сушки (в киловаттах), определяется по формуле

$$P=kF\,(100-t_0)\,10^{-3},$$

где F – площадь поверхности корпуса машины, м^2; t_0 – температура окружающей среды, °С; k – коэффициент, равный $12\cdot10^{-3}$ кВт/м^{2}град.

Число витков намагничивающей обмотки

$$w=UA/L,$$

где U – напряжение, подводимое к обмотке, В; L – длина одного витка, м; A – длина намагничивающей обмотки, приходящаяся на 1В напряжения, подводимого к обмотке.

Величину A находят по таблице 10.1 по величине удельных потерь (в киловаттах на квадратный метр)

$$\Delta P=P/F_0,$$

где F_0 – площадь поверхности корпуса машины, охватываемой намагничивающей обмоткой, м^2.

Таблица 10.1. Исходные данные для расчета параметров намагничивающей обмотки

ΔP	A	ΔP	A	ΔP	A	ΔP	A
0,1	4,21	1,0	1,85	1,9	1,47	2,8	1,27
0,2	3,20	1,1	1,78	2,0	1,44	2,9	1,26
0,3	2,76	1,2	1,72	2,1	1,42	3,0	1,24
0,4	2,48	1,3	1,68	2,2	1,39	3,25	1,20
0,5	2,30	1,4	1,63	2,3	1,37	3,50	1,18
0,6	2,17	1,5	1,60	2,4	1,35	3,75	1,15
0,7	2,06	1,6	1,55	2,5	1,32	4,0	1,12
0,8	1,97	1,7	1,53	2,6	1,31		–
0,9	1,90	1,8	1,49	2,7	1,29	–	–

Ток в намагничивающей обмотке определяется по соотношению

$$I=P/U\cos\varphi,$$

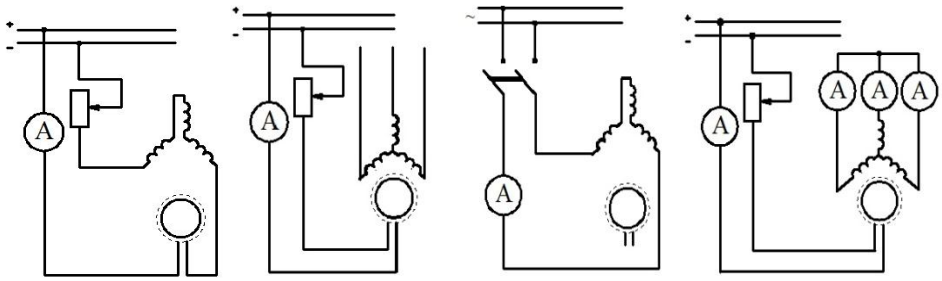
где $\cos\varphi=0{,}5\ldots0{,}7$.

Регулирование температуры производится либо изменением числа витков намагничивающей обмотки, либо ее периодическим отключением. В первом случае нужно сделать одну-две отпайки от намагничивающей обмотки.

Сушка синхронных машин может выполняться одним из следующих способов:

1. Все три фазы и ротор (если номинальный ток ротора близок к номинальному току статора) подключают последовательно к источнику постоянного тока (рисунок 10.5, а). Ток сушки должен быть (0,5…0,7) Iн (Iн – номинальный ток ротора) и его регулируют реостатом либо путем изменения подводимого напряжения. В цепи постоянного тока не должно быть выключателя, так как при разрыве цепи увлажненная изоляция машины может быть пробита. Включение тока производят реостатом.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)



а) б) в) г)

Рисунок 10.5 – Схемы подключения обмоток при сушке синхронных машин

2. Обмотку ротора подключают к источнику постоянного тока соответствующего напряжения; статор прогревается за счет тепла нагретого ротора (рисунок 10.5, б). Регулируют температуру путем изменения тока сушки при помощи реостата. Ток сушки поддерживают в пределах 0,5…0,8 номинального тока ротора.

3. Обмотку статора соединяют в открытый треугольник и подключают к источнику однофазного тока напряжением (0,08…0,2) Uн, где Uн – номинальное напряжение статора. Обмотка ротора разомкнута и сушится теплом статора (рисунок 10.5, в).

4. Сушка в режиме короткого замыкания (рисунок 10.5, г). К отмотке возбуждения подключается разрядное сопротивление через амперметр переменного тока. Обмотки статора замыкаются накоротко через амперметры. Изменением тока возбуждения или частоты вращения первичного двигателя устанавливаются токи в обмотках статора, равные 0,4…0,7 от номинального фазного значения.

При сушке асинхронных двигателей током от постороннего источника применяют следующие способы:

1. Сушка трехфазным током в режиме короткого замыкания. Ротор затормаживают (рисунок 10.5, г). Фазный ротор закорачивают специальной перемычкой (во избежание подгорания колец). Ток сушки должен быть 0,7 $I_н$; следовательно, подводимое напряжения должно быть не более 0,7 напряжения короткого замыкания $U_к$. Если нет заводских данных о величине напряжения короткого замыкания $U_к$, его определяют опытным путем. Для этого к статору при заторможенном и закороченном роторе подводят напряжение Uc, равное 5…10% номинального напряжения, и измеряют ток Ic, потребляемый машиной. Напряжение короткого замыкания будет равно

$$U_к = U_с \frac{I_н}{I_н}.$$

При сушке этим способом необходимо иметь в виду, что ротор в заторможенном состоянии оказывается под действием магнитного поля при частоте сети 50 Гц, тогда как при работе он находится под действием магнитного поля частотой 1…1,5 Гц. Активная сталь ротора и все остальные его части нагреваются значительно быстрее, чем обмотки статора. Поэтому за температурой ротора во время сушки нужно вести особо строгое наблюдение.

2. Сушка постоянным (или однофазным) током.

В судовых условиях этот способ применяют в том случае, когда нет возможности вращать машину и имеется источник низкого напряжения достаточной мощности. Обмотки с выведенными шестью концами присоединяют к источнику тока последовательно.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

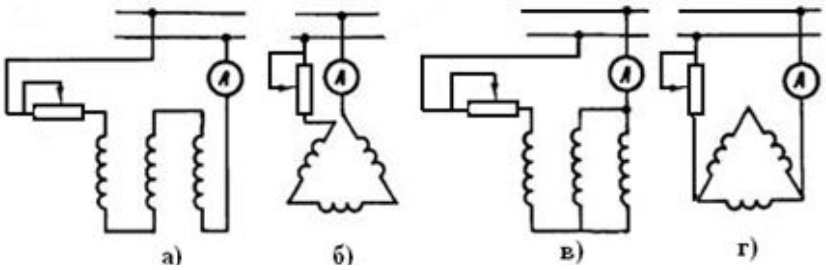


**Рисунок 10.6 – Схемы соединения обмоток статора АД при сушке:
а,б – при наличии шести выводов обмотки;
в,г – при наличии трех выводов обмотки**

Если у обмоток выведены три конца, в процессе сушки фазы переключают через каждые 1,5—2 ч. При этом ротор вращаться не должен. При применении однофазного тока подводимое напряжение должно быть не более 0,2…0,3 номинального напряжения двигателя, а ток сушки—0,5…0,7 номинального тока (рисунок 10.6).

Сушка машин постоянного тока может осуществляться индукционным методом или следующим способом:

1. Сушка при вращающемся якоре. Этод способ сушки выполняется при работе машины постоянного тока генератором в режиме короткого замыкания. Обмотка якоря и добавочных полюсов замыкаются накоротко через амперметр и автомат. Последовательная обмотка

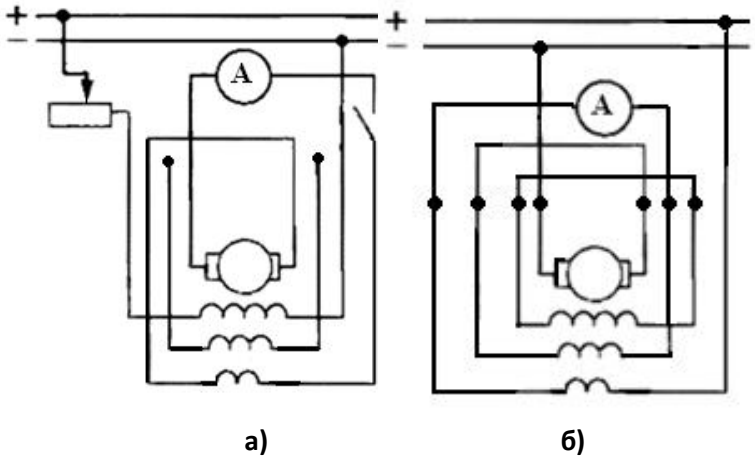


**Рисунок 10.7 – Схема сушки током: а – при коротком
замыкании машин; б – при неподвижном якоре**

возбуждения отключается, а параллельная обмотка возбуждения включается на источник постоянного тока (рисунок 10.7, а).

При разомкнутом автомате в цепи якоря, изменением тока возбуждения параллельной обмотки, устанавливают э.д.с. генератора равной $(0,04…0,1)U_н$. Большие значения э.д.с. устанавливают для машин малой мощности.

Установка требуемой величины тока в якорной цепи после замыкания автомата производится путем регулирования величины тока возбуждения. В начальный период сушки ток в якорной цепи не должен превышать $(0,5…0,7)I_н$. Наибольшее значение тока в якорной цепи определяется температурой нагрева поверхности обмотки якоря, которая не должна превышать 70ºС в наиболее горячей точке. Если темпе-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ратура превысит это значение, то ток в якоре необходимо снизить или производить периодическое его отключение.

1. Сушка при неподвижном якоре. Обмотка якоря соединяется последовательно с обмотками добавочных полюсов и последовательной обмоткой и подключается к низковольтному источнику постоянного тока. Параллельная обмотка возбуждения закорачивается (рисунок 10.7, б). Ток в якорной цепи не должен превышать $(0,5…0,6)I_н$ при напряжении источника $(0,04…0,09)U_н$. Большее значение тока в якорной цепи и напряжения берут для машин меньшей мощности.

Для обеспечения более равномерного нагрева обмоток и коллектора якорь машины необходимо периодически поворачивать, отключая при этом источник.

Для исключения разгона машины ее якорь необходимо надежно затормозить.

10.5.5. Проверка степени нагрева СЭМ

В электрических машинах происходят преобразования механической энергии в электрическую (в генераторах), электрической в механическую (в двигателях) и электрической с одним видом или параметрами в другую (в электромашинных преобразователях).

Все эти преобразования энергии сопровождаются ее потерями, которые превращаются в тепло и вызывают нагрев практически всех частей машины. Нагрев работающих электрических машин, таким образом, является нормальным явлением. В то же время для обеспечения расчетного срока службы машины температура ее нагрева не должна превышать определенных значений. Допустимый нагрев электрических машин определяется классом нагревостойкости изоляции обмоток. Для судовых машин согласно стандарту применяют изоляцию классов в E, B, F, H (см. приложение Б). При работе машины с температурой нагрева обмоток, превышающей наибольшую допустимую для класса нагревостойкости ее изоляции, происходит интенсивное старение изоляции и ее разрушение.

В процессе проверки степени нагрева машины контролируют температуру обмоток, подшипников, активной стали и корпуса машины.

Выявление конкретных причин повышенного нагрева работающей электрической машины является во многих случаях сложной задачей. Это связано с тем, что эти машины, как объект контроля теплового состояния его частей, представляет собой сложную и в то же время „плотную" конструкцию, узлы и детали которой выполнены из материалов с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками. Контролируемые элементы (детали, узлы, сборочные единицы) чаще всего малодоступны, так как практически у всех судовых электрических машин они находятся внутри общего закрытого корпуса. Кроме того, измерение температуры нагрева работающих машин производится в условиях вибрации и магнитных полей.

В связи с этим окончательное установление причин перегрева машин производится при их осмотре в разобранном виде . Во время осмотра машин до разборки проверяют, во-первых, соответствие их теплового состояния допустимым требованиям и, во-вторых, выявляют, насколько это удается, причины этого перегрева. Для электрических машин, ремонт которых предполагается провести в судовых ус-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ловиях, необходимо находить причины перегрева непосредственно на месте их установки.

В общем случае для судовых электрических машин и преобразователей, отработавших определенный срок эксплуатации, могут иметь место следующие причины повышенного нагрева.

Перегрев электрических обмоток прежде всего связан с их замыканиями - короткими и межвитковыми. Для якорных обмоток к этим причинам добавляются также короткие замыкания между коллекторными пластинами или между петушками и хомутиками и обрывы уравнительных соединений. Для последнего случая характерен повышенный нагрев якоря на холостом ходу машины.

Местный нагрев активного железа сердечников статора и ротора (якоря) может быть вызван дефектами изоляции между листами железа.

Причинами повышенного местного нагрева подшипников (подшипниковых узлов) могут быть следующие факторы:

- износ подшипников;
- дефекты сборки подшипниковых узлов (перекос щитов, излишнее поджатие крышками и другие);
- расцентровка якоря (ротора);
- изменение зазоров, предусмотренных для компенсации теплового удлинения вала якоря (ротора);
- старение и загрязнение смазки;
- заниженный или завышенный относительно нормы объем смазки в подшипнике.

Температура подшипников судовых электрических машин в установившемся тепловом режиме при номинальной нагрузке не должна превышать +80 °С для подшипников скольжения и +110 °С для подшипников качения.

При обнаружении перегрева подшипников в первую очередь проверяют состояние их смазки. Если после замены смазки повышенный местный нагрев подшипника (подшипникового узла) не снижается до допустимого, то причины повышенного нагрева и объем предстоящего ремонта определяют по результатам осмотра разобранного узла.

Температуру коллектора машин постоянного тока при осмотре СЭМ обычно не измеряют, а его тепловое состояние оценивают косвенным образом. При перегреве коллектора следует обратить внимание на соответствие марки применяемых щеток, на величину усилия нажатия щеток на коллектор, на состояние поверхности коллекторных пластин.

Поскольку электрические машины являются преобразователями энергии с высоким коэффициентом использования материалов, важную роль для их нормального теплового состояния играет система вентиляции. Поэтому, при перегреве машины прежде всего следует проверить состояние вентиляции. При этом контролируют состояние вентилятора, как насаженного на вал машины, так и независимого (при его наличии), имеющего собственный привод. Вентиляционные каналы машины продувают сжатым воздухом давлением не более 2 кг/см^2. Продувку проводят со стороны коллектора.

При осмотре крупных электрических машин, например синхронных генераторов судовых электростанций, документацией предусматривается контроль температуры воздуха на выходе системы вентиляции машины. Эту температуру контролируют по щитовому тер-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

мометру, например, термометру сопротивления. Предельно допустимая температура выходящего воздуха составляет - +80 °С. Причиной превышения указанного значения может быть засорение воздухоохладителей или другие дефекты системы охлаждения.

При обнаружении перегрева обмоток электрических машин переменного тока следует иметь в виду, что причины этого могут быть связаны не только с дефектами самих обмоток, но и с неудовлетворительным качеством электроэнергии сети, в которую включена машина.

Контроль температуры нагрева электрических машин осуществляют жидкостными термометрами, контактными электротермометрами, а также методом измерения сопротивления обмоток при работе машины.

При использовании жидкостных термометров, прикладываемых к поверхности детали или узла, необходимо обеспечить наилучшие условия теплопередачи от нагретой поверхности к оболочке термометра. С этой целью применяют ленту легко деформируемого станиоля, который имеет высокий коэффициент теплопроводимости. Обернутую этой лентой оболочку термометра прижимают к поверхности проверяемой детали. Деформируясь, станиоль плотно прилегает к поверхности детали. За счет заполнения пространства между оболочкой термометра и поверхностью детали и вследствие увеличения площади соприкосновения улучшается теплопередача.

Измерение температуры проверяется такими термометрами достаточно просто, однако при этом необходимо обеспечить визуальный контроль шкалы термометра, что не всегда удобно при проведении измерений в труднодоступных местах.

Более удобны контактные электротермометры, имеющие отдельный блок с индикатором. Эти приборы обладают небольшими габаритами и массой, малой инерционностью измерения и обеспечивают проведение температурного контроля в труднодоступных точках электрической машины.

Наиболее освоенные промышленностью приборы - термометры сопротивления и термоэлектрические приборы.

В термометрах сопротивления используется явление изменения электрического сопротивления чувствительного элемента датчика от температуры нагрева. В этом термометре чувствительный элемент изготовлен из медной или платиновой проволоки и включен в диагональ измерительного моста. Изменение величины сопротивления чувствительного элемента, возникающее при изменении температуры его нагрева, нарушает баланс моста, контролируемый стрелочным прибором. Стрелка прибора градуирована в градусах пропорционально изменению сопротивления чувствительного элемента от изменения его температуры.

Термоэлектрические термометры в качестве чувствительного элемента содержат термопару, представляющую собой два уложенных рядом разнородных проводника, например, медный и константановый, хромель-копелевый и другие, концы которых с одной стороны спаяны между собой, а два других конца проводников подключают к зажимам измерительного прибора - милливольтметра, гальванометра или потенциометра, градуированных в градусах. При наличии разницы в температуре нагрева спая проводников и их концов, присоединенных к зажимам прибора, в термопаре возникает термоЭДС, пропор-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

циональная указанной разнице температур. При установке спаянного конца термопары в контролируемую точку прибор будет показывать разницу температур контролируемой точки и окружающей среды вокруг зажимов прибора. Термопары имеют малые размеры и поэтому их применяют для измерения температуры практически в самой поверхности. Из всех контактных устройств (жидкостных термометров, термометров сопротивления) термопары наиболее удовлетворяют требованиям измерения температуры - датчик должен хорошо контактировать с контролируемой поверхностью, не подвергаться действию температуры окружающей среды, не создавать в точке контроля изменения температуры вследствие отвода или подвода тепла.

Применение рассмотренных контактных термометров позволяет определить температуру нагрева наружных поверхностей машины. Однако из-за неравномерного распределения температуры по объему машины и ее частей, такой „наружный" контроль нагрева недостаточен. Особенно это касается электрических обмоток.

Известно, что разница между максимальной температурой в середине обмотки и температурой ее наружной поверхности составляет 50...60% и может доходить до 100%. Поэтому при тепловом контроле обмоток рассматриваются средняя и наибольшая температуры их нагрева.

Реальное представление о максимальных значениях температуры нагрева обмоток машин можно получить с помощью термодатчиков, заложенных в обмотки машин при их изготовлении. Такие же термодатчики закладывают и в подшипниковые узлы машин. Встроенными термодатчиками оснащают крупные и особенно ответственные машины и степени их нагрева проверяют по штатным приборам контроля температуры, установленным в пультах управления и на главном распределительном щите. Поскольку регистрируемая при проверке нагрева обмоток температура зависит от используемого метода измерений, при ТО следует применять тот метод, который указан в документации на машину и для которого приведены предельно допустимые значения температуры.

Общепринятые предельно допустимые превышения температуры нагрева отдельных частей судовых электрических машин приведены в Приложении В.

10.5.6. Контроль состояния подшипников качения

Кроме обмотки наиболее уязвимым элементом СЭМ являются подшипники.

Наибольшее применение в СЭМ нашли подшипники качения. Они меньше изнашиваются, чем подшипники скольжения, что особенно важно для машины с малым воздушным зазором, имеют меньшие потери на трение, могут значительное время работать без замены смазки.

В зависимости от воспринимаемой нагрузки подшипники качения подразделяют на радиальные, упорные и радиально-упорные. Радиальные подшипники в основном воспринимают силу, направленную перпендикулярно оси вращения (радиальное усилие). Они могут выдерживать также и небольшие осевые нагрузки, что позволяет использовать их для фиксации ротора от осевых перемещений. Упорные

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

подшипники воспринимают только осевую нагрузку и применяются в основном в машинах с вертикальным валом.

По форме тел качения различают шариковые и роликовые подшипники. Подшипник качения состоит из двух колец - наружного и внутреннего, между ними размешены тела качения - шарики или ролики. Для их равномерного размещения по окружности служит сепаратор. На кольцах со стороны, соприкасающейся с шариками или роликами, расположены дорожки качения, выполненные в виде кольцевых углублений или поясков.

У подшипников при одних и тех же внутренних диаметрах могут быть различны наружный диаметр и ширина, которые определяют серию подшипника и его грузоподъёмность. Различают легкую, среднюю и тяжелую серии.

Условное обозначение подшипника обычно наносится в виде маркировки на торце одного из колец. Условные обозначения подшипников приведены в приложении Ж.

В процессе эксплуатации подшипники контролируют внешним осмотром, периодически выполняется промывка и замена смазки, проверяется нагрев, шум и вибрация.

При проверке качества смазки осматривают камеры наружной крышки и сам подшипник качения, обращая внимание на цвет и качество смазочного масла, степень заполнения им камеры, наличие следов на беговых дорожках и телах качения. Смазку проверяют па содержание металлических и других посторонних включений, сравнивают ее со свежей той же марки. При этом берут из камеры немного смазки, тонким слоем 1…1,5 мм наносят на чистую стеклянную пластинку и просматривают на свет. У чистого масла без наличия примесей цвет будет однородным, без пятен.

Рядом со смазочным маслом, взятым из подшипника, можно нанести слой свежего масла и путем сравнения определить, есть ли какие-либо структурные изменения. При наличии абразивных включений, изменении пластичности и однородности подшипник промывают и осматривают, а смазочное масло заменяют. Совершенно недопустимо применение смесей смазочных масел, так как у них максимальная температура, а часто и механическая стабильность значительно ниже, чем у индивидуальных масел, входящих в смесь. В результате этого смеси быстро разрушаются и вытекают из подшипникового узла. Поэтому перед заменой смазки необходимо тщательно промыть подшипники, полностью удалить отработанное масло и продукты коррозии. При дозаправке подшипника отработанное и избыточное масло удаляют.

Подшипники промывают бензином (с добавлением в последний 6…8 % трансформаторного масла) или спиртом, в крайнем случае – дизельным топливом. Не рекомендуется применять для промывки керосин, так как промытый в керосине подшипник в дальнейшем не удается защитить от коррозии. Если можно, подшипник, насаженный на вал, погружают в ванночку с раствором и вращают его до полного удаления старой смазки и грязи, меняя раствор. Чистый подшипник должен легко и свободно вращаться от руки. Затем подшипник протирают чистой ветошью и тщательно осматривают, обращая внимание на состояние рабочих поверхностей колец, тел качения (шариков, роликов), значения осевых и радиальных зазоров между дорожками качения и

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

шариками (роликами). Исправные подшипники заполняют свежей смазкой.

Количество и тип смазки определяется для каждой СЭМ заводской инструкцией и условиями ее эксплуатации.

В подшипник, насаженный на вал, смазку закладывают со стороны наружной крышки подшипникового узла. Вдавливают смазку гладкой деревянной лопаточкой, прокручивают подшипник рукой до тех пор, пока смазка не появится с его противоположной стороны. Закладывать смазку, а также трогать подшипник голыми руками запрещается. После заполнения подшипника смазкой ротор вручную вращают 2…3 минуты, что улучшает распределение смазки в подшипнике.

В подшипниках качения смазочные функции выполняет лишь тонкая пленка смазки, находящаяся на поверхностях трения. Избыток смазки приводит к нагреву подшипника из-за дополнительных потерь на трение при ее перемешивании. Количество смазки, которое закладывают в подшипник, зависит от его свободного объема, который складывается из пустот в самом подшипнике и подшипниковых крышках и скоростного параметра подшипника. Скоростной параметр равен произведению $d_{ср}n$, где $d_{ср}$ – средний диаметр подшипника (мм), равный полусумме наружного и внутреннего его диаметров, n – частота вращения (об/мин). В быстроходных подшипниках, скоростной параметр которых превышает 100000, заполняют на 1/3 или самое большее на 1/2 свободного объема, при средних и небольших скоростях – от 1/2 до 2/3.

Надежная работа подшипников зависит не только от количества смазки, но и от правильной ее закладки. Смазкой заполняются пустоты в самом подшипнике, остальная ее часть должна образовать защитный слой, который предохранит подшипник от загрязнения. Все щели в уплотнениях и жировые канавки должны быть заполнены смазкой при сборке. Это необходимо потому, что смазка в зазорах уплотнений не перемалывается телами качения, имеет меньшую температуру, чем смазка в самом подшипнике, и лучше сохраняет вязкость, обеспечивая надежное уплотнение.

Периодичность замены смазки в подшипнике зависит от многих факторов: скоростного параметра, нагрузки, рабочей температуры подшипника и оговаривается в инструкции по эксплуатации машины. Для пополнения и замены смазки в подшипниках предусматриваются специальные отверстия для ввода свежей смазки и выхода отработанной. В новых конструкциях электрических машин, например в серии 4А, смазка подается через пресс-масленку, проходит по горизонтальному отверстию в крышке-капсюле и заполняет полость между крышкой и подшипником. Затем проходит через подшипник, попадает в промежуток между смазочным диском и левой стенкой капсюля и выходит через отверстие в нижней части капсюля. Смену смазки производят на вращающейся машине и при снятой заслонке, закрывающей входное отверстие. Вращающийся смазочный диск отбрасывает смазку к выходному отверстию, облегчая ей прохождение через подшипник. Смазку надо подавать постепенно, так как при большом давлении она может выйти через зазоры в уплотнениях. Ее нагнетают шприцем, головка которого закрепляется на масленке. Шариковая пресс-масленка состоит из корпуса, в котором расположен шарик, прижатый пружиной к входному отверстию масленки. Надавливая на шарик, смазка сжима-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ет пружину и проходит через масленку. После смены смазки шарик закрывает входное отверстие.

Контроль за температурой нагрева подшипников качения может осуществляться с помощью ртутных термометров, термометров сопротивления или наощуп.

Повышенный нагрев подшипника может быть вызван его загрязнением, избытком или отсутствием смазки, задеванием вращающихся деталей, а также чрезмерным его износом или разрушением.

Температура подшипников качения для большинства СЭМ не должна быть более 100°С. Обычно температура подшипника превышает температуру окружающей среды не более чем на 30°С, а температуру подшипникового щита на 5…10 °С. При проверке температуры нагрева наощуп нормальный нагрев подшипника обнаруживают сравнением их температур на нескольких однотипных СЭМ. Температуру в этом случае контролируют рукой, прикладывая ее к поверхности щита или крышки вблизи подшипника.

По характеру шумов и стуков в подшипнике при известном навыке можно определить его состояние. Проверку выполняют стетоскопом или длинной отверткой с пластмассовой ручкой. Лезвие отвертки прикладывают как можно ближе к месту установки подшипника, ручку – к уху. В исправном подшипнике слышится легкий равномерный шелест или тонкое жужжание. Свист или резкий звенящий шум свидетельствует об отсутствии смазки или защемлении тел качения. Гремящий шум (частые звонкие стуки) указывает на появление язвин на рабочих поверхностях или попадание в подшипник абразивной пыли. Глухие удары появляются при ослаблении посадки подшипника.

Подшипники качения, как правило, не оснащены аппаратурой для его температурного и вибрационного контроля, поэтому члены судового экипажа имеют ограниченную информацию о состоянии подшипниковых узлов СЭМ.

Однако для повышения ресурса и надежности оборудования, сокращения затрат, связанных с ремонтом и простоями, необходима точная система диагностирования текущего технического состояния подшипников качения. Широкое распространение во всём мире получили методы контроля и диагностики подшипников качения, базирующиеся на измерении параметров вибрации. Обусловлено это тем, что вибрационные сигналы несут в себе информацию о состоянии механизма и подшипников в частности. При этом теория и практика анализа вибросигналов к настоящему времени столь отработана, что можно получить достоверную информацию о текущем техническом состоянии не только подшипника, но и его элементов.

В настоящее время на практике используются четыре метода оценки технического состояния подшипников качения:

1. Метод ПИК-фактора;
2. Метод прямого спектра;
3. Метод спектра огибающей;
4. Метод ударных импульсов.

Рассмотрим подробнее каждый из них.

Метод ПИК-фактора. Для контроля технического состояния подшипников по данному методу необходимо иметь простой виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала:

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- среднеквадратичное значение уровня (СКЗ) вибрации, т.е. энергию вибрации;

- пиковую амплитуду (ПИК) вибрации (положительную, отрицательную или полный размах – значения не имеет).

Отношение двух этих параметров ПИК/СКЗ, называется ПИК-фактором.

В осциллограмме нового хорошо смазанного подшипника присутствует стационарный сигнал шумового характера. С течением времени, по мере появления дефектов на деталях подшипника, в сигнале начинают появляться отдельные короткие амплитудные пики, соответствующие моментам соударения дефектов.

В дальнейшем, с развитием дефекта, сначала увеличиваются амплитуды пиков, потом постепенно увеличивается и их количество. По мере увеличения амплитуд и количества пиков, начинает увеличиваться энергия сигнала, возрастает СКЗ вибрации. Отношение ПИК/СКЗ из-за временного сдвига между ними имеет явно выраженный максимум на временной оси. На этом и основывается метод ПИК-фактора.

Достоинство данного метода – его простота. К недостаткам относятся – слабая помехозащищенность метода и необходимость проводить многократные измерения в процессе эксплуатации. Установить датчик непосредственно на наружной обойме подшипника практически невозможно, поэтому сигнал вибрации характеризует не только подшипник, но и другие узлы механизма, что в данном случае рассматривается как помехи. Чем дальше установлен датчик от подшипника и сложнее кинематика самого механизма, тем меньше достоверность метода. Получить оценку состояния по одному замеру невозможно.

Метод прямого спектра. Для контроля за техническим состоянием подшипников по данному методу необходим анализатор спектра вибрации (виброанализатор).

Метод базируется на анализе спектра вибрации – выявлении периодичности (частоты) появления амплитудных всплесков. Вибрационный сигнал анализируется узкополосным виброанализатором, и по частотному составу спектра можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника. Каждому дефекту на элементах подшипника (тела качения, внутреннее и наружное кольцо, сепаратор), соответствуют свои частоты, которые зависят от кинематики подшипника и скорости его вращения.

Наличие той или иной частотной составляющей в спектре сигнала говорит о возникновении соответствующего дефекта, а амплитуда этой составляющей – о глубине дефекта.

К достоинствам данного метода относятся:

- высокая помехозащищённость (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же частотах, что и дефекты подшипника);

- высокая информативность метода. Возможна оценка состояния элементов подшипника (тел качения, внутреннего и наружного колец, сепаратора), поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

К недостаткам относятся:

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

- метод дорогостоящий, если виброанализатор использовать только для контроля подшипников;
- метод малочувствителен к зарождающимся и слабым дефектам в связи с тем, что подшипники в большинстве случаев являются маломощными источниками вибрации. Небольшой скол на шарике или дорожке не в состоянии заметно качнуть механизм, чтобы обнаружить эту частотную составляющую в спектре. И только при достаточно крупных дефектах амплитуды этих частотных составляющих начинают заметно выделяться в спектре.

Метод используется достаточно широко и даёт хорошие результаты.

Метод спектра огибающей. Для контроля технического состояния подшипников по данному методу необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации.

При появлении дефектов над уровнем линии сплошного фона начинают возвышаться дискретные составляющие, частоты которых однозначно просчитываются по кинематике и оборотам подшипника. Частотный состав спектра огибающей позволяет идентифицировать наличие дефектов, а превышение соответствующих составляющих над фоном однозначно характеризует глубину каждого дефекта.

Достоинства метода – высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность.

Недостаток – высокая стоимость, необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации.

Метод очень широко используется в стационарных системах контроля технического состояния оборудования.

Метод ударных импульсов. Метод ударных импульсов основан на измерении и регистрации механических ударных волн, вызванных столкновением двух тел.

Поэтому по амплитудам ударных импульсов можно достоверно диагностировать наличие и глубину дефектов.

Достоинства метода – высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность. Метод прост и дёшев в реализации, существуют простые портативные приборы.

Недостаток – существует одно ограничение, связанное с конструктивным исполнением механизма. Поскольку речь идёт об измерении параметров ультразвуковых колебаний, которые заметно затухают на границах разъёмных соединений, для точности измерений необходимо, чтобы между наружным кольцом подшипника и местом установки датчика находился сплошной массив металла. В большинстве случаев это не вызывает проблем. Метод широко используется, прост и доступен персоналу, обслуживающему оборудование.

Приборы контроля подшипников.

Фирма «Сервис технологических машин» совместно с НПП «Контест» производит и поставляет приборы – анализатор спектра вибрации 795М и тестер состояния подшипников 77Д11. Анализатор спектра вибрации 795М – малогабаритный автономный микропроцессорный виброизмерительный прибор с двойным питанием – от внутренних аккумуляторов или от сетевого блока питания БП-05. Предна-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

значен для измерения и спектрального анализа параметров вибрации, балансировки и наладки механизмов роторного типа.

Прибор позволяет измерять динамические сигналы с последующей их записью в энергонезависимую память, просматривать, анализировать и передавать их в базу данных на персональный компьютер. Прибор может работать как автономный анализатор и как коллектор данных в системе прогнозируемого обслуживания оборудования совместно с программным обеспечением.

Использование прибора обеспечивает объективный контроль текущего технического состояния механизмов, исключающий аварийные остановки, и позволяет технически обоснованно определить необходимые сроки, объем и содержание ремонтных и наладочных работ, контролировать качество их выполнения.

Индикатор вибродиагностический 77Д11 – малогабаритный микропроцессорный прибор, предназначенный для измерения уровня высокочастотной вибрации (31 кГц), создаваемой ударными импульсами в работающих механизмах – позволяет без останова оборудования определять состояние подшипников качения, качество их смазки и монтажа.

Индикатор дефектов подшипников электрических машин ИДП-05 обеспечивает оценку:

- интенсивности вибрации машины;
- износа дорожек и тел качения подшипника;
- качества смазки и установки подшипника;
- нагрева подшипника.

ИДП-05 предназначен для электрических машин мощностью до 400 кВт с частотой вращения от 600 до 6000 об/мин.

При оценке интенсивности вибрации машины индикатор сравнивает среднеквадратичное значение наблюдаемой виброскорости в контролируемой полосе частот с пороговыми значениями и устанавливает факт превышения соответствующего порогового значения.

При оценках износа дорожек и тел качения, качества смазки и установки подшипника принцип работы индикатора основан на сравнении пиковых (максимальных) значений наблюдаемого виброускорения с пороговыми значениями в двух наиболее информативных диапазонах частот. При этом факт превышения соответствующего порогового значения устанавливается по числу импульсов виброускорения относительно этого порогового значения за установленное время измерения.

При оценке нагрева подшипника принцип работы индикатора состоит в сравнении наблюдаемой температуры с пороговыми значениями и установлении факта превышения соответствующего порогового значения.

Для реализации диагностики подшипников качения по спектру огибающей может быть применен анализатор вибросигналов, в котором реализованы функции полосовой фильтрации, детектирования и получения спектра огибающей вибросигнала. Это приборы "СД-11", "СД-12" фирмы "ВАСТ", приборы "ТОПАЗ" и "АГАТ" фирмы "ДИАМЕХ", это приборы "Диана-2" и "Диана-8" и еще ряд приборов. Больших принципиальных различий между этими приборами нет, для диагностики подшипников качения они все пригодны.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

В качестве примера можно привести виброизмерительный прибор ЯНТАРЬ-М (ВУ-043), который стал продолжением популярных надежных виброметров ВУ-032, ВУ-034, ВУ-036. Его использование не требует специальных навыков, в нем впервые реализована функция экспресс-диагностики состояния подшипников качения, позволяющая определить наличие зарождающихся дефектов элементов подшипников, а также дефектов монтажа и износа. В комплекте с прибором поставляются наушники, позволяющие специалистам производить оценку состояния агрегата по шумам.

Широко применяется также малогабаритный виброметр "Vibro Vision" предназначенный для контроля уровня вибрации и экспресс-диагностики дефектов вращающегося оборудования. Он позволяет измерять общий уровень вибрации (СКЗ, пик, размах), оперативно диагностировать состояние подшипников качения. Виброметр регистрирует сигналы в размерности виброускорения, виброскорости, виброперемещения при помощи встроенного или внешнего датчика.

При использовании внешнего датчика, устанавливаемого на контролируемом оборудовании при помощи магнита или с использованием щупа, можно проводить более сложные измерения.

Дополнительными функциями прибора "Vibro Vision" являются определение состояния подшипников качения на основе расчета эксцесса виброускорения и простейший анализатор вибросигналов. Прибор позволяет оценивать форму вибросигнала (256 отсчетов) и анализировать спектр вибросигнала (100 линий).

Вся информация в приборе показывается на графическом экране расширенного температурного диапазона, предусмотрена его подсветка. Прибор может эксплуатироваться при температуре окружающего воздуха от минус 20 до плюс 50 градусов и относительной влажности воздуха до 98%, без конденсации влаги.

10.5.7. Контроль уровня вибрации СЭМ

Вибрация судовых электрических машин относится к важнейшим показателям их качества, ее уровень и характер являются важными показателями технического состояния СЭМ в период эксплуатации, так как зависят от состояния практически всех ее основных узлов.

Вибрация СЭМ может вызвать нарушение всех механических соединений, перегрев подшипников и даже задевание ротором статора.

Вибрация может возникнуть по самым разнообразным причинам механического и электромагнитного характера.

Механические причины. К причинам механического характера относятся:

– неуравновешенность вращающихся частей;

– смещение обмотки фазного ротора вследствие слабой её бандажировки (наблюдается чаще у быстроходных двигателей) или ослабления обмотки в пазах, вследствие усыхания изоляции;

– нарушение центровки агрегата при соединении двигателя с приводимой машиной при помощи муфты;

– ослабление посадки вращающихся частей на валу, например, ротора, полумуфты;

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

– дефекты соединительной муфты: неправильная насадка на вал (с перекосом), биение одной или двух полумуфт, неправильная установка пальцев или их износ (в пальцевой муфте);

– дефекты в зубчатой передаче;

– искривление вала, овальность шеек вала;

– слишком мал или слишком велик зазор между шейками вала и вкладышами;

– слишком низкая температура входящего масла (у машин с принудительной смазкой под давлением);

– недостаточно прочное закрепление машины на фундаменте, ослабление затяжки болтов, крепящих подшипниковые щиты к корпусу;

– недостаточная жесткость подшипниковых щитов, фундамента в целом или отдельных его частей;

– колебания фундамента или металлической конструкции, на которой установлен двигатель, вследствие передачи вибраций от соседних машин, или же передача вибраций от других машин агрегата при жёстком их соединении;

– резонансные явления, спровоцированные возмущающим влиянием элементов судна (таких как дизель, гребной винт, системы управления), генерирующие крутильные и аксиальные колебания элементов линии вала.

Кроме указанных причин, вибрации могут появиться из-за повреждения подшипников качения.

Неуравновешенность вращающихся частей устраняется путём их искусственного уравновешивания- балансировкой, т.е. установкой дополнительного груза определённого веса в соответствующих точках торцевых частей ротора.

Признаками ослабления посадки вращающихся частей (ротора, полумуфты) на валу служит появление на посадочных местах налётов ржавчины (из-за контактной коррозии), а также возрастание вибрации с течением времени, что объясняется прогрессирующим характером неисправности. Значительное ослабление посадки может быть установлено по покачиванию деталей на валу при нажатии на них.

Влияние увеличенного зазора между шейками вала и вкладышем на вибрацию двигателя особенно сказывается у быстроходных машин. При большом зазоре (в верхней части вкладыша) происходит «наползание вала». Вал при этом приподнимается, вследствие вязкости тонкого масляного слоя (масляного клина) между валом и вкладышем, и снова падает под действием собственного веса ротора. Это явление периодически повторяется. Число возникающих при этом колебаний не совпадает со скоростью вращения ротора, обычно оно значительно меньше. Колебания зависят от величины зазора во вкладыше, массы ротора, неуравновешенности последнего, даже незначительной, и вязкости масла, а так как вязкость сильно зависит от температуры, то также и от температуры масла. Поэтому, если после искусственного повышения температуры масла вибрации уменьшаются или совершенно исчезают, можно с уверенностью сказать, что причиной вибрации является слишком большой зазор между шейкой вала и вкладышем. В таких случаях следует по возможности уменьшить зазор во вкладышах в вертикальном направлении.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

После уменьшения верхнего зазора во вкладыше часто наблюдается повышение температуры масла и подшипников. В таких случаях необходимо несколько увеличить боковые зазоры.

Необходимо также обратить внимание на то, чтобы в разъемных подшипниках верхний вкладыш плотно прижимался крышкой подшипника, так как при наличии зазора между вкладышем и крышкой подшипника вибрация вала будет продолжаться, несмотря на уменьшение зазора во вкладыше.

Нормальные зазоры в неразъемных вкладышах подшипников указаны в таблице 10.2.

Таблица 10.2. Размеры зазоров в неразъемных вкладышах подшипников

Диаметр вала, мм	Верхний зазор (вертикальный) при числе об/мин		
	До 1000	1000-1500	Свыше 1500
	Пределы, мм		
18-30	0,04-0,093	0,060-0,130	0,140-0,280
30-50	0,05-0,112	0,075-0,160	0,170-0,340
50-80	0,065-0,135	0,095-0,195	0,200-0,400
80-120	0,080-0,160	0,120-0,235	0,230-0,460

Размеры верхних вертикальных зазоров в разъемных вкладышах подшипников указаны в таблице 10.3.

Таблица 10.3. Размеры верхних вертикальных зазоров в разъемных вкладышах подшипников

Диаметр вала, мм	Пределы верхних зазоров, мм	Диаметр вала, мм	Пределы верхних зазоров, мм
50-80	0,15-0,20	180-260	0,35-0,45
80-120	0,20-0,25	260-360	0,45-0,55
120-180	0,25-0,35		

В подшипниках с принудительной смазкой верхние зазоры обычно находятся в пределах 0,25-0,40% от диаметра шейки вала, а в некоторых случаях доходят до значительно больших величин.

В подшипниках качения рекомендуется не допускать увеличения зазора свыше:

0,1 мм для валов диаметром…… до 25 мм
0,2 мм » » » до 100 мм
0,3 мм » » » выше 100 мм

Зазор в подшипниках качения может быть измерен щупом, для чего пластинка его вводится между элементами качения (шарики, ролики) и наружным кольцом в ненагруженной части подшипника.

Электромагнитные причины. К электромагнитным причинам вибраций относятся:

- короткие замыкания или неправильные соединения в обмотках статоров;
- обрыв в стержнях ротора или в замыкающих кольцах короткозамкнутого двигателя;
- биение или деформация стали ротора.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Короткие замыкания или обрывы в обмотках статора (несимметрия электрических цепей статора) создают несимметрию магнитной системы машины и приводят к появлению пульсирующего крутящего момента, в результате чего взаимное притяжение ротора и статора становится неравномерным. В спектре вибрации это проявляется в возрастании уровня вибрации на частоте электромагнитных сил как в радиальном, так и осевом направлениях. Кроме того появляются составляющие на зубцовой частоте (количество стержней ротора, умноженное на частоту вращения). Этот дефект может приводить к локальному нагреву корпуса статора и вызвать его деформацию.

При коротких замыканиях в обмотке фазного ротора двигатель может вибрировать в такт со скольжением.

Обрыв стержня ротора приводит к локальному нагреву ротора в месте дефекта и может приводить к его деформации и появлению теплового дисбаланса. Если вовремя не принять меры, то в результате данного процесса возможна остаточная тепловая деформация ротора и его выбраковка.

Дефект проявляется в увеличении вибрации на частоте вращения и частоте действия электромагнитных сил (100 Гц) с боковыми полосами, сдвинутыми друг от друга на частоту, равную частоте скольжения ротора, умноженную на число полюсов. При этом пик боковой полосы на меньшей частоте всегда меньше «зеркального» пика на большей частоте.

Витковые замыкания в обмотках роторов синхронных электродвигателей вызывают вибрацию на тех же частотах, но без боковых полос, так как отсутствует скольжение ротора. Часто на опорах с момента пуска и до стабилизации теплового режима наблюдается постоянный рост вибрации на частоте вращения ротора, так как витковые замыкания из-за локального нагрева и прогиба ротора вызывают тепловой дисбаланс.

Эксцентриситет статора (неравномерный воздушный зазор) чаше всего является следствием некачественного монтажа подшипниковых опор, неплоскостности опорных поверхностей фундамента или тепловых деформаций в агрегате. Это проявляется в возрастании уровня вибрации на частоте электромагнитных сил и на частоте вращения электромагнитного поля в зазоре (частота сети, деленная на количество пар полюсов).

Эксцентриситет внешней поверхности ротора относительно оси его вращения проявляется в увеличении вибрации на частоте вращения и частоте действия электромагнитных сил с боковыми полосами, сдвинутыми друг от друга на частоту, равную частоте скольжения ротора, умноженную на число полюсов. Осевое смещение ротора относительно статора приводит к тому, что осевые силы, стремясь вернуть ротор в нейтральное положение, вызывают значительную осевую вибрацию на частоте питающей сети. Большинство подшипников не предназначены для компенсации осевых усилий и поэтому быстро выходят из строя.

Ослабление прессовки пакета стали ротора ведет к увеличению вибрации на частоте действия электромагнитных сил и появлению зубцовой частоты с боковыми полосами, сдвинутыми друг относительно друга на частоту действия электромагнитных сил.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Основным признаком того, что дефект имеет электромагнитную причину, является мгновенное исчезновение его признаков в спектре вибрации после отключения электродвигателя от сети.

В связи с относительно малым зазором колебания ротора могут вызвать и задевание ротора о статор.

Для устранения биения активной стали ротора его необходимо обточить или отшлифовать наждачным кругом.

Чтобы установить причину вибрации, необходимо обследовать двигатель и идти путём исключения отдельных причин. В процессе обследования рекомендуется быстро отключать двигатель от сети и наблюдать за его вибрацией. Немедленное исчезновение вибрации подшипников или корпуса статора после отключения двигателя при одинаковой величине тока во всех фазах (до отключения) свидетельствует о том, что причиной вибрации является слишком большой зазор между шейками вала и вкладышами, биение стали ротора или короткое замыкание в обмотке фазного ротора.

Если вибрация исчезает немедленно после отключения двигателя, но до отключения величина тока во всех фазах различна и двигатель сильно гудит, то причиной вибрации является короткое замыкание или неправильное соединение в обмотке статора. Если же сразу после отключения двигателя вибрация продолжается и исчезает только после значительного снижения скорости вращения его, то вибрация является следствием механических причин (в том числе и слишком малого зазора между шейкой вала и вкладышем) или же обрыва в отдельных стержнях или в короткозамыкающих кольцах двигателей с короткозамкнутым ротором.

По частоте вибраций во многих случаях можно определить их причину. Если частота вибраций равна двойной частоте вращения, то причиной вибрации является неправильная центровка агрегата, неисправность соединительной муфты или овальность шеек вала.

Если же причиной вибраций является слишком большой зазор между шейкой вала и вкладышем(«наползание» вала), то частота вибраций ниже частоты вращения. При неуравновешенности вращающихся частей частота вибрации соответствует частоте вращения, а отношение амплитуд вибраций при различных скоростях вращения равно отношению квадратов скоростей

Уровень вибрации характеризуется несколькими параметрами: вибросмещением s (мкм), т. е. величиной перемещения точки корпуса машины от положения равновесия, виброскоростью v (м/с) и виброускорением w (м/с^2).

Эти параметры выражаются в логарифмических единицах – децибелах. Логарифмические единици вибросмещения, виброскорости и виброускорения определяются выражением

$$L_x = 20\, Ig\, (x/x_0),$$

где L_x – значение вибросмещения, виброскорости, виброускорения, выраженное в децибелах (дБ); x - значение вибросмещения, виброскорости, виброускорения, выраженное в натуральных единицах(м), (м/с), (м/с^2) соответственно; x_0 – нулевой уровень вибросмещения, виброскорости, виброускорения.

Проверка вибрации СЭМ и оценка полученных результатов требуют тщательной подготовки измерительной аппаратуры и точного соблюдения правил ее применения.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Наиболее простыми в обращении приборами для проверки вибрации СЭМ являются механические ручные вибрографы типа ВР – 1А и виброметры типа ВА – 1. Кроме измерительного устройства в этих приборах имеется записывающее устройство.

Широкое применение получил анализатор спектра вибрации 795М. Основные технические характеристики прибора ставят его в ряд современных диагностических средств, а высокая разрешающая способность позволяет точно выявить любой дефект на месте эксплуатации. Возможности выполнения многоплоскостной динамической балансировки в собственных опорах, контроль подшипников по огибающей и методу ударных импульсов существенно расширяют возможности использования прибора при ремонте и наладке электродвигателей.

В документации на СЭМ указываются предельно допустимые значения уровня вибрации. При этом указанные значения могут задаваться для разных виброхарактеристик - вибросмещения, виброскорости или виброускорения. В частности, для машин, поднадзорных Регистру, задаются предельно допустимые значения амплитуды вибросмещения.

При проверке вибрации машин в судовых условиях следует учитывать, что на результаты измерения большое влияние оказывает вибрация присоединенных механизмов и корпуса судна. Поэтому наиболее правильное представление об уровне и характере вибрации проверяемой СЭМ можно получить при ее работе без присоединенных механизмов и отсутствии хода судна. Работающие механизмы, расположенные вблизи проверяемой СЭМ, также влияют на результаты измерения вибрации. При невозможности обеспечения указанных условий измерения контролируют уровень помех в точках измерения вибрации проверяемой машины. Уровень помех контролируется на отключенной проверяемой СЭМ и работающих перечисленных выше механизмах.

Ограничения на уровни помех при проверке вибрации СЭМ определяются нормативной документацией.

Следует учитывать также и влияние на вибрацию проверяемой СЭМ качества электроэнергии судовой сети - показателей несинусоидальности и ассиметрии напряжения. Поэтому перед проверкой вибрации СЭМ целесообразно проконтролировать качество электроэнергии судовой сети.

Результаты измерения вибрации могут использоваться не только для проверки ее соответствия нормам, но и для оценки общего состояния СЭМ. В ряде случаев по результатам таких измерений можно еще до разборки СЭМ определить наличие дефектов и неиспрвностей ее основных узлов. Для этого используются методы вибродиагностики.

10.5.8. Контроль состояния коллектора (колец)

Коллектор электрических машин постоянного тока является наиболее ответственным узлом этих машин, а его ремонт – самым сложным технологическим процессом (рисунок 10.8).

Рабочая поверхность колец (коллектора) нормально работающей машины должна иметь блестящий полированный вид, без царапин и следов обгара, иметь красный цвет с фиолетовым оттенком; цвет всех пластин должен быть одинаковым.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

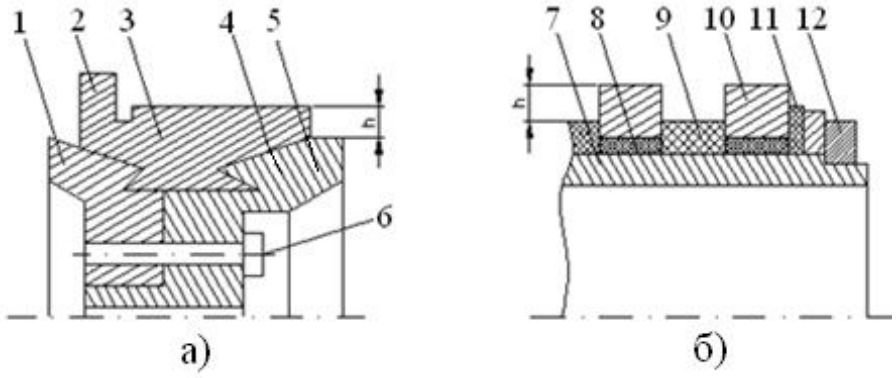


Рисунок 10.8 - Основные узлы коллектора (а) и контактных колец (б): 1 – нажимное кольцо; 2 – «петушок»; 3 – пластина; 4 – манжета; 5 корпус; 6 – болт; 7 – вал; 8,9,11 – изоляционные шайбы и втулки; 10 – контактное кольцо; 12 – нажимное кольцо;

Высветление поверхности коллектора свидетельствует о повышенном износе меди, а светлая полоса чистой меди по всей окружности коллектора указывает на ненормальную работу одной из щеток.

Техническое обслуживание контактных колец (коллекторов) заключается в поддержании их в чистоте и предохранении от износа. Особенно вредна для коллектора (колец) металлическая и угольная, проводящая пыль, которая, смешиваясь с попавшим на контактные поверхности маслом, образует грязь и вызывает искрение.

При эксплуатации СЭМ по мере необходимости, пользуясь сухой бельевой ветошью (применяя безопасные методы), следует удалять с колец (коллекторов) угольную пыль, следы копоти и нагара. Влажная очистка при вращающемся роторе (якоре) запрещена. Для влажной чистки СЭМ необходимо остановить и отключить, а защитные конденсаторы разрядить на «корпус».

Основной задачей ухода является обнаружение и устранение начинающегося разрушения контактной оксидной пленки. Она состоит из окислов меди с примесью частиц угля или графита. Пленка образуется вследствие электролитического процесса при длительной работе коллекторов и контактных колец под нагрузкой с безыскровой коммутацией и нормальной влажности окружающего воздуха. Оксидную пленку называют также политурой.

Цвет этой пленки определяется маркой меди и щеток, плотностью тока, влажностью и составом охлаждающего воздуха. При осмотре важно не повредить политуру коллектора, т.к. для ее восстановления требуется от нескольких часов до суток непрерывной работы машины. Для удовлетворительного состояния коллектора необходимо, чтобы цвет политуры всех пластин был одинаковым.

По цвету политуры можно в некоторой степени оценить состояние коллектора. Если на коллекторе по краю пластин наблюдаются полосы более темного цвета, чем самого коллектора, пластины в местах этих полос шероховаты на ощупь, то это свидетельствует о наличии выступающих или западающих пластин. Темные полосы подгара, особенно на середине пластин, вызываются подпрыгиванием щеток на выступающих миканитовых прокладках.

Если на коллекторе наблюдается чередование темных и светлых пластин (чередование через удвоенное полюсное деление машины), то это свидетельствует об ухудшении паяных соединений якоря. Отдель-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ные темные пятна неопределенной формы на коллекторе указывают на возможную повышенную вибрацию якоря из-за износа подшипников или других механических повреждений. Если темные пята имеют вытянутую по направлению вращения форму, то это может быть результатом ослабления нажатия щеток или загрязнения коллектора маслом.

Основные эксплуатационные дефекты коллекторов следующие:

- износ коллекторных пластин;
- изменение геометрически правильной формы рабочей поверхности;
- обгорание пластин, поломка петушков;
- замыкание коллекторных пластин между собой, на корпус и пробой манжет на корпус;
- ослабление опрессовки пластин;
- замасливание и загрязнение миканитовых прокладок и манжет.

Проверка коллектора и контактных колец заключается в осмотре доступных поверхностей и контроле их геометрических размеров. Проверку сопротивления изоляции и состояния паяных соединений производят при проверке якорной обмотки.

Для удаления небольших шероховатостей и неровностей размером до 0.2 мм кольца (коллектор) полируют с помощью колодки из бука или дуба, пригнанной по их поверхности. При номинальной частоте вращение ротара (якоря) колодку прижимают к кольцам с одновременным возвратно-поступательным перемещением ее по оси колец. Затем кольца протирают брезентом или войлоком, наложенным на поверхность колодки.

Кольца (коллектор) шлифуют только тогда, когда на их поверхности появляются следы почернения, обгара, кольцевые неровности, шероховатости размером до 0.5 мм, вызывающие возрастающие искрение под щетками. Шлифовку производят на ходу машины: для генераторов – при поднятых щетках и снятом возбуждении; для электродвигателей – без нагрузки или с минимально возможной нагрузкой. Перед шлифовкой лобовую часть обмотки обклеивают бумагой или отсасывают пыль пылесосом и выдувают ее струей сжатого воздуха в сторону от обмоток.

Для шлифовки можно использовать абразивное стеклянное полотно или бумагу с зернистостью № 5 – 12, закрепленные в специальных колодках. Необходимо помнить, что шлифовка без применения колодки недопустима, так как при этом могут возникнуть завалы на краях коллекторных пластин. Вследствие этого уменьшается площадь контакта щетки с пластиной и ухудшаются условия коммутации. Ширина бумаги и колодки должна быть равна суммарной ширине контактных колец и воздушного промежутка между ними (длине коллектора).

Для сбора пыли рекомендуется стеклянную бумагу слегка смазать чистым вазелином. После шлифовки кольца (коллектор) полируют описанным выше способом. Не рекомендуется производить шлифовку при нахождении судна в тропической зоне.

Если контактные кольца (коллектор) имеют более серьезные повреждения – эксцентричность более нормы, повышенное биение, измеренное с помощью индикаторов, неустраняемые шлифовкой по-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

верхностные дефекты (выгорание, неравномерный износ и т.п.) – коллектор должен быть проточен.

Для измерения биения коллектора индикатор должен быть установлен так, чтобы наконечник его касался щетки, заложенной в щеткодержатель. Из щеток должна быть выбрана та, которая хорошо притерта к поверхности коллектора. Индикатор должен быть поставлен так, чтобы его стержень был утоплен на 2….3 мм. Якорь приводится в медленное вращение от руки, и ведется наблюдение за перемещением стрелки по шкале индикатора.

Разность между крайними показаниями стрелки индикатора является величиной биения вращающейся части.

Более точные показания может дать установка наконечника индикатора непосредственно на коллектор.

Для того чтобы наконечник не провалился между коллекторными пластинами, на конец его навинчивается пластинка небольшого размера.

Если поверхность коллектора или контактных колец имеет правильную цилиндрическую форму, но смещенную с оси, то стрелка индикатора при вращении ротора достаточно плавно колеблется между двумя своими крайними положениями.

Если правильность цилиндрической поверхности нарушена провалами или выступами, стрелка индикатора имеет неспокойный ход толчками.

При измерении биения коллектора или контактных колец крупной электрической машины индикатор устанавливается сверху или снизу, так как результат измерения биения сбоку искажается вследствие покачивания шеек вала во вкладышах подшипников во время медленного вращения.

Проточка – очень ответственная операция, требующая от исполнителей большого внимания и мастерства, т. к. снижает механическую прочность коллектора. К ней прибегают только в случае биения и значительного нарушения коммутации. Возможность проточки определяют по заводской отметке на торце коллектора или колец. Если такая отметка отсутствует, то возможность проточки определяют путем сравнения результатов подсчета припуска с номинальным диаметром коллектора.

Припуск можно определить по формуле:

$$\varepsilon_к = 0{,}5\sqrt{D_k},$$

где D_k - диаметр коллектора, мм.

Для электрических машин значение припуска принимают в зависимости от диаметра коллектора по таблице 10.4. [10].

Проточку коллектора (колец) производят на токарном станке. У крупных генераторов разрешается производить проточку на месте без выемки якоря (ротора) при отключенной цепи возбуждения. Суппорт на корпусе машины при этом во избежание вибрации должен быть надежно закреплен.

Перед проточкой коллектор следует нагреть до 80…90^{o}С и проверить затяжку болтов подшипниковых щитов. Затяжка считается законченной, если болты не поддаются дальнейшему обжатию и при постукивании не издают дребезжащего звука. После охлаждения коллектора затяжку проверяют вторично. Проточку коллектора выполняют только в холодном состоянии.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Лучшие результаты дает использование для проточки алмазного резца. Рекомендуемая скорость резания при проточке 1…2,5 м/с, подача за один оборот 0,05…0,1 мм и глубина резания 0,05…0,15 мм.

После проточки миканитовую изоляцию фрезеруют (продороживают) на глубину 0,7…1,5 мм (рисунок 10.9). Продороживание коллектора производится фрезой на специальном станке или ножовочным полотном, при этом толщина фрезы и развод ножовочного полотна должны быть равны ширине паза.

При продороживании приспособление с ножовочным полотном (рисунок 10.9 ,в) надо водить по линейке, уложенной параллельно краю пластины коллектора.

Таблица 10.4. Допустимые величины износа коллектора и контактных колец

Диаметр коллектора и колец, мм	Контролируемая величина h, мм (см. рисунок 10.8)	
	коллектора	колец
100	2,5	3
100 – 150	3	4
150 – 200	3,5	45
200 – 250	4	5
250 – 300	4,5	6
300 - 350	5	-

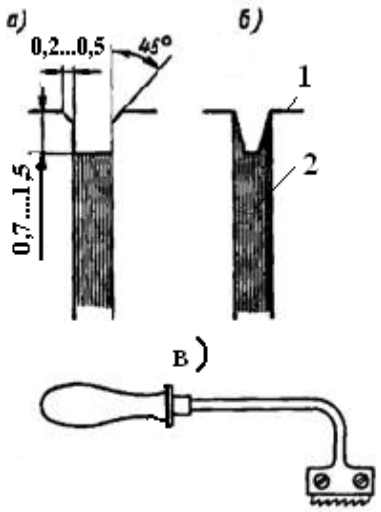


Рисунок 10.9 - Продороживание коллектора
а – правильная продорожка;
б – неправильная;
в – приспособление для продороживания;
1 – коллекторная пластина;
2 – миканитовая изоляция

Фаски с кромок пластин коллектора снимают острым ножом, изготовленным из ножовочного полотна. Величина фаски должна быть порядка 0,2 мм с углом 45°.

Чрезмерно большие, а также неравномерные фаски могут ухудшить коммутацию.

Продороживание производится также при выступании миканита над пластинами. Миканитовые прокладки коллектора тверже медных пластин, поэтому в процессе работы они меньше истираются и постепенно выступают над поверхностью пластин.

После продороживания все канавки между пластинами коллектора прочищают волосяной щеткой.

Для уменьшения вероятности переброса дуги по коллектору концы коллекторных пластин разделывают шабером, скругляя их. Затем производят окончательную зачистку заусениц, шлифовку и полировку. После окончания всех операций по обработке коллектора (колец) машину прочищают и продувают сжатым воздухом со стороны, противоположной коллектору.

Чтобы контактные кольца ротора синхронных генераторов изнашивались равномерно, следует периодически менять их полярность (примерно через 1000 ч работы). Перед сменой полярности с поверхности щеток удаляют вкрапления частиц металла.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

10.5.9. Проверка щеточного аппарата

Надежная работа электрических машин, имеющих щеточный аппарат, в значительной степени зависит от его технического состояния, надежности скользящего контакта между щетками и поверхностью коллектора или колец.

В процессе эксплуатации СЭМ следят за тем, чтобы:

- максимальное биение коллектора по всей его длине не превышало допустимых величин;
- нажатие пружин щеткодержателя на щетки было по возможности одинаковым в течение всего периода работы щеток;
- щеткодержатели и наконечники токоведущих проводов щеток были прочно закреплены;
- контактные поверхности щеток находились в зеркально-гладком состоянии;
- изоляционные втулки траверсы были чистыми, без «пылевых мостиков» и трещин;
- щетки свободно передвигались в обойме щеткодержателя, но не имели излишней слабины;
- зазор между щеткой и стенкой обоймы щеткодержателя должен соответствовать требованиям завода-изготовителя (нормальный зазор между щеткой и обоймой составляет 0,2 … 0,3 мм);
- зазор между нижней кромкой обоймы щеткодержателя и поверхностью коллектора (контактных колец) допускается в пределах 1,0 … 4,0 мм в зависимости от типа машины и диаметра коллектора (колец) (рисунок 10.10);
- щетки у машин постоянного тока находились строго на линии геометрической нейтрали;
- токоведущие провода были надежно закреплены в теле щеток и не имели повреждений отдельных жил;
- степень искрения щеток не превышала допустимого класса коммутации.

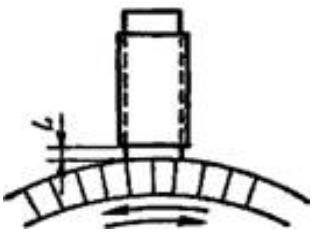


Рисунок 10.10 - Установка щеткодержателя

Во время эксплуатации в щеточном аппарате могут износиться или обгореть щетки и обоймы щеткодержателей, сломаться или ослабнуть нажимные пружины, перегореть или оборваться жгутики щеток, загрязниться щеточные пальцы, сломаться стягивающие ушки траверс, износиться резьба в ушке и пальцедержателях, появиться трещины в ободе траверсы, самопроизвольно переместиться траверса или бракет.

Правильное положение щеток зависит от правильной установки траверсы и щеткодержателей. Последние нужно устанавливать на пальцах траверсы или бракетах так, чтобы ось расположения щеток была параллельна оси коллектора. Этого можно достигнуть, если одинаковые щеткодержатели установить по линейке, расположенной параллельно оси коллектора.

Установка радиальных щеткодержателей не зависит от направления вращения якоря. Установка реактивных щеткодержателей (наклоненных к вертикали под углом 30…40^{o}) зависит от направления вращения якоря. При правильной установке острый край щетки на-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

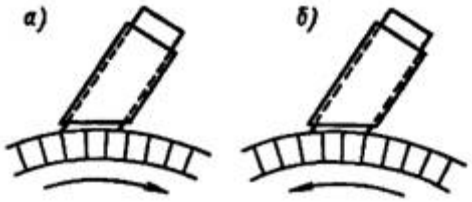


Рисунок 10.11 - Правильная (а) и неправильная (б) установка реактивного щеткодержателя

правлен против направления вращения, т.е. этот край является набегающим (рисунок 10.11).

Наклонные щеткодержатели (с углом наклона порядка 15^{o}) устанавливаются так, чтобы острый край щетки был направлен по вращению коллектора, т.е. острый край щетки должен быть сбегающим.

Щетки должны быть так установлены по окружности коллектора, чтобы расстояния между сбегающими краями щеток соседних бракетов траверсы были практически одинаковыми. В противном случае может быть искрение под щетками, т.к. они будут замыкать накоротко витки обмотки, несколько сдвинутые с нейтрали. Для правильной установки щеток нужно на коллектор, под щетки, положить полоску бумаги, размеченную на равны части, соответственно количеству бракетов. Производить проверку равномерной установки щеток по окружности по количеству коллекторных пластин, заключенных между сбегающими краями щеток соседних бракетов, не следует, т.к. это может привести к ошибке. Указанным способом можно выдержать одинаковые расстояния между соседними рядами щеток с точностью ±1 мм, что является достаточным для нормальной работы машины.

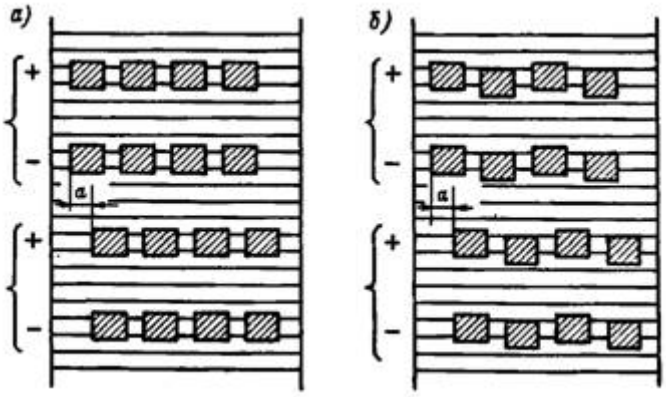


Рисунок 10.12 - Шахматная (а) и шахматно – ступенчатая (б) расстановка щеток на коллекторе

Износ коллектора под положительными и отрицательными щетками неодинаков. Чтобы сделать износ равномерным, необходимо, чтобы щетки каждой пары смежных бракетов (ряд положительных и ряд отрицательных) работали друг за другом (по одному щеточному следу, а щетки следующей пары бракетов – по другому щеточному следу, сдвинутому относительно первой пары на величину *a* и т.д. Перекрытие *a* нужно выбрать с таким расчетом, чтобы щетки работали по всей поверхности коллектора (рисунок 10.12). В многополюсных машинах щетки можно устанавливать с меньшим сдвигом, но так, чтобы полное перекрытие промежутков между щетками было достигнуто суммарным сдвигом нескольких пар бракетов.

При осевых сдвигах якоря щетки крайних щеткодержателей не должны свисать над выточкой в коллекторе со стороны обмотки якоря и не должны выступать за наружный край коллектора.

Нажатие на щетку, создаваемое пружиной щеткодержателя, должно соответствовать определенному удельному давлению, завися-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

щему от марки щеток и от окружной скорости коллектора или контактных колец. Для уменьшения механических потерь на коллекторе или кольцах стремятся установить минимальное нажатие, при котором щетки работают без искрения. Следует также учесть, что чем больше окружная скорость, тем нажатие устанавливают большим, чтобы щетки могли следовать за всеми неровностями на поверхности коллектора или колец и удовлетворительно работали при возможных вибрациях щеткодержателей. Разница в нажатии на отдельные щетки не должна превышать 10% от среднего его значения.

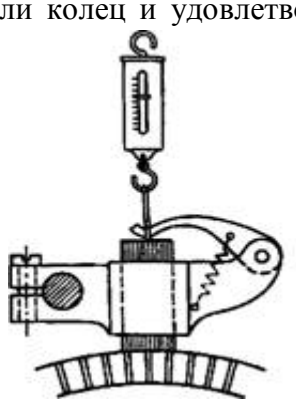


Рисунок 10.13 - Проверка нажатия щеток

Чрезмерное или неодинаковое нажатие на одну из работающих щеток приводит к неравномерному распределению тока между ними. Более нагруженная током щетка нагревается сильнее и ее переходное сопротивление уменьшается и щетка берет на себя еще большую нагрузку. При этом перегреваются щетка и токоведущий провод, что может вызвать его перегорание.

Проверка нажатия щеток производится динамометром, закрепленным на рычажок щеткодержателя, прижимающий щетку к коллектору (рисунок 10.13). Величина нажатия может быть определена, если между щеткой и коллектором проложить лист бумаги и производить постепенное натяжение динамометра. Показание динамометра, при котором бумага может быть легко изъята, и будет соответствовать нормальному нажатию щетки на коллектор.

Для предварительного приближенного определения нажатия щеток можно применить упрощенный способ – без динамометра. Под щетку подкладывают полоску тонкой папиросной бумаги и после установки щетки на место осторожно вытягивают ее. Если бумага извлекается с трудом и не имеет разрывов, то нажатие приблизительно нормальное, если бумага рвется – нажатие велико, если легко вытягивается – мало.

Истертые щетки и щетки с обломанными или обгоревшими краями, оборванными жгутиками, а также деформированные щеткодержатели заменяют. Марка заменяющей щетки должна соответствовать марке и размерам, указанным в заводском формуляре. Основные характеристики электрощеток: переходное падение напряжения в щеточном контакте, коэффициент трения, твердость, интенсивность износа. В виде исключения допускается замена щеткой другой марки с техническими характеристиками, близкими к характеристикам основных щеток. При использовании щеток разных марок на каждом пальце должны быть установлены щетки одной марки. При замене щеток необходимо иметь в виду, что марки щеток отечественного производства не полностью соответствуют однотипным маркам щеток иностранных фирм.

При отсутствии в запасе необходимых щеток их можно изготовить самостоятельно. Маленькие щетки выпиливают из щеток этой же марки большего размера. Для закрепления токопроводящего жгутика в щетке просверливают глухое отверстие, вставляют конец гибкого медного проводника, пропущенного через тонкую медную трубку, и насы-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

пают бронзовый порошок. Затем легкими ударами молотка по наружному концу трубки уплотняют порошок и заливают эпоксидным компаундом. Для проверки надежности закрепления к жгутику подвешивают грузик.

Неисправные пружины щеткодержателей также заменяют. При отсутствии запасных пружин их можно изготовить по образцу неисправных. Навивку спиральных пружин выполняют круглой стальной проволокой холодным способом на оправках, закрепляемых в патроне токарного станка. Диаметр оправки подбирают опытным путем: он должен быть несколько меньше внутреннего диаметра старой пружины. Остаточные механические напряжения в изготовленных пружинах снимают при помощи их погружения на 20 … 30 мин в масляную ванну с температурой 250 … 300^{o}C.

При осмотре щеточных пальцев обращают внимание на состояние изоляции. Поврежденную напрессованную изоляцию пальцев заменяют, для чего на хвостовик пальца напрессовывают новую текстолитовую втулку, покрытую эпоксидной эмалью ЭП-91 или эмалью ГФ-92ХС. Если изоляция пальцев находится в хорошем состоянии, ее очищают от грязи и покрывают покрывным лаком или эмалью. Если при осмотре обнаружена поломка ушка траверсы, место излома запиливают, по размерам отломанного ушка устанавливают изготовленный из стали угольник и крепят его к траверсе при помощи резьбовых соединений. При износе и срыве резьбы в отверстиях стягивающих ушек траверсы можно просверлить отверстие большего диаметра и нарезать новую резьбу, рассверлив отверстие и в другом ушке.

После выполнения этих работ расставляют и закрепляют щеткодержатели на щеточных пальцах.

Щетки должны быть притерты к поверхности коллектора или контактных колец. Для этого под щетки двух - трех бракетов траверсы подкладывают стеклянную бумагу, обращенную рабочей стороной к щеткам (рисунок 10.14).

Применение наждачного или карборундового полотна для пришлифовки щеток недопустимо. Для правильной притирки щеток концы бумаги нужно отогнуть вниз, т.к. при отгибании бумаги вверх края щеток будут опилены и уменьшится активная ширина щеток, что мо-

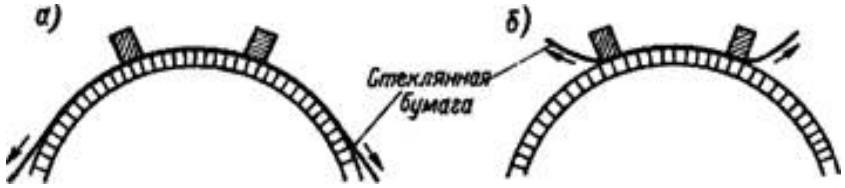


Рисунок 10.14 - Правильная (а) и неправильная (б) шлифовка щеток

жет вызвать искрение на коллекторе. Притирку твердых сортов щеток начинают с более крупных номеров бумаги и заканчивают более мелкими, лишь мягкие сорта щеток пришлифовываются мелкими номерами бумаги. После притирки щеток производится очистка и продувка сжатым воздухом коллектора, контактных колец, щеток и щеткодержателей для удаления угольной пыли и зерен стекла.

При продувке имеет место, однако, крайне вредный перенос угольной пыли из одной части машины в другую; во избежание этого нужно, по возможности, применять для чистки машины пылесос.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

10.5.10. Проверка правильности включения обмоток

Согласование обмоток трехфазных машин переменного тока. Необходимость такого согласования, т.е. определения условных начал и концов всех фаз не входит в обычный перечень проверок при ТО. Однако в некоторых случаях, например, при утрате маркироки выводов в процессе разборки машины, повреждении коробки выводов, перед включением машины возникает необходимость маркировки выводов.

При неправильном, «вывернутом» включении одной из фаз при работе машины вместо кругового магнитного поля образуется эллиптическое магнитное поле, которое можно представить суммой двух круговых полей – прямого и обратного. Обратное поле создает противодействующий момент в асинхронных двигателях, в результате чего все характеристики машины значительно ухудшаются, ее нормальная работа становится невозможной.

Совершенно недопустима работа трехфазных машин с «вывернутой» фазой и в генераторном режиме, так как в этом случае нарушается симметрия линейных э.д.с. генератора, что приводит к нарушению нормальной работы потребителей. В самом генераторе обратное магнитное поле, возникающее при неправильном включении обмотки статора, приводит к значительному увеличению потерь и является причиной опасных напряжений, индуктируемых в обмотке возбуждения.

Трехфазная обмотка выполняется симметричной. Это значит, что если каждую из фаз по отдельности подключить к источнику постоянного тока так, чтобы условные начала H_1, H_2, H_3, сдвинутые в пространстве на 120° эл., имели одинаковые полярности, например (+), то магнитные поля всех трех фаз ($Ф_1$, $Ф_2$, $Ф_3$) относительно собственных осей будут иметь также одинаковые направления (рисунок 10.15, а). Назовем направления этих полей (относительно осей обмотки) положительными. Из рисунка 10.15, а видно, что если к источнику тока подключить только одну фазу (1), то ее поле взаимоиндукции относительно положительных направлений полей других фаз будет отрицательным. Например, составляющая поля фазы 1 по оси фазы 3 равна $Ф_{13}$ и направлена против $Ф_3$. Также точно $Ф_{12}$ направлена против $Ф_2$.

Таким образом, каждая из фаз с двумя другими фазами должна быть включена встречно, а одноименные зажимы в обмотках асинхронных (и синхронных) машин определяются по принципу симметрии, а не суммирования потоков взаимоиндукции.

Обычно трехфазная обмотка асинхронной или синхронной машины имеет шесть выводов, поэтому предварительно необходимо определить при помощи омметра (или другим способом) выводы, принадлежащие одной и той же фазе (рисунок 10.15, б). Далее, для согласования обмоток применяются методы, изложенные ниже.

1. Метод, основанный на явлении электромагнитной индукции. Назовем один из выводов фазы 1 (рисунок 10.15, б) условно «началом». Подключим к фазе 1 источник постоянного тока, а к любой другой фазе – гальванометр. При включении рубильника замечаем полярность э.д.с. другой фазы. Вывод со знаком (-) соответствует «началу» фазы (потоки встречно). При отключении фазы 1 «началу» соответствует «плюс». Таким же образом находится «начало» следующей фазы.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

2. Метод, основанный на изменении знака сопротивления взаимоиндукции (рисунок 10.15, г).

Две любые фазы подключаются последовательно к источнику переменного тока. Измеряется полное сопротивление. Затем выводы одной из фаз меняются местами, и вновь изменяется полное сопротивление. Наибольшее сопротивление соответствует случаю, когда к сети подключены «начала» фаз. Затем выводы маркируются, и к одной из маркированных фаз подключается последовательно третья фаза. Таким же образом маркируется и она.

Если к сети подключены «начала», то ток в фазах проходит в противоположных относительно «начал» направлениях. Из предыдущего ясно, что именно в этом случае потоки взаимоиндукции фаз суммируются и сопротивление взаимоиндукции максимально.

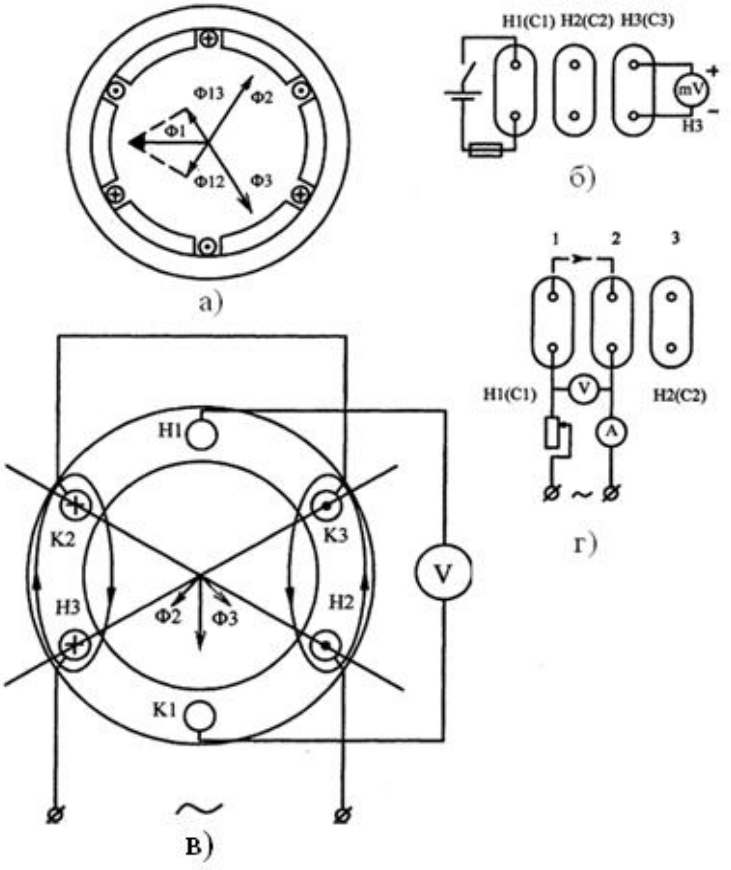


Рисунок 10.15 – Методы определения выводов трехфазных обмоток:
а – распределение магнитных полей трехфазной обмоткм статора;
б – с использованием источника постоянного тока;

3. Третий метод основан на измерении э.д.с. взаимоиндукции одной из фаз от потока двух других, соединенных последовательно.

Из рисунка 10.15, в видно, что если к сети переменного тока подключены «начала» фаз (2,3), то результирующий магнитный поток взаимоиндукции с первой фазой станет равным нулю. Таким образом, индуктируемая в первой фазе э.д.с. также будет равна нулю. Если же к сети подключить «начало» и «конец» фаз, то на зажимах фазы (1) возникнет э.д.с. После маркировки двух фаз к одной из них последовательно подключается третья и затем маркируется аналогичным образом. Вольтметр в этом случае подключается на свободную фазу.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Примечание: во всех случаях подводимое к обмотке напряжение должно быть низким, чтобы ток не превышал номинального значения для данной обмотки. В двигателях с фазным ротором цепь ротора необходимо разомкнуть.

Проверка выводных концов обмоток машин постоянного тока. Машины постоянного имеют обмотку якоря и обмотку возбуждения (главных полюсов). В зависимости от соединения обмотки возбуждения с якорем машины имеют независимое, параллельное, последовательное и смешанное возбуждение. Кроме того, имеются добавочные полюсы, располагаемые между главными. Их число обычно равно числу главных полюсов, и они служат для улучшения коммутации. Компенсационную обмотку размещают в пазах полюсных наконечников главных полюсов. Она служит для улучшения рабочих характеристик машины. Обмотки якоря, добавочных полюсов и компенсационную соединяют последовательно. Обозначение выводных концов и схемы соединений обмоток машин постоянного тока приведены в приложении А.

За начало обмоток Я1 и Ш1 генераторов и двигателей правого вращения принимают выводы со знаком "+", соединяемые со щеткой, которую подключают к положительной шине сети. При левом вращении "+" находится на выводах Я2 и Ш2, Проверка выполняется при помощи вспомогательного источника тока, "+" зажим которого соединяется с выводом Ш1 (при правом вращении) и с Ш2 (при левом), и милливольтметра, "+" зажим которого присоединяется к выводу Я1. При резком (толчком) повороте якоря наблюдают за направлением отклонения стрелки прибора. При отклонении стрелки вправо маркировка выводов соответствует правильной.

Заметим, что под правым вращением якоря понимают вращение по часовой стрелке, наблюдаемое со стороны свободного конца вала для машин с одним свободным концом и со стороны, противоположной коллектору, для машин с двумя такими концами.

Согласно другому способу определения полярности якоря на обмотку возбуждения от источника ("+"на вывод Ш1), а к коллекторным пластинам равноотстоящим от смежных разнополярных щеток, присоединяется милливольтметр. Если для положения, изображенного на рисунке 10.16, а, стрелка прибора отклонится вправо, то точка „а" и предшествующая ей по направлению вращения якоря щетка являются „плюсовыми".

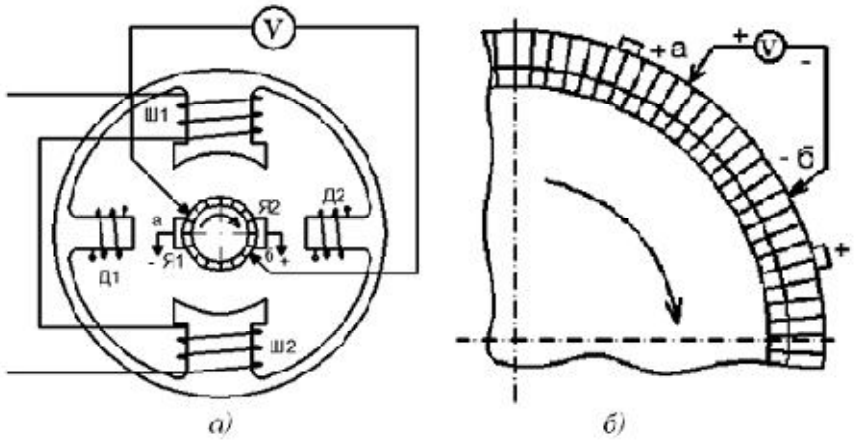


Рисунок 10.16 – Схемы проверки выводов якоря:
а – для машин с одной парой щеток;
б – для машин с несколькими парами щеток

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Однополярными (одноименными) выводами катушек или обмоток называются выводы, которые при появлении в их магнитопроводе магнитного потока имеют одинаковый знак ЭДС.

Полярность выводов зависит от направления намотки обмоток, а также от их расположения на сердечнике.

На рисунке 10.17 показаны схемы проверки полярности ("+", "-") или одноименности („начало", „конец") катушек обмоток параллельного и последовательного возбуждения одного полюса машины постоянного тока.

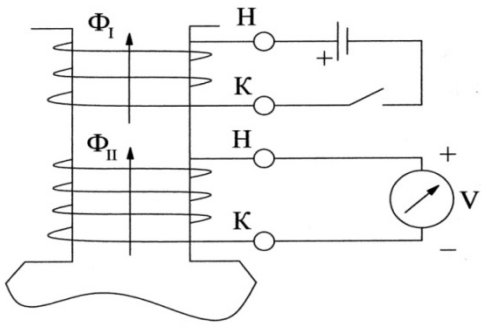


Рисунок 10.17 - Схема проверки выводов обмоток параллельного и последовательного возбуждения

Для схемы на рисунке 10.17 действует правило: если при включении источника стрелка прибора (милливольтметра или гальванометра) отклоняется вправо, то однополярные выводы обмоток те, которые присоединены к однополярным зажимам прибора и источника.

Знание полярности катушек главных полюсов необходимо для правильного их соединения, обеспечивающего требуемое чередование полюсов. При этом следует учитывать, что катушки полюсов могут выполняться открытыми и перекрещенными.

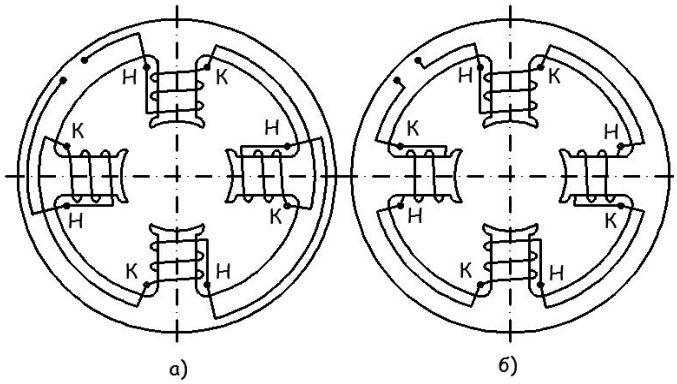


Рисунок 10.18 – Соединение обмоток главных полюсов

Если "начало" (Н) и "конец" (К) катушки являются продолжением соответственно начального и конечного витков катушки, то она называется открытой. Для обеспечения чередования полярности полюсов выводы открытых катушек последовательно соединяют между собой с внешним перекрещиванием: конец 1-го полюса – с концом 2-го полюса, начало 2-го с началом 3-го полюса и т.д. (рисунок 10.18).

Междукатушечные соединения таких катушек имеют большую длину. Для ее сокращения половину главных полюсов выполняют перекрещенными.

В перекрещенных катушках выводы "начало" (Н) и "конец" (К) являются продолжением соответственно конечного и начального витков катушки, т.е. они перекрещены. В системе полюсов перекрещенные катушки чередуются с открытыми. Как видно из рисунка 10.18, б, катушечные соединения в этом случае гораздо короче, так как междукатушечное соединение выполнено внутри катушек. Катушки имеют одинаковый внешний вид, но разную маркировку.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

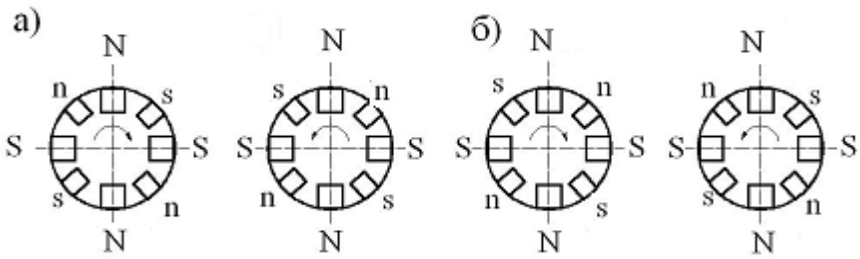
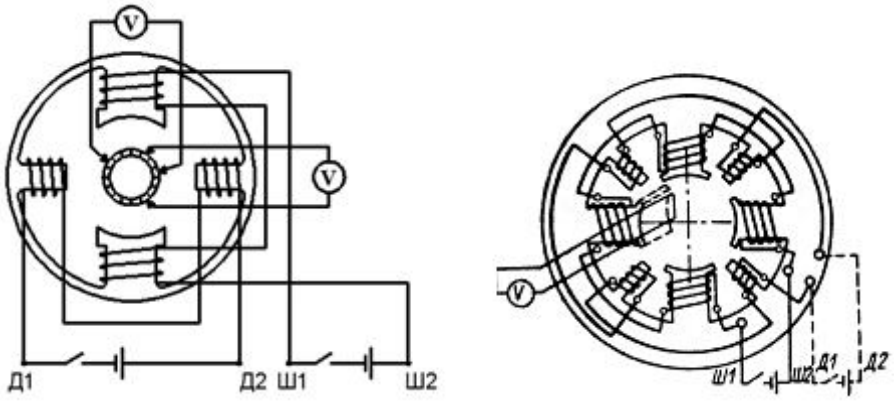


Рисунок 10.19 – Чередование главных и добавочных полюсов машины в зависимости от направления вращения: а – генератор; б – двигатель

Катушки добавочных полюсов выполняются открытыми.

Проверку чередования главных и добавочных полюсов (рисунок 10.19) можно производить как до разборки, так и после нее.

Проверку до разборки генератора (рисунок10.20, а) осуществляют следующим образом. Источник постоянного тока (аккумулятор напряжением 6 – 12 В) поочередно подключается к параллельной обмотке возбуждения (главные полюсы) и обмотке добавочных полюсов.



а) б)

Рисунок 10.20 – Схема проверки чередования главных и добавочных полюсов а – без разборки машины; б – после разборки машины

При первом подключении источника фиксируется направление отклонения стрелки вольтметра, подключенного щупами к коллекторным пластинам, находящимся под добавочными полюсами, при втором подключении – направление отклонения стрелки милливольтметра, точки подключения которого смещены по коллектору под ближайший против вращения якоря главный полюс. Такое подключение прибора обусловлено тем, что проводник обмотки якоря под главным полюсом соединен с коллекторной пластиной, размещенной под добавочным полюсом, а проводник, находящийся под добавочным полюсом, - с пластиной под главным полюсом. При одинаковом в обоих случаях направлении отклонения стрелки прибора выводы, к которым подключается один и тот же зажим источника, являются однополярными. Если смотреть по направлению вращения якоря, то в генераторе за главным полюсом должен следовать добавочный полюс противоположной полярности, а в двигателях – одноименный (см. рисунок 10.19). В судовых условиях иногда для этой проверки используется судовой магнитный компас, который поочередно подносится к головкам полюсных болтов. Для устранения влияния других катушек компас подносится не к самим болтам, а концу металлического стержня, прижатого к головке

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

болта. При такой проверке машину возбуждают током, равным 5 ... 6% номинального.

Проверка чередования главных и добавочных полюсов после разборки машины проводится с помощью измерительной рамки из нескольких витков тонкого провода, подключенной к милливольтметру. Рамка прикладывается к поверхности главного полюса, а в обмотку возбуждения рубильником кратковременно подается напряжение 6...12 В от аккумулятора (рисунок 10.20, б). При этом фиксируется направление отклонения стрелки милливольтметра. Затем рамка прикладывается к добавочному полюсу, расположенному перед уже проверенным главным полюсом, если смотреть по направлению вращения якоря, а аккумулятор переключается, тоже кратковременно, на обмотку добавочных полюсов. При этом снова фиксируется направление отклонения стрелки прибора.

Так же, как и при предыдущей проверке, действует правило: при одинаковом (в обоих случаях подключения источника питания) направлении отклонения стрелки, выводы обмоток, к которым подключается один и тот же зажим источника ("+", "-"), являются однополярными для данного направления вращения.

Проверка правильности соединения обмоток якоря генератора, добавочных полюсов и компенсационной обмотки производится на собранной машине также с помощью измерительной рамки с милливольтметром. Рамка вставляется в воздушный зазор (рисунок 10.21, а), а к обмоткам якоря и добавочных полюсов поочередно кратковременно подключается аккумулятор.

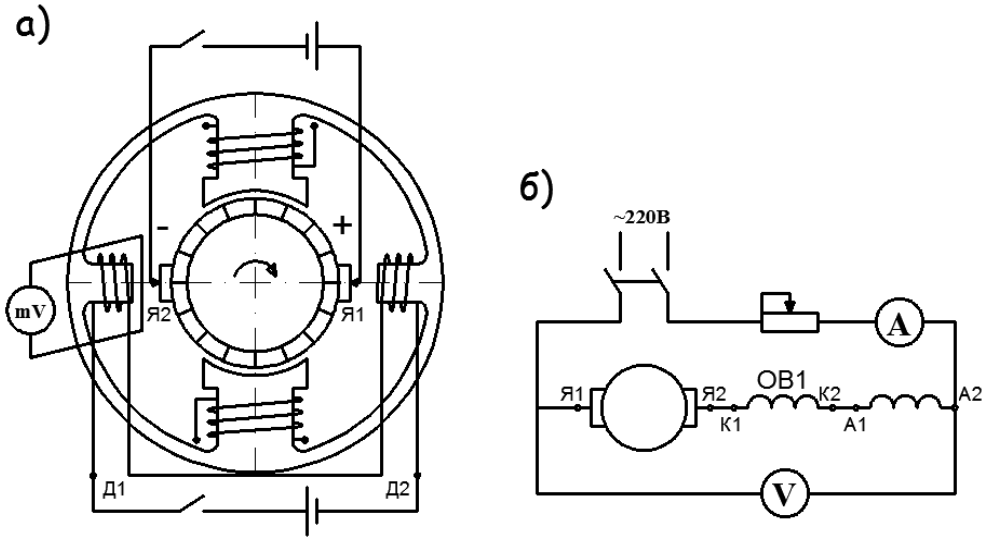


Рисунок 10.21 – Схемы проверки соединений: а – обмоток якоря и дополнительных полюсов; б – обмоток якоря, добавочных полюсов и компенсационной обмотки на переменном токе

Все операции с рамкой и переключением выполняются так же, как припроверке чередования главных и добавочных полюсов.

При противоположных направлениях отклонения стрелки прибора, выводы, к которым подключался и тот же зажим аккумулятора, считаются однополярными. При соединении обмоток генератора соединяют вместе разнополярные выводы, например, Д1 с Я2 чтобы ток в обмотках якоря и добавочных полюсов протекал от одних однополярных зажимов к другим.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Так как соединение компенсационной обмотки (при ее наличии) и добавочных полюсов выполнено внутри машины и напряжение подается сразу на обе обмотки, то проверка правильности включения добавочных полюсов относительно якоря производится вместе с присоединенной компенсационной обмоткой.

Достаточно просто данная проверка выполняется путем измерения полного сопротивления последовательно соединенных обмоток переменному току (рисунок 10.21, б). При правильном включении обмоток магнитный поток якоря противоположен потоку дополнительных полюсов и компенсационной обмотки, поэтому признаком правильности включения этих обмоток будет наименьшее полное сопротивление их общей цепи. .

Достаточно просто данная проверка выполняется путем измерения полного сопротивления последовательно соединенных обмоток переменному току (рисунок 10.21, б). При правильном включении обмоток магнитный поток якоря противоположен потоку дополнительных полюсов и компенсационной обмотки, поэтому признаком правильности включения этих обмоток будет наименьшее полное сопротивление их общей цепи. .

10.5.11. Определение повреждений обмоток машин переменного тока

Повреждения обмоток электрических машин в основном вызываются повреждениями их изоляции от износа и старения, пробоев в результате перенапряжений, механических причин, воздействия кислот, щелочей, масла, влажной среды, морской и пресной воды.

Износ и старение приводят к значительному снижению сопротивления изоляции. Естественной их причиной является длительный срок эксплуатации. В результате старения изоляция теряет свою эластичность, становится хрупкой, легко трескается и ломается, ухудшаются ее диэлектрические свойства. Старение изоляции ускоряется при перегревах обмотки до температур, выше допустимых для данного класса изоляции. Вследствие испарения связующих происходит снижение механической прочности изоляции. Такие компоненты, как хлопчатобумажная пряжа (лента), шелк, электрокартон, бумага, становятся хрупкими, на поверхности изоляции появляются трещины. В местах действия механических нагрузок изоляция постепенно разрушается, происходят местное вытекание лака или компаунда, разбухание изоляции в вентиляционных каналах, в местах выхода обмотки из пазов и в лобовых частях. Причиной перегрева обмоток, помимо перегрузок по току, может явиться ухудшение вентиляции вследствие постепенного сужения или закупорки воздушных путей в процессе эксплуатации.

Механические повреждения изоляции могут быть вызваны небрежностью или неосторожностью при сборке, разборке или транспортировке машины. Иногда изоляция лобовых частей обмоток статоров машин переменного тока нарушается вентилятором при его неисправности. Повреждения могут быть вызваны мелкими посторонними предметами, попадающими в машину с охлаждающим воздухом. Причиной нарушения изоляции могут быть неисправности сердечника ротора (якоря). Недостаточная запрессовка листов электротехнической

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

стали, ослабление распорок в охлаждающих каналах и нажимных пальцев крайних листов пакетов стали могут вызвать длительную вибрацию листов стали и перетирание изоляции. Часто механические повреждения изоляции обусловлены действием центробежных и электромагнитных сил. Во вращающихся обмотках при их неплотной укладке, под воздействием центробежных сил возможно перемещение проводов и перетирание их изоляции. Перемещение проводников обмотки ротора (якоря) может возникнуть из-за усыхания изоляции обмоток, изоляционных прокладок и распорок. Ослабление этих элементов крепления обмотки в ее лобовых частях может привести к их деформации, появлению трещин и надрывов в изоляции.

При пуске асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, а также при внезапных коротких замыканиях синхронных генераторов на их обмотки действуют электромагнитные силы, значительно превосходящие номинальные значения. Эти силы, пропорциональные квадрату величины тока, носят периодически переменный характер. Они расшатывают части обмоток, приводят к перетиранию их изоляции, а в более тяжелых случаях — к повреждению. Электромагнитные силы в большей мере проявляются в обмотках статора с длинными лобовыми частями, используемыми в быстроходных асинхронных и синхронных машинах.

Механические воздействия могут привести к появлению царапин, вмятин, трещин и разрывов изоляции. Чаще повреждения бывают в местах изгибов обмотки, выхода ее из пазов статора, в местах перекрещивания лобовых частей.

В процессе эксплуатации машины возможно попадание на обмотки минерального масла пли консистентной смазки, что приводит к повреждению изоляции. Наличие масел па поверхности изоляции способствует ее загрязнению и снижению поверхностного сопротивления.

Воздействие влажной среды, пресной или морской воды вызывает отсыревание обмотки и ухудшение ее диэлектрических свойств. В отличие от старения изоляции обмотки отсыревание является обратимым процессом. При сушке изоляционные свойства обмотки могут быть восстановлены.

Все перечисленные причины приводят к снижению сопротивления изоляции обмотки и ее повреждению. Поэтому периодические замеры сопротивления изоляции позволяют своевременно выявить ухудшение ее состояния и предупредить повреждения обмоток.

Наиболее тяжелым видом повреждения изоляции является пробой, приводящий к немедленному выходу электрической машины из эксплуатации. Самыми распространенными причинами пробоя изоляции в судовых условиях являются: отсыревание, чрезмерные перегревы, механические повреждения, попадание в обмотку посторонних металлических предметов, дефекты изоляции, общее ее старение.

Повреждения обмоток машин переменного тока могут быть разделены на короткие замыкания их отдельных частей, обрывы н плохой контакт, замыкание обмоток на корпус. В процессе эксплуатации встречаются следующие виды коротких замыкании в обмотках: витковые – в одной катушке; между катушками одной катушечной группы; между разными катушечными группами обмотки одной фазы; между витками обмоток разных фаз.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Замыкания между катушками одной и той же катушечной группы и разных катушечных групп чаще возникают в их лобовых частях и в перемычках, соединяющих катушки и катушечные группы между собой. Замыкания между катушками одной и той же фазы, между катушками разных фаз могут быть и в пазовых частях. В двухслойных обмотках с укороченным шагом в ряде пазов размещаются стороны катушек, принадлежащих разным фазам. Все эти виды замыканий приводят к образованию в обмотках статора или фазного ротора короткозамкнутых контуров. Э.Д.С., наводимая вращающимся магнитным полем, вызывает в них токи. В зависимости от сопротивления контуров токи могут достигать большой величины, что, в свою очередь, приводит к значительному нагреву замкнутых элементов обмотки.

При несвоевременном обнаружении короткое замыкание может привести к отключению машины и обугливанию изоляции или даже перегоранию обмотки, к повреждению листов стали сердечника. Нагрев короткозамкнутого контура является одним из основных признаков, по которому можно выявить поврежденную часть обмотки.

Короткие замыкания в обмотках. Внешним проявлением короткого замыкания в обмотках статора асинхронного двигателя являются, помимо значительного нагрева отдельных катушек, ненормальное гудение, уменьшение вращающего момента и затрудненный пуск двигателя, неравенство токов в обмотках фаз. Витковые замыкания в обмотке статора вызывают искажение магнитного поля, нарушение его симметрии, что приводит к вибрации и одностороннему притяжению ротора. Так как короткозамкнутые катушки ослабляют магнитный поток в месте их расположения, ротор притягивается к части статора, противоположной этим местам.

При наличии замыканий в различных элементах обмотки фазного ротора наблюдаются колебания тока в обмотках статора, вращающий момент двигателя уменьшается, ненагруженный асинхронный двигатель, включенный и сеть с разомкнутой цепью ротора, начинает медленно вращаться.

В синхронных генераторах короткозамкнутые контуры в обмотке статора приводят к уменьшению числа витков поврежденных обмоток фаз, ослаблению магнитного поля машины. Все это вызывает снижение напряжения на зажимах генератора и его несимметрию.

Если внешний осмотр и ощупывание обмотки в отключенной от сети машине не позволяют выявить место короткого замыкания, для его определения может быть использовано несколько методов.

В асинхронных двигателях с фазным ротором прежде всего определяют, где находится поврежденная обмотка — в статоре или роторе. Для этого при разомкнутой цепи ротора на обмотку статора подают пониженное напряжение, равное 0,25…0,3 номинального, и замеряют напряжение на кольцах ротора. При наличии короткозамкнутых витков на роторе напряжение между кольцами будет разным; оно не меняется при повороте ротора. Минимальное значение напряжения при этом будет на кольцах, к которым подключена поврежденная обмотка. Если обмотка ротора не имеет повреждений, а в обмотке статора имеются короткозамкнутые контуры, напряжение на кольцах ротора при его медленном поворачивании будет меняться и они не будут равны между собой.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Поврежденную обмотку фазы можно определить, замеряя ток, потребляемый из сети, в трех подводящих проводах. При соединении обмоток фаз звездой наибольшим будет ток обмотки с короткозамкнутыми контурами. При соединении треугольником наибольшими будут токи в подводящих проводах, подключенных к зажимам поврежденной обмотки. Напряжение должно быть и понижено до 0,25…0,3 номинального. Ротор может быть заторможен или вращаться. При определении этим способом поврежденной обмотки фазы статора в синхронных машинах обмотка возбуждения неподвижного ротора должна быть замкнута на разрядный резистор.

Следует иметь в виду, что в синхронных машинах с неподвижным ротором и исправной обмоткой статора значение тока, потребляемого из сети разными фазами, зависит от положения ротор. Однако в этом случае при повороте ротора токи будут изменяться в одних и тех же пределах.

Замкнутую катушку или катушечную группу можно найти, замеряя напряжение на выводах катушечных групп или катушек, при этом напряжение на выводах, имеющих замыкание, будет меньше, чем на выводах исправных. Для замера напряжений нужно зачистить изоляцию соединительных проводов либо проколоть ее острыми щупами.

Неисправность обмотки фазы с короткозамкнутыми витками, катушками или катушечными группами может быть определена по значению сопротивления; поврежденная обмотка имеет меньшее сопротивление постоянному току, измеренное методом вольтметра и амперметра или мостиком. При соединении обмотки статора звездой наибольшее сопротивление будет между выводами обмоток двух неповрежденных фаз. При соединении треугольником наименьшим будет сопротивление между зажимами поврежденной обмотки фазы.

У синхронных генераторов обмотка фазы с короткозамкнутыми витками может быть проверена путем замера напряжения на выводах обмотки статора. При этом ротор приводят во вращение с синхронной угловой скоростью и устанавливают ток возбуждения, обеспечивающий $U = (0{,}25…0{,}3)U_{ном}$: напряжение на зажимах поврежденной обмотки будет минимальным. Замкнутую накоротко катушку или катушечную группу можно определить, замерив напряжение на выводах катушечных групп и катушек.

Для определения места виткового замыкания в обмотке фазы можно воспользоваться методом ее последовательного деления на равные части. Предварительно отсоединенную от других поврежденную обмотку фазы делят пополам путем распайки соединений между катушечными группами. На каждую половину поочередно подается пониженное напряжение. Часть обмотки с короткозамкнутыми контурами будет потреблять больший ток, определяемый по амперметру. Осуществляя таким образом последовательное деление поврежденной части обмотки пополам, путем сравнения токов в них находят поврежденную катушечную группу, а затем и катушку.

Делением поврежденной обмотки фазы на части можно определить короткозамкнутые катушки также с помощью мегаомметра без подачи напряжения на обмотку. На рисунке 10.22, поясняющем сущность этого метода, показана обмотка фазы, состоящая из восьми катушек. Между катушками *2* н *6* имеется короткое замыкание.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

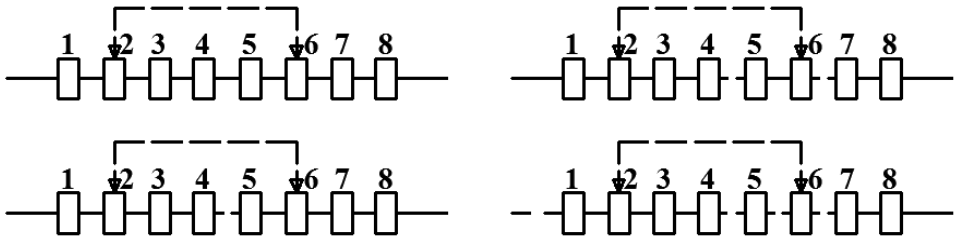


Рисунок 10.22 – Схема определения места короткого замыкания между катушками одной фазы

Обмотку делят на две части (1 – 4 и 5 – 8) и мегаомметром проверяют соединение между ними. Затем одну из частей, например, состоящую из катушек 5—*8,* снова делят пополам (5 – 6 и 7 – 8) и проверяют их соединение с первой половиной обмотки. Мегаомметр показывает соединение части обмотки из катушек *5* и *6.* Разделив эту часть обмотки снова пополам, определяют катушку 6, имеющую короткое замыкание.

В случае применения этого метода к обмоткам с параллельными ветвями предварительно их разъединяют и устанавливают, в каких ветвях имеется соединение. Метод может быть использован и для определения места короткого замыкания между катушками обмоток разных фаз, которые предварительно разъединяют. Устанавливают, между какими обмотками фаз имеется замыкающее соединение, а затем одну из них последовательно делят на части. Мегаомметром проверяют соединение между одной из этих обмоток и частью другой.

Пазы статора с короткозамкнутыми витками можно найти, используя приспособление, которое может быть сделано в судовых условиях. Основным элементом приспособления (рисунок 10.23) является небольшой шарикоподшипник, туго насаженный на рукоятку из изоляционного, немагнитного материала. Внутреннее кольцо подшипника зажато с обеих сторон круглыми фибровыми (гетинаксовыми) шайбами. Диаметр шайб должен быть больше наружного диаметра подшипника на 0,3…0,5 мм. Его наружное кольцо должно легко вращаться. Для определения пазов с короткозамкнутыми витками приспособление вводят внутрь статора и изоляционными шайбами опирают на его сердечник. На обмотку статора подают пониженное напряжение. Под действием вращающегося магнитного поля наружное кольцо подшипника будет вращаться. Приспособление медленно перемещают по внутренней окружности сердечника статора: над пазами с короткозамкнутыми витками вращение наружного кольца подшипника прекратится.

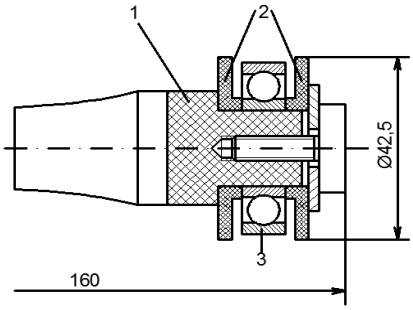


Рисунок 10.23 – Приспособление для проверки роторных и статорных обмоток: 1 – рукоятка; 2 – шайбы; 3 – шарикоподшипник

Обрыв или плохой контакт в обмотках фаз. Внешним проявлением обрыва в одной из обмоток фаз при работе статора асинхронного двигателя является увеличение потребляемого тока и нагрева, ненормальный гул. При соединении обмотки статора звездой двигатель не

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

запускается, при соединении треугольником — запускается, но разворачивается медленно. Так как причинами такого ненормального режима могут быть неисправности в подводящей цепи, предварительно проверяют наличие полного напряжения на зажимах обмотки статора. В асинхронных двигателях с фазным ротором необходимо также предварительно проверить надежность контакта во внешней цепи ротора.

При проверке обмотки фазы статора, в которой имеется обрыв, можно воспользоваться мегаомметром или контрольной лампой. Если обмотка статора соединена звездой и нулевая точка выведена, подключая к ней один из зажимов мегаомметра, другой поочередно подсоединяют к выводам обмоток фаз. При подключении к обмотке фазы с обрывом мегаомметр покажет бесконечно большое сопротивление и контрольная лампа не будет гореть. Если нулевая точка не выведена, зажимы мегаомметра подключают попарно к выводам обмоток фаз. При соединении обмотки статора треугольником с выводом шести концов всех трех обмоток фаз размыкают одну из вершин треугольника и обмотки фаз проверяют в отдельности. Если же разъединить обмотки фаз нельзя (на панели зажимов три вывода), определить в них обрыв мегаомметром невозможно. В этом случае замеряют омическое сопротивление между вершинами треугольника. Сопротивление, замеренное на зажимах поврежденной обмотки, будет в два раза больше, чем на неповрежденных зажимах.

У синхронных генераторов обмотку фазы с обрывом можно выявить замером напряжения на клемной колодке. При соединении звездой напряжение между выводами поврежденной и неповрежденной обмоток будет равно нулю. При соединении треугольником такой замер напряжения позволяет выявить обмотку с обрывом только в том случае, если их выводы на доске зажимов можно разъединить. Напряжение в этом случае замеряют на каждой фазе отдельно.

После выявления поврежденной обмотки определяют место обрыва. Для этого один из зажимов мегаомметра подключают к середине обмотки, а второй – поочередно к ее выводам. Так определяют половину обмотки, имеющую обрыв. Поврежденную часть обмотки снова делят пополам и т. д. до тех пор, пока не находят место обрыва. Для подключения мегаомметра к изолированной части обмотки изоляцию на соединительных проводах между катушечными группами (катушками) зачищают либо прокалывают острыми щупами. Наиболее часто места обрыва встречаются в междукатушечных соединениях.

В обмотках фазного ротора обрыв или плохой контакт обычно появляется в соединительных хомутиках стержневой обмотки. Для определения поврежденного соединения замеряют падение напряжения на хомутиках. Для этого с помощью пары щупов на стержни, замкнутые хомутиком, подают напряжение от источника постоянного тока. В его цепь включают амперметр, регулируемый резистор и предохранитель. Падение напряжения на хомутике с плохим контактом, замеренное милливольтметром с помощью другой пары щупов, будет больше, чем на хомутиках с хорошим соединением.

Замыкание обмоток фаз на корпус. При выявлении места пробоя обмотки на корпус прежде всего определяют ее поврежденную фазу. Для этого соединения фаз между собой разъединяют. С помощью мегаомметра замеряют сопротивление каждой обмотки фазы относительно корпуса. При наличии пробоя на корпус мегаомметр показыва-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ет значительное снижение сопротивления. Подключенная к выводам поврежденной обмотки и корпусу машины контрольная лампа загорится.

Для определения места пробоя па корпус можно воспользоваться методом «прожигания». В машинах низкого напряжения при этом один вывод поврежденной обмотки и корпус машины подключают к сети через предохранитель, рассчитанный на ток 30…40 А. Для регулирования силы тока в цепь включают реостат. Увеличенный ток, проходя через место замыкания на корпус, нагревает это место, изоляция обугливается, появляется дым, указывающий место замыкания. Ток в цепи замыкания на корпус следует увеличивать постепенно. Чрезмерный ток в месте замыкания может привести к возникновению электрической дуги и повреждению проводников соседних, неповрежденных катушек и листов стали сердечника. В машинах высокого напряжения при этом используется пониженное напряжение от специальной испытательной установки.

Пробой изоляции па корпус часто связан с ее повреждением в местах выхода обмотки из паза. Поэтому в машинах небольшой мощности для определения места замыкания на корпус может быть использован следующий метод. Поврежденную обмотку фазы и корпус машины подключают к сети через электрическую лампочку, рассчитанную на напряжение сети. После этого ударами молотка через деревянную прокладку осаживают все статорные зубцы в осевом направлении поочередно с обеих сторон. Осаживание зубца в месте замыкания обмотки на корпус может привести к исчезновению заземления и погасанию лампочки. Это и укажет на место пробоя.

Место пробоя в поврежденной обмотке фазы можно также определить магнитным методом. В этом случае один из выводов поврежденной обмотки и корпус машины подключают к сети постоянного или переменного тока. Место расположения катушки, имеющей пробой на корпус, определяют с помощью тонкой стальной пластины – щупа. Щупом проводят по пазам, в которых размещены стороны катушек поврежденной обмотки фазы, начиная от ее вывода, подключенного к сети.

Если по проводникам, лежащим в пазу, проходит ток, щуп притягивается. Ток идет по катушкам поврежденной обмотки фазы только до места заземления, а затем переходит на корпус. Поэтому при перемещении щуп перестает притягиваться к пазу, в котором лежит пробитая на корпус катушка. Для уточнения места пробоя к сети подключают другой конец поврежденной обмоткн и снова, перемещая щуп по пазам от подключенного к сети вывода обмотки, определяют паз, к которому он не притягивается. Выявленную таким образом неисправную катушку отсоединяют от остальной обмотки и мегаомметром проверяют правильность определения места заземления.

Место замыкания обмотки на корпус можно определить, замеряя падение напряжения на выводах катушечных групп поврежденной обмотки фазы, подключенной к источнику постоянного тока (рисунок 10.24, а). Для ограничения тока и его регулирования в цепь контролируемой обмотки включают реостат. Один из зажимов милливольтметра подключают к корпусу машины, а выводом от второго зажима касаются проводников, соединяющих катушечные группы. Изоляцию этих проводников либо прокалывают острым щупом, либо зачищают. На

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

выводах катушечной группы, имеющей замыкание на корпус, падение напряжения будет наименьшим.

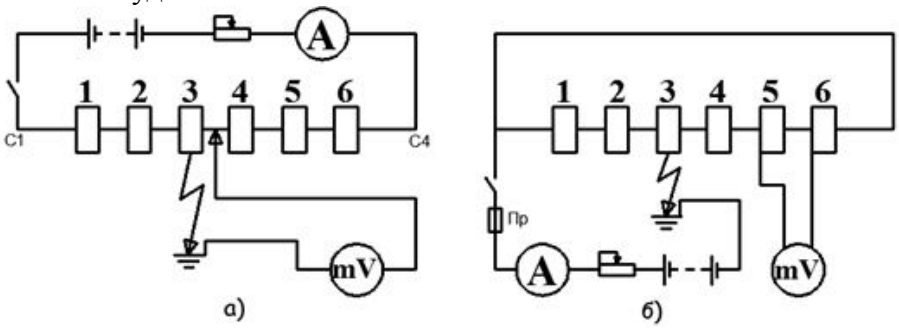


Рисунок 10.24 – Схемы определения замыкания обмотки статора на корпус

Для замера падения напряжения можно воспользоваться также схемой на рисунке 10.24, б. В этом случае выводы поврежденной обмотки фазы соединяют вместе и к ним подключают один из зажимов источника постоянного тока. Второй зажим этого же источника подсоединяют к корпусу машины. Корпус источника не должен быть заземлен. Если это заземление необходимо, оно должно быть подключено к корпусу машины. Катушка, имеющая пробой на корпус, делит поврежденную обмотку фазы на две части, направление тока и падение напряжения в которых будут разными. Милливольтметром замеряют падение напряжения на выводах катушечных групп. Отклонение стрелки милливольтметра в противоположную сторону по сравнению с предыдущим замером говорит о том, что проверяемая катушечная группа лежит по другую сторону от места пробоя. Если замыкание на корпус не находится непосредственно у выводов поврежденной катушечной группы, падение напряжения па ней будет минимальным.

Для определения в поврежденной катушечной группе катушки, имеющей замыкание на корпус, падение напряжения замеряют на выводах катушек. На выводах поврежденной катушки оно будет минимальным.

Место пробоя на корпус поврежденной обмотки может быть найдено путем ее последовательного деления на части. Вначале обмотку делят пополам. При этом соединение между катушечными группами (катушками) распаивают. Мегаомметром определяют половину обмотки, имеющую замыкание на корпус. Ее снова делят на части и т. д. до тех пор, пока не выявят поврежденную катушечную группу и катушку.

Повреждения обмоток короткозамкнутых роторов типа «беличьей» клетки. Наиболее часто встречающимися в процессе эксплуатации видами повреждений обмоток ротора этого типа являются обрывы или подгорание роторных стержней у мест их соединения с короткозамыкающими кольцами. Возможны также обрывы стержней в пазовой части ротора, разрыв короткозамыкающих колец, трещины в стержнях и короткозамыкающих кольцах. Причинами этих повреждений могут быть большие механические напряжения, вызванные нагревом или дефекты изготовления обмоток.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

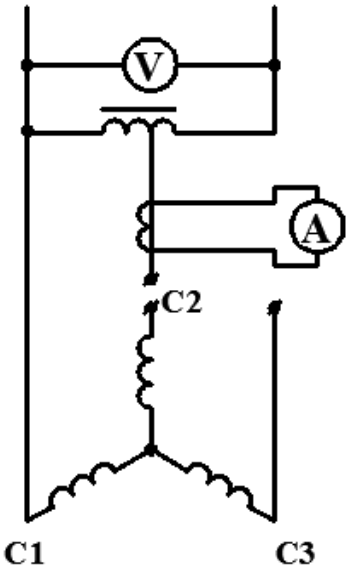


Рисунок 10.25 – Схема соединений для определения обрывов стержней

Обрывы в стержнях приводят к снижению мощности двигателя: его частота вращения уменьшается, имеет место нагрев ротора, а иногда и ток статора возрастает. Работа двигателя сопровождается гулом и вибрацией. При этом ток в цепи обмотки статора пульсирует с частотой скольжения.

Иногда даже тщательным осмотром ротора нельзя определить первые обрывы стержней. Покровные эмали поверхности ротора и статора сохраняют свой первоначальный вид. Лишь в непосредственной близости от разрывов на пакетах стали сердечника ротора имеются цвета побежалости, позволяющие судить о наличии местного нагрева. В пазах с оборванными стержнями отмечаются следы черной пыли, наблюдается расслаивание пакета стали ротора.

Если тщательный наружный осмотр ротора не позволяет выявить имеющиеся дефекты в его короткозамкнутой обмотке, для их обнаружения могут быть использованы различные способы.

Для определения целостности роторных обмоток без разборки асинхронного двигателя может быть использован метод, основанный на изменении сопротивления ротора. Измерения производят с помощью амперметра переменного тока и автотрансформатора (рисунок 10.25).

Если обмотки статора соединены звездой и нулевая точка выведена, пониженное напряжение от автотрансформатора подводится к одной из обмоток фаз и нулевой точке. Амперметр включается через трансформатор тока. Вольтметр в схеме предназначен для контроля за постоянством напряжения сети в момент измерений. Амперметр и вольтметр желательно выбирать из числа самопишущих (например, Н307, Н353, Н355, Н390). Для этой цели можно использовать и обычные стрелочные приборы, чувствительные к незначительным изменениям измеряемых величин. После сборки схемы при помощи автотрансформатора устанавливают величину проходящего через обмотки тока (8…2 А). Затем включают лентопротяжный механизм самопишущего амперметра и предварительно расторможенный и отсоединенный от механизма электродвигатель медленно проворачивают вручную на один полный оборот. Если все стержни ротора исправны и в короткозамыкающих кольцах нет разрывов, то на протяжении всего времени вращения электродвигателя показания амперметра не изменяются. В тех случаях, когда на стержнях или кольцах имеются трещины, стрелка амперметра за один полный оборот ротора отклоняется в сторону уменьшения тока столько раз, сколько полюсов у статорной обмотки.

По величине изменения тока можно судить о степени разрушения короткозамкнутой обмотки ротора. При постоянстве напряжения и соответствующей чувствительности амперметра удается обнаружить, например, трещину в одном из 40 стержней рабочей клетки двухклеточного электродвигателя. Если электродвигатель многоскоростной и

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

выполнен с несколькими независимыми статорными обмотками, то измерения можно повторить, подключая выход автотрансформатора поочередно к каждой обмотке. Частота вращения ротора и скорость протяжки бумаги самопишущего амперметра должны быть такими, чтобы на небольшом отрезке диаграммной бумаги удалось получить отчетливую запись изменений тока. Для определения поврежденного стержня при наличии трещин пли обрыва в его пазовой части можно воспользоваться стальной пластиной. Для этого ротор несколько выдвигают из статора и заклинивают с помощью небольших деревянных клиньев. На обмотку •статора подают пониженное напряжение (0,2…0,25 номинального). Пластину накладывают на каждый паз выступающей части ротора так, чтобы были перекрыты два зубца. Если пластина перекрывает паз с исправным, неповрежденным стержнем, она притягивается к зубцам и дребезжит; если в пазу находится поврежденный стержень, притяжение и дребезжание пластины ослабевают или исчезают.

10.5.12. Повреждения обмоток машин постоянного тока

Определение повреждений якорных обмоток машин постоянного тока. В обмотках якорей машин постоянного тока встречаются следующие повреждения: замыкание части витков одной секции; замыкание между двумя секциями, лежащими в одном пазу; обрыв внутри секции или плохой контакт в месте пайки; замыкание на корпус.

Для обнаружения характера и места повреждений применяется метод падения напряжений, сущность которого применительно к простым петлевым и волновым обмоткам поясняется на рисунках 10.26 и 10.27.

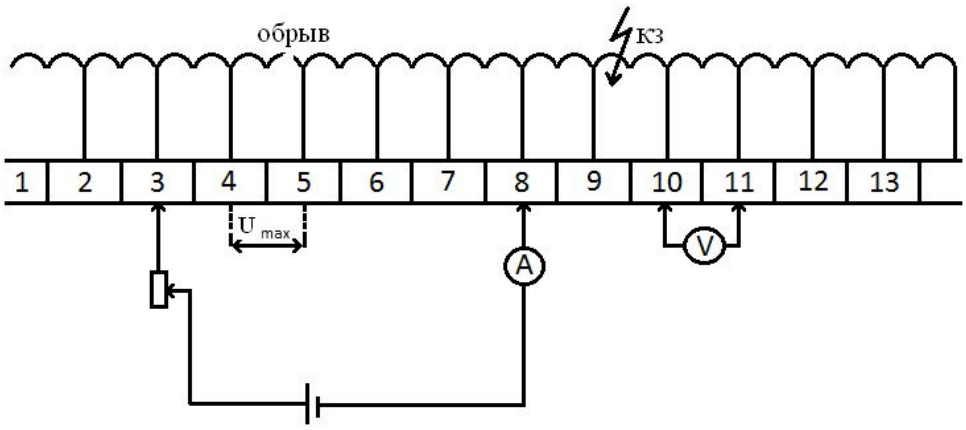


Рисунок 10.26 – Определение повреждений обмотки якоря с простой петлевой обмоткой

Для определения повреждений якоря с простой петлевой обмоткой (рисунок 10.26) необходимо к противоположным пластинам коллектора подключить источник постоянного тока. Затем с помощью милливольтметра измеряется падение напряжения между всеми соседними коллекторными пластинами. Пониженное значение падения напряжения укажет на замыкание части витков в секции или коллекторных пластин. На рисунке 10.26 пониженное напряжение будет между пластинами 9-10.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Для определения места обрыва в обмотке можно пользоваться тем же способом, каким определяют витковые замыкания. При наличии обрыва вольтметр покажет полное напряжение источника питания между пластинами, к которым подсоединена повреждённая секция. На рисунке 10.26 это пластины 4-5.

На рисунке 10.27 изображена простая волновая обмотка с числом пар полюсов 2p=4 и шагом по коллектору $y_к = 10$. В этом случае питание от постоянного источника необходимо подводить к пластинам, стоящими друг от друга на расстоянии одного полюсного деления. Как и в петлевой обмотке пониженное падение напряжения между пластинами укажет на короткое замыкание между витками. Однако в волновой обмотке замыкание может быть в любой из двух секций, подсоединённых между соседними коллекторными пластинами.

На рисунке 10.27 пониженное напряжение между пластинами 2-3 укажет на то, что повреждена одна из секций 2-12 или 12-3. Для того, чтобы определить повреждённую секцию, необходимо измерить напряжение между пластинами, отстающими друг от друга на расстоянии шага по коллектору 2-12, 12-3. Отсутствие напряжение между всеми пластинами, кроме двух, на которых оно равно напряжению источниках питания, укажет на обрыв.

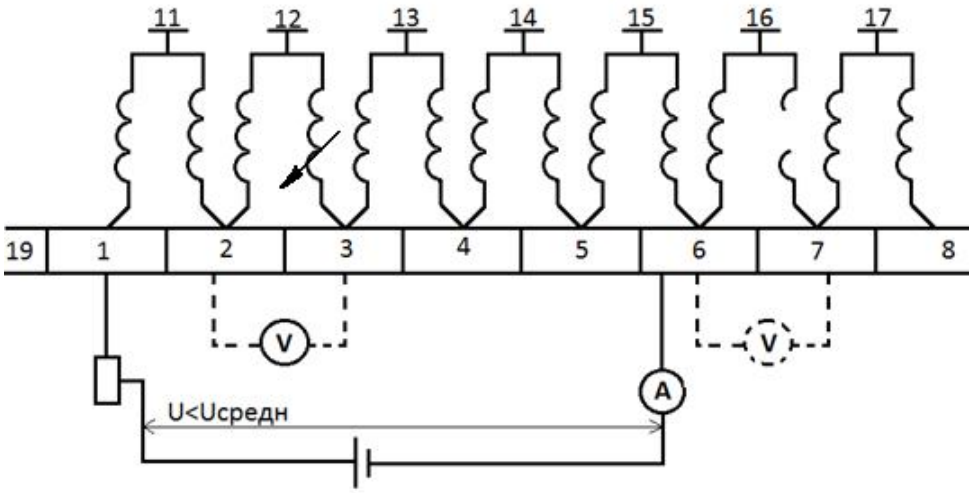


Рисунок 10.27 – Определение повреждений обмотки якоря с простой волновой обмоткой

В примере на рисунке 10.27 обрыв имеет одна из секций, подсоединенных к пластинам 6-7. Для того чтобы определить место обрыва необходимо ещё измерить напряжение между пластинами 6-16 и 16-7.

Найти место замыкания обмотки на корпусе можно также способом питания обмотки якоря постоянным током от постороннего источника питания. При этом один проводник от милливольтметра присоединяется к валу якоря, а концом другого поочерёдно касаются всех коллекторных пластин. В случае петлевой обмотки, по мере приближения пластины, присоединяемой к милливольтметру, к пластине, соединённой с корпусом, показания милливольтметра уменьшаются. При соприкосновении конца проводника милливольтметра с пластиной, соединённой с корпусом, показание при металлическом контакте будет равно нулю. При плохом контакте показание будет малым. При соединении с милливольтметром последующих пластин коллектора его по-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

казания меняют знак и возрастают по мере удаления от пластины, соединённой с корпусом. В случае волновой обмотки изменение показаний милливольтметра по мере перемещения присоединяемой к нему пластины происходит периодически, через перемещение на половину шага по коллектору.

Неисправности в обмотке якоря приводят к ненормальной, а иногда и невозможности работы машины. Если обнаруженную неисправность в секции устранить на месте не удаётся, необходимо вывести (отключить) повреждённую секцию так, чтобы оставшаяся большая часть обмотки якоря могла работать. Для этого повреждённая секция должна быть надёжно разомкнута и отсоединена от коллектора.

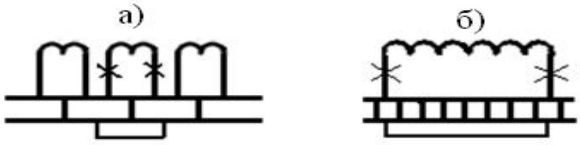


Рисунок 10.28 – Отключение поврежденной секции (а) петлевой обмотки, (б) волновой обмотки

Коллекторные пластины, от которых отключена повреждённая секция, должны быть надёжно замкнуты. В случае петлевой обмотки две соседние пластины соединяют между собой путём пропайки или же перемычкой (рисунок 10.28, а). В случае волновой обмотки такие отключения также возможны (рисунок 10.28, б), но здесь целесообразно отключить все секции по обходу коллектора.

Повреждения в обмотке полюсов. В обмотках полюсов чаще всего повреждаются переходы, выводные концы катушек и места прохода выводных концов через корпус. К наиболее распространенным дефектам относятся замыкание обмоток на корпус, обрыв или плохой контакт в обмотках, а также соединение между витками.

Чтобы найти катушку, замкнутую на корпус, всю обмотку отсоединяют от якоря и через нее пропускают постоянный ток, причем в параллельную обмотку можно подать нормальное для нее напряжение. Затем один проводник, идущий от вольтметра, присоединяют к корпусу, а вторым (свободным) проводником касаются соединительных перемычек между полюсами. Наименьшее показание прибора будет с обеих сторон катушки, замкнутой на корпус. При исследовании последовательной обмотки или обмотки добавочных полюсов нужно пользоваться милливольтметром, включая в цепь реостат для уменьшения силы тока. Катушки, замкнутые на корпус, можно обнаружить также, разъединяя их и поочередно испытывая контрольной лампой или мегомметром:

Обрыв в обмотках полюсов бывает лишь в катушках, изготовленных из проволоки небольшого сечения, т. е. в катушках параллельного возбуждения. В катушках последовательного возбуждения и в обмотке добавочных полюсов этот дефект почти не встречается. Плохой контакт встречается во всех видах обмоток. Наиболее часто обрыв или плохой контакт бывают в выводах катушек, в соединительных перемычках между полюсами и в кабельных наконечниках.

Для нахождения обрыва или плохого контакта в катушке параллельной обмотки к ней подводят нормальное напряжение и вольтметром касаются поочередно выводных концов каждой катушки. При наличии обрыва вольтметр, подключенный к зажимам поврежденной катушки, покажет полное напряжение сети. На остальных же

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

катушках прибор не даст отклонения показаний.

При плохом контакте напряжение на зажимах поврежденной катушки будет больше напряжения на зажимах других катушек.

Этот способ может быть несколько видоизменен. Обмотку также включают на нормальное напряжение, причем один проводник, идущий от вольтметра, подключают к одному из проводов сети, а вторым касаются поочередно выводных концов всех катушек; стрелка прибора не будет отклоняться до тех пор, пока не будет обнаружена катушка с обрывом. Катушка с обрывом может быть найдена и поочередным питанием всех катушек. При отсутствии обрыва в катушке будет протекать ток, что может быть замечено по амперметру, включенному в цепь.

Наконец, обрыв можно обнаружить мегаомметром или контрольной лампой, не разъединяя катушек и испытывая соединение между собой двух выводных концов каждой катушки при отсоединенных выводных концах обмотки.

Короткое замыкание незначительного числа витков обмотки параллельного возбуждения может весьма мало сказаться на работе машины, особенно при волновой обмотке или петлевой с уравнительными соединениями.

При наличии короткого замыкания в параллельной обмотке наблюдается неравномерный нагрев катушек, причем менее нагретой оказывается дефектная катушка. Это объясняется тем, что при выключении части витков и одинаковом токе во всех катушках (предполагается последовательное их включение) в дефектной катушке выделяется меньше тепла, а в короткозамкнутых витках, находящихся в постоянном магнитном поле, не индуктируются ЭДС, как это могло бы иметь место при переменном магнитном поле. Увеличение нагрева исправных катушек обусловливается также тем, что сила тока в обмотке возбуждения в связи с уменьшением ее сопротивления увеличивается. Дефектная катушка может быть найдена также измерением сопротивления измерительным мостом или же измерением падения напряжения у работающей машины.

Эти два способа дают хорошие результаты лишь при относительно большом числе короткозамкнутых витков, так как сопротивления исправных катушек могут отличаться друг от друга на несколько процентов.

Надежные результаты дает нахождение замыкания в витках при питании параллельной обмотки переменным током. При этом способе даже небольшое число короткозамкнутых витков обнаруживается немедленно, так как при этом резко меняется полное сопротивление дефектной катушки, а следовательно, и напряжение на ее зажимах.

Так как полное сопротивление катушки переменному току значительно превосходит сопротивление постоянному току, то для получения достаточно определенных результатов к обмотке возбуждения подводят более высокое напряжение переменного тока или же питают поочередно часть катушек. При питании дефектной катушки переменным током наблюдается не только уменьшение падения напряжения на ее зажимах, но и сильное разогревание короткозамкнутых витков, охватывающих переменный магнитный поток.

Во всех случаях испытания обмоток переменным током следует подводить к ним такое напряжение, чтобы сила переменного

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

тока в испытуемых катушках не превосходила номинальной силы постоянного тока. Для этого последовательно с испытуемой катушкой в нужных случаях включают реостат. Кроме того, чтобы предупредить повреждение обмотки чрезмерным током, следует включить в цепь также и предохранитель.

При испытаниях переменным током следует иметь в виду, что на якоре и оставшихся неприсоединенными полюсах может оказаться высокое напряжение, и поэтому необходимы соответствующие меры предосторожности.

Испытание переменным током дает определенные результаты лишь при отсутствии у катушек металлических каркасов, действующих размагничивающим образом подобно вторичной короткозамкнутой обмотке трансформатора. Кроме того, должны быть изолированы щетки от коллектора, так как в противном случае размагничивающее действие могут оказывать секции обмотки якоря, замкнутые накоротко щетками.

Замыкание в витках последовательной обмотки или обмотки добавочных полюсов определяется при питании их постоянным током через реостат либо при нормальной работе. Напряжения измеряют милливольтметром. Судить о наличии дефекта по различному нагреву этих катушек затруднительно. Короткое замыкание в обмотке добавочных полюсов характеризуется отсутствием искрения при холостом ходе и усиливающимся искрением на щетках одного из бракетов по мере возрастания нагрузки.

Способы устранения дефектов в обмотках полюсов зависят от характера повреждения. Обрыв, а также плохой контакт в наружных, доступных для ремонта местах, устраняют пропайкой. Чтобы найти замыкание на корпус, дефектную катушку снимают с сердечника полюса и осматривают места соприкосновения ее как с полюсом, так и со станиной.

Замыкания в обмотках полюсов, если они находятся не на выводных концах, устраняют частичной или полной перемоткой. С катушки отматывают витки и одновременно производят осмотр. Если обнаруживается, что изоляция катушек, за исключением мест соединения с корпусом или замыкания между витками, не повреждена и находится в удовлетворительном состоянии, то можно ограничиться лишь изолированием поврежденных мест. В противном случае необходима полная перемотка катушки.

Если повреждения в обмотках полюсов вызваны отсыреванием изоляции, то они могут быть устранены просушкой катушек.

10.5.13. Разборка и сборка судовых электрических машин

Полную разборку судовых электрических машин (СЭМ) рекомендуется производить в соответствии с план- графиком технического обслуживания или при необходимости ремонта какого- нибудь узла. Если в разборке нет необходимости, то лучше машину не разбирать.

Слишком частая разборка и сборка СЭМ не только не повысит их надежность, но при недостаточно высоком качестве разборки и сборки может привести к обратному результату. При неосторожной сборке может быть допущено задевание ротором или торцевой крышкой за обмотку и ее повреждение. Могут быть повреждены подшипни-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ки при неправильном насаживании полумуфты. Эти повреждения не всегда обнаруживаются и в результате машина выходит из строя через непродолжительное время работы после сборки. Кроме того, частые разборки машин приводят к ненужным, неоправданным трудовым и материальным затратам.

Однако, любая СЭМ, какой бы надежной она ни была, время от времени должна разбираться для осмотра. В любой СЭМ имеются подшипники качения или подшипники скольжения. Расчетный срок службы подшипников качения не превышает 8000…10000 часов. Поэтому если не заменить, то по крайней мере проверить подшипник, отработавший гарантированное количество часов, необходимо. В подшипниках скольжения из-за выработки увеличивается зазор между шейкой вала и вкладышем. Если величина этого зазора превышает максимально допустимое нормами, то может повыситься вибрация ротора, а при дальнейшем срабатывании вкладыша ротор заденет за статор и крупное повреждение СЭМ в этом случае неизбежно. Поэтому необходимо следить за величиной зазора в подшипниках и вовремя производить перезаливку сработавшихся вкладышей. Проверка и тем более замена подшипников качения или неразъемного подшипника скольжения требуют отсоединения электродвигателя от механизма или генератора от приводного двигателя, снятия с СЭМ полумуфты и торцовых крышек. Полная разборка СЭМ предусматривает выемку ротора, так как некоторые дефекты статора и ротора можно обнаружить только при вынутом роторе.

Прежде чем приступить к разборке СЭМ, необходимо отключить ее от сети. Кабель по которому подводится ток к машине, опускают вниз или отводят в сторону, чтобы не повредить его при снятии машины. Жилы отсоединенного кабеля маркируют монтажными бирками. Чтобы защитить кабель от попадания внутрь воды, концевую кабельную разделку вместе с жилами и наконечниками завертывают в лакоткань. Затем СЭМ отсоединяют от механизма, с которым она соединена механически. При соединении валов жесткой муфтой развинчивают болты, связывающие две полумуфты. Отвинчивают болты, крепящие машину к фундаменту или стальной конструкции, при этом маркируют прокладки и связывают их отдельно по числу мест и установки. Чтобы не допустить потери болтов и мелких деталей в условиях качки судна, их следует складывать в ящик, который должен входить в набор инструмента и приспособлений.

При разборке электродвигателя необходимо нанесением меток керном зафиксировать положение полумуфт относительно друг друга и в каком отверстии полумуфты установлен каждый палец. Прокладки под лапами электродвигателя, положенные при центровке его с приводимым механизмом, следует связать и разметить, чтобы после ремонта каждую группу прокладок можно было безошибочно положить на тоже место, где она была. Это значительно облегчит и ускорит центровку электродвигателя после ремонта.

Следует разметить также крышки, фланцы и другие детали, чтобы при сборке все было установлено на свое место. Несоблюдение этого правила может привести к ошибкам, повторной разборке и в некоторых случаях к повторному ремонту. Например, если вентилятор, снятый с ротора, не установить в прежнее положение, может быть на-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

рушена балансировка ротора, и на электродвигателе после сборки появится вибрация.

После этих операций машина доставляется к месту разборки.

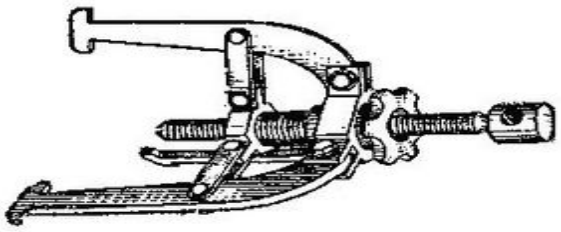


Рисунок 10.29 – Винтовой съемник

Разборку машины рекомендуется выполнять в сухих и отапливаемых помещениях, оборудованных подъемными средствами. Перед разборкой наружная поверхность машины очищается от грязи, нефтепродуктов, чтобы они не попали внутрь машин. Обязательно замеряется сопротивление изоляции. Разборка машины начинается со снятия полумуфты, шкива или шестерни с конца вала. Чаще всего это полумуфта. При этом используются специальные двух или трехлапчатые винтовые съемники (рисунок 10.29). Из-за посадки полумуфты с натягом и особенно в тех случаях, когда натяг выше нормы, усилия, необходимые для снятия полумуфты с вала, могут достигать нескольких тонн. Поэтому снятие полумуфты, несмотря на кажущуюся простоту, является операцией, для выполнения которой необходим достаточно мощный съемник, а от исполнителя требуются большой опыт и умение. Несмотря на широкое распространение двухлапчатые съемники неудобны из-за большого веса и неустойчивого положения их при затяжке винта. Для установки его на полумуфте требуется три человека. Лапы съемника приходится удерживать от падения до тех пор, пока съемник не будет затянут. Из-за неустойчивого крепления к полумуфте съемник при приложении к нему больших усилий, необходимых чтобы сдвинуть полумуфту с места, зачастую начинает отклонятся от оси полумуфты. Это вынуждает ослабить натяжение съемника, выправить положение лап на полумуфте и затем начинать операцию сначала. В конце снятия полумуфты приходится поддерживать не только полумуфту, но и съемник.

Если съемником снять полумуфту, шкив или шестерню, при максимально возможном усилии не удается, то следует их подогреть до температуры 250…300°С. Нагрев можно контролировать, прикасаясь к нагреваемой детали кусочком олова (температура плавления около 250°С). Подогрев должен производиться горелкой не ниже №5 интенсивно, быстро, чтобы не успел прогреться вал двигателя. Вал целесообразно обернуть влажным асбестом. Прогрев муфты во избежание появления местных перенапряжений следует начинать с наружной цилиндрической части. Затем прогревается дисковая часть и наконец ступица. Не следует допускать, чтобы пламя горелки попадало на вал электродвигателя.

Если, несмотря на подогрев, снять полумуфту по- прежнему не удается, то следует дальнейший прогрев прекратить и дать полумуфте и валу ротора остынуть до температуры, близкой к температуре окружающего воздуха. Затем приступить к повторной попытке снятия полумуфты с применением более интенсивного прогрева ее, например, одновременно двумя горелками и охлаждения вала прикрыванием ветоши, смоченной в воде. Остывание полумуфты и особенно вала, успевшего передать тепло ротору, продолжается 4…5 ч и более. Приме-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

нение подогрева, помимо облегчения съема, обеспечивает сохранность посадочных поверхностей вала и детали, которые при съеме без подогрева и особенно при перекосе съемника можно повредить. После снятия полумуфты удаляется шпонка. Дальнейший процесс разборки машины определяется ее конструкцией, размерами, массой и специфическими особенностями.

Для облегчения съема деталей в их конструкции предусматривают специальные элементы. Так например, на наружной поверхности втулок протачивают кольцевые канавки под лапы съемника. Во втулках вентиляторов выполняют резьбовые отверстия для ввинчивания шпилек. Во фланцевой части подшипниковых щитов в месте соприкосновения с корпусом выполняют резьбовые отверстия, в которые при разборке ввинчиваются болты. Поочередно вращая их в диаметрально противоположных точках, щит отжимают от корпуса.

Разборку следует производить без ударов, избегать перекосов, предохранять от повреждения шейки валов, подшипники, коллекторы, щетки, вентиляторы, обмотки. Чтобы избежать поломки, нельзя захватывать вентилятор съемником за тонкий диск. Для этой цели надо использовать кольцевые проточки и резьбовые отверстия в торце втулки. Изменения углового положения вентилятора может нарушить балансировку ротора. Поэтому, если он насажен на вал без шпонки, перед разборкой надо отметить угловое положение с помощью рисок или кернения на валу и ступице.

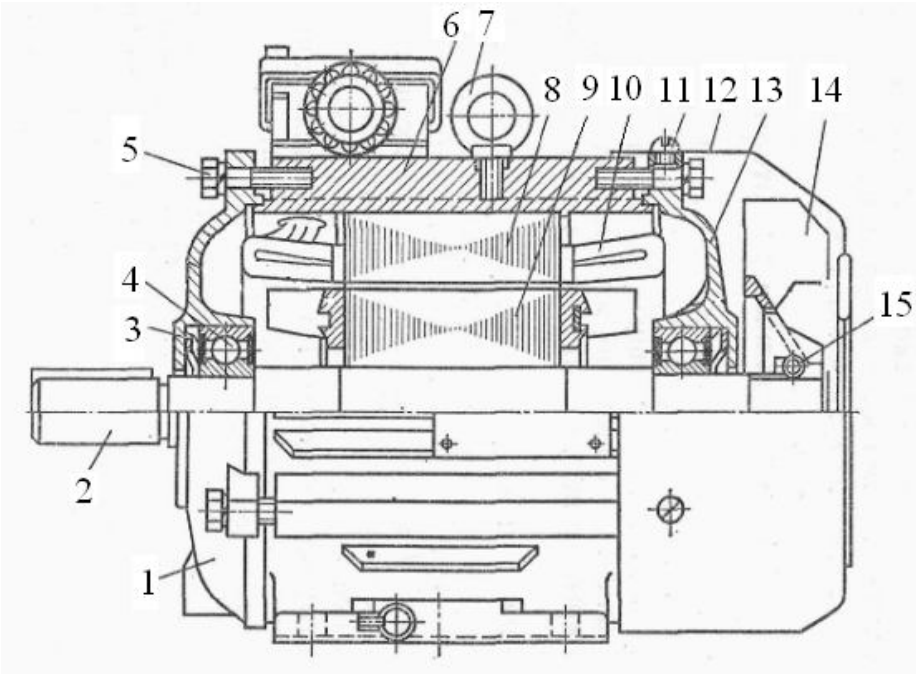


Рисунок 10.30 – Конструкция короткозамкнутого асинхронного двигателя

Для примера рассмотрим процесс разборки асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором серии 4А (рисунок 10.30)

Сначала снимают кожух 12, отвинтив винты 11, крепящие его к подшипниковому щиту 13. Затем снимают вентилятор 14, вывинтив болт 15 на один- два оборота. Подшипниковые щиты 1,13 снимают после отвинчивания болтов крепления 5. Отметив рисками положение подшипниковых щитов относительно станины и отжимными болтами осторожно, без перекосов снимают их. Если отжимные болты не преду-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

смотрены, то подшипниковые щиты снимают легкими ударами молотка через мягкую прокладку или молотком из мягкого материала (дерева текстолита, свинца, меди и т.д.) по их выступающим краям. Снимать щиты путем забивки зубила или другого металлического предмета встык между станиной и краем щита нельзя, так как это может привести к повреждению подшипниковых щитов и вследствие перекоса – повреждению самих подшипников. Перекос вызывает закусывание подшипника в посадочном отверстии щита. Попытка продолжить снятие щита с применением еще большего усилия приводит к повреждениям. Перекос ротора по отношению к статору получается также после съемки одного щита, когда ротор ложится на сердечник статора. Поэтому в крупных машинах перед съемкой щита под конец вала устанавливают домкрат или подвешивают его с помощью тали.

На рисунке 10.30 представлена конструкция двигателя с высотой оси вращения 110 мм. В двигателях основного исполнения с высотами оси вращения 50…132 мм установлены подшипники с двумя резиновыми уплотнениями и заложенной на весь срок службы смазкой. Подшипниковые крышки в этих двигателях отсутствуют. Двигатели с высотами вращения 160…355 мм имеют роликовые (со стороны привода) и шариковые подшипники качения, защищенные внутренними и наружными крышками (рисунок 10.31).

В подшипниковых узлах электрических машин серии 4А между подшипником и подшипниковым щитом или крышкой предусмотрен зазор в котором помещена волнистая пружина 2 (рисунок 10.31).

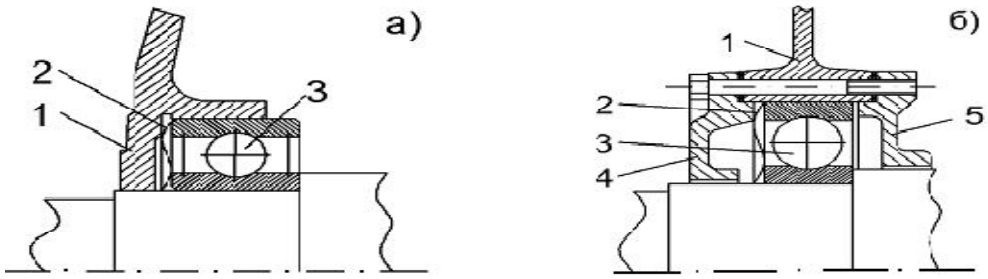


Рисунок 10.31 - Подшипниковые узлы машин серии 4А:
а - с подшипниками серии 180000;
б – с внутренней и наружной крышками; 1 – щит подшипниковый;
2 – пружина волнистая; 3 – подшипник; 4 – наружная крышка;

С помощью этого зазора обеспечивается свободное перемещение подшипника в осевом направлении чтобы избежать заклинивание подшипника в случае изменения длины вала и корпусных деталей при нагревании.

Подшипниковые узлы могут иметь устройства для пополнения и частичной замены смазки.

При наличии подшипниковых крышек перед снятием подшипниковых щитов вывертываются болты, скрепляющие крышки подшипников. При разборке нет необходимости снимать наружные крышки подшипников, т.к. они будут защищать камеры подшипников от засорения.

Для предохранения обмотки статора и антикоррозийного покрытия ротора при его извлечении в зазор между ротором и статором закладывают прессшпан или картон толщиной 0,3…0,4 мм. После этого можно освободить конец вала от домкрата или талей и снять щиты.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

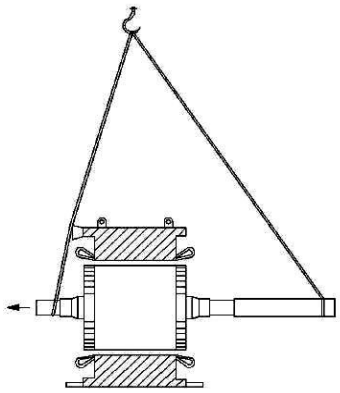


Рисунок 10.32 – Выемка ротора при помощи удлинителя

Выемка ротора из расточки статора является весьма ответственной операцией, так как при этом может быть повреждена обмотка статора. Даже легкое задевание или давление ротора на обмотку неизбежно вызовет повреждение ее изоляции. Задевание ротора за статор может привести также к нарушению плотности прессовки крайних пакетов или изоляции между листами активной стали и ротора. При разборке небольших машин ротор вынимают вручную. Для этого на один конец вала, обернутого картоном, надевают длинную трубу с помощью которой осторожно выводят ротор из расточки статора, поддерживая его на весу.

Перед выемкой ротора крупных электрических машин необходимо тщательно проверить подъемные приспособления и работы выполнять при строгом соблюдении правил безопасности труда. Для облегчения выемки роторов машин средней мощности может быть использован удлинитель - толстостенная труба, насаженная на конец вала (рисунок 10.32). Длина удлинителя должна позволять вывести ротор из статора настолько, чтобы было доступно обхватить его и подвесить на строп по центру тяжести. Машину устанавливают в строго горизонтальное положение. Длина применяемого стропа должна быть в 4…5 раз больше длины вала. Во избежание проскальзывания при натяжении строп накладывают на то место вала, где есть переход от одного диаметра к другому. На удлинителе для этой цели приваривают специальные упорные кольца. Концы вала при этом предохраняют от возможных повреждений картоном. Строп не должен касаться обмотки. При необходимости между корпусом прокладывают предохранительный деревянный брусок или ставят распорку из доски такой длины, чтобы стороны стропов шли вертикально.

Для предотвращения повреждения обмотки статора и его сердечника ротор обматывают картоном. При легком натяжении стропа необходимо каждую его ветвь отрегулировать по длине таким образом, чтобы ротор находился в строго горизонтальном положении. Затем с помощью талей его приподнимают и сдвигают в сторону, противоположную удлинителю, до того положения, пока вторая ветвь стропа не подойдет близко к обмотке статора. Свободный конец вала опускают на заранее подготовленный деревянный брус, а сердечник ротора или конец вала с удлинителем – на сердечник статора, предварительно подложив под него картон толщиной 2-3 мм. Затем накладывают строп на ротор по его центру тяжести, полностью выводят его из расточки статора. Недостатком этого способа является трудоемкость и возможность проскальзывания стропа по валу, удлинителю и гаку.

Вынутый ротор осторожно кладут концами вала на деревянные подкладки. Во избежание повреждения контактных колец и обмоток ротора они не должны опираться на эти подкладки.

Процесс разборки машины постоянного тока (рисунок 10.33) необходимо начинать с отметкой рисками положения траверсы 3, положения подшипниковых щитов 4 и 14 относительно станины 9. Отсо-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

единяют провода, соединяющие щеткодержатели с обмотками добавочных полюсов 19, щеткодержатели с колодкой зажимов, если она расположена на корпусе машины, и другие провода, препятствующие съему подшипниковых щитов. Щетки 6 вынимают из гнезд щеткодержателей, коллектор 7 обертывают картоном, который закрепляется лентой.

Между статором и ротором так же прокладывают картон. Для доступа к щеткам и коллектору снимают ленты 5,12 с люков. Затем производится съемка подшипниковых щитов и выдвижение якоря в сторону вентилятора.

Операции выполняются в последовательности, рассмотренной для асинхронного короткозамкнутого двигателя.

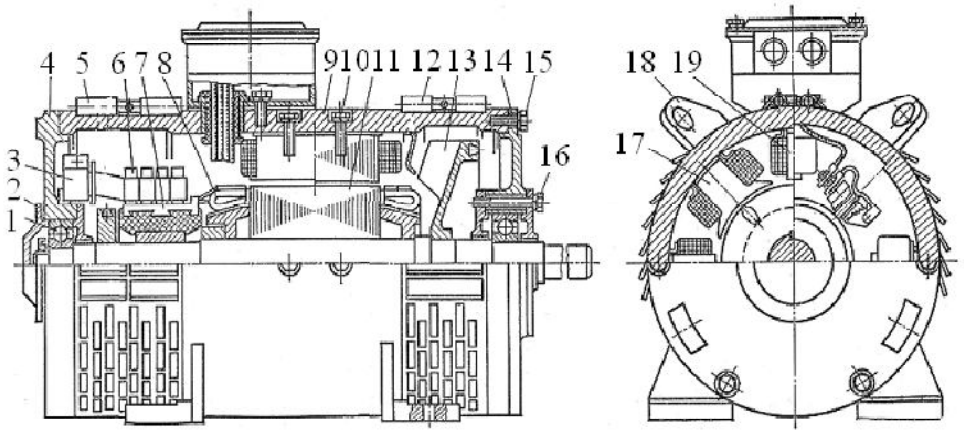


Рисунок 10.33 – Конструкция двигателя постоянного тока серии П

Дальнейшая разборка машины зависит от того, какие части подлежат ремонту и замене. Для ремонта обмотки якоря 8 снимают подшипники и вентилятор 13. Для ремонта токосъемного устройства отвинчивают болты, крепящие траверсу к подшипниковому щиту 4. Затем освобождают крепление щеточных пальцев к траверсе и при необходимости снимают щеткодержатели с щеточных пальцев. Для ремонта полюсных катушек отвинчивают болты крепления полюсов к корпусу, снимают полюса с катушками и в последнюю очередь катушки с полюсов.

Сборку асинхронного короткозамкнутого двигателя производят в последовательности, обратной разборке. Ее начинают с отдельных узлов после их осмотра и устранения дефектов. Каждый узел или деталь должны при этом занимать свое первоначальное положение, определяемое по соответствующим меткам. Операции выполняются в такой последовательности. Если имеются внутренние подшипниковые крышки их надевают на вал, заполняя уплотнительные канавки смазкой. Насаживаются на вал подшипники. Вначале насаживается на вал шарикоподшипник. Роликовый подшипник делится на две части: внутренне кольцо вместе с роликом насаживается на вал, наружное устанавливается в щит.

Вводится ротор в расточку статора одним из способов, применяемых при разборке. Закладывается смазка в подшипники. Надвигаются на подшипники подшипниковые щиты. Вводятся в замок станины бортики подшипниковых щитов (поочередно) и ввертываются кре-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

пящие болты, без затягивания их до отказа. Проверяя легкость вращения ротора от руки, поочередно затягивают болты в диаметрально противоположных точках. Ввертываются болты, скрепляющие подшипниковые крышки. Производится пробная обкатка двигателя на холостом ходу в течение 30 минут.

Сборку машин постоянного тока начинают с подготовки якоря, индуктора и подшипниковых щитов.

На вал якоря, состоящего из сердечника 11 с обмоткой, коллектора 7 и балансировочного кольца, напрессовывают вентилятор 13. На оба конца вала надевают внутренние крышки подшипников и напрессовывают шарикоподшипники. У роликовых подшипников напрессовывают только внутреннее кольцо. На наружное кольцо подшипника со стороны, противоположной коллектору, напрессовывают щит 14. В подшипник закладывают смазку и закрывают его наружной крышкой.

Сборка индуктора включает в себя установку в корпус 9 главных 17 и добавочных 19 полюсов с катушками и выполнение междукатушечных соединений. Полюса сначала запрессовывают в катушки, устанавливая прокладки, рамки, пружины и др. Катушка или рамка, которая в нее упирается, должна выступать над поверхностью затылка полюса, чтобы обеспечить надежный зажим катушек при затяжке болтов крепления полюсов.

Катушки главных и добавочных полюсов соединяют согласно схеме. В зависимости от класса изоляции места соединений изолируют несколькими слоями лакоткани или стеклоткани и поверху защитной лентой. На гибкие выводы в местах прохода их через стенки станины надевают резиновые втулки, предохраняющие изоляцию выводов от повреждения.

Полярность полюсов проверяют в собранном индукторе с помощью компаса. Обмотку подключают к источнику постоянного тока, компас перемещают по окружности вблизи полюсов. Около каждого соседнего полюса стрелка должна поворачиваться на 180^0. По ходу вращения в двигателях за главным полюсом следует одноименный добавочный, в генераторах – добавочный другой полярности.

Щит 4 со стороны коллектора подготовляют к сборке, устанавливая в него и соединяя по схеме комплект щеткодержателей.

Общая сборка машин постоянного тока начинается с запрессовки в индуктор переднего (коллекторного) щита. Эта операция выполняется обычно при вертикальном положении индуктора. Щит вставляют сверху и запрессовывают в корпус крепящими болтами. Ввод якоря и запрессовку заднего щита производят при вертикальном или горизонтальном индукторе. При вертикальной сборке якорь со щитом поднимают за рым-болт, который навертывают на резьбовой конец вала.

Насадка полумуфт на вал. На вал собранной машины производится насадка шкива, шестерни или полумуфты. Насадка производится вручную или с использованием специального винтового приспособления, действующего аналогично съемнику.

Перед насадкой шейка вала, шпонка, шпоночная канавка и посадочная поверхность полумуфты очищается и смазывается машинным маслом.

При обнаружении на шейках валов царапин, рисок или следов коррозии их устраняют путем шлифовки шейки вала. Для этого на шейку вала укладывают мелкое наждачное полотно, смазанное маслом,

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

и поверх него – фетр или войлок. Концы наждачного полотна и фетра зажимают между фланцами полухомутов так, чтобы для их вращения не требовалось больших усилий. Шлифовку производят вращением указанного приспособления от руки.

Независимо от того, как будет насаживаться на вал полумуфта необходимо проверить соответствие посадочных размеров полумуфты и конца вала.

Отверстие в ступице полумуфты измеряется микрометрическим нутромером, а диаметр конца вала – микрометром.

При измерениях отверстия внутри полумуфты нутромер устанавливают таким образом, чтобы его ось была перпендикулярна продольной оси отверстия, так как даже при незначительном наклоне нутромера измерения будут неверны.

Посадочные размеры конца вала и отверстия полумуфты должны соответствовать нормативному натягу, изложенному в нормативно-технической документации. Слишком большая величина натяга может привести к разрыву ступицы полумуфты, при малом натяге возможно проворачивание полумуфты на валу.

Полумуфты мелких и средних машин обычно устанавливают без подогрева с применением свинцовой кувалды или пользуются медными или алюминиевыми прокладками по всей окружности торца ступицы.

Насадка полумуфты на вал крупных машин, как правило, должна производится с подогревом. Нагрев полумуфты на 100° С дает увеличение диаметра на 0,1 %, поэтому в большинстве случаев полумуфту достаточно нагреть до 250° С. Для контроля за температурой может использоваться палочка из олова.

На практике полумуфту иногда нагревают до 350… 400°С. В этом случае нагрев контролируется приложением к полумуфте спички. Нагрев прекращается, как только спичка загорается. Более точный контроль температуры осуществляют с помощью термопары.

Полумуфты можно нагревать в масляной ванне с температурой масла 130…150°С, электрическим подогревателем, индукционным методом с применением токов промышленной частоты, газовыми горелками.

Лучшим является подогрев электрическим подогревателем. Для изготовления электроподогревателя на асбестоцементную трубку длиной, равной длине ступицы полумуфты, наматывают нихромовую проволоку, рассчитанную на температуру 800-900°С. Электроподогреватель ставят в отверстие ступицы полумуфты так, чтобы между стенками отверстия и подогревателя всюду был зазор, исключающий замыкание нихромовой проволоки на корпус полумуфты. Питание подогревателя можно осуществить от сварочного трансформатора.

Подогретая полумуфта с момента прикосновения ее к валу должна быть установлена быстро на место, без задержки, так как задержка приведет к прогреву вала и закусыванию полумуфты в промежуточном положении. Обычно прогретая полумуфта легко устанавливается на место нажатием руками. Однако наготове должна находиться свинцовая кувалда, чтобы при необходимости можно было довести операцию с ее помощью до конца.

Перед насадкой полумуфты производят подгонку шпонки, которая должна занимать такое положение в канавке вала и ступицы,

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

чтобы она плотно и с некоторым усилием размещалась в канавке. Высота шпонки должна быть такой, чтобы между ее верхней поверхностью и дном канавки в ступице был небольшой зазор.

Не рекомендуется при наличии зазора между полумуфтой и валом устранять его при помощи подкладывания фольги. Тем более не следует прибегать для этой цели к накерниванию поверхности вала, так как при этом достигается только кажущаяся плотность и при непродолжительной работе появляется прежняя слабина в посадке полумуфты.

Во избежание повреждения подшипника при насадке полумуфты вал подпирают с противоположного конца специальным упором, воспринимающим удары по ступице.

При насадке полумуфты на вал надо следить за тем, чтобы шпоночные пазы на валу и ступице точно совпадали.

Центровка СЭМ с приводными механизмами. Электрическую машину устанавливают на фундамент и центруют с механизмом, подкладывая под лапы ранее снятые прокладки и устанавливая на свои места призонные болты. Соединяемые между собой при помощи муфты электродвигатель и приводной механизм будут работать без вибрации, если линии их валов являются продолжением одна другой без смещения и излома в плоскости сопряжения. На практике установка валов в соответствии с этими требованиями получила название центровки. Естественный прогиб вызывает необходимость установки валов с определенным уклоном к горизонту.

При центровке подшипники располагают так, чтобы шейки валов по обе стороны муфты были горизонтальными и уровень, установленный на шейках, прилегающих к полумуфтам, давал нулевые показания. Шейки, находящиеся с противоположных концов вала, будут иметь некоторый подъем, значения которого зависит от характера упругой линии валов.

При установке линии валов машинных агрегатов, как правило, стремятся к тому, чтобы подъем крайних подшипников агрегата был по возможности одинаковым. Уклон шейки измеряют уровнем в четырех положениях вала, поворачивая его на 90° , причем в каждом положении делают два измерения (при втором измерении уровень поворачивают на 180°). За уклон шеек обычно принимают среднеарифметическое значение восьми показаний, что необходимо во избежание ошибки, которая может получиться в результате искривления вала ротора или отклонения оси шейки от оси вращения. О таких дефектах могут свидетельствовать значительные изменения показаний уровня, установленного на шейку вала при различных положениях ротора

Для проверки центровки валов агрегата, находящегося в эксплуатации, снимают все крышки подшипников и проверяют уровнем уклоны всех шеек валов. Отсутствие изменений в уклонах при сравнении полученных данных с данными формуляра указывает на сохранение центровки. При расхождениях в величинах или направлениях уклонов необходимо проверить центровку агрегата. Практически центровка сводится к тому, чтобы добиться концентричного положения полумуфт относительно друг друга и одинакового зазора вверху, внизу и по бокам между их торцами. Первое соответствует совпадению осей валов, второе – отсутствию излома (рисунок 10.34).

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

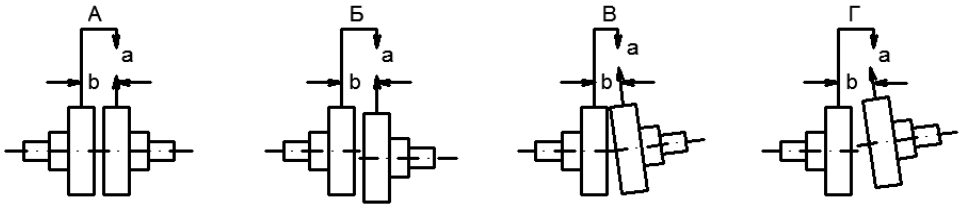


Рисунок 10.34 - Взаимные положения валов машин

В положении А валы расположены на одной прямой и центры их совпадают. Очебвидно, что при одновременном проворачивании валов зазоры *a* и *b* должны оставаться неизменными.

В положении Б валы параллельны один другому, но между ними есть сдвиг. При проворачивании валов угловые зазоры *b* остаются неизменными, а боковые зазоры *a* изменяются.

В положении В центры валов совпадают, но оси их расположены под углом. В этом случае при проворачивании валов меняются величины угловых зазоров *b,* а боковые зазоры *a* сохраняются.

В положении Г центры валов сдвинуты и оси их расположены под углом. При проворачивании валов будут меняться величины как угловых *b*, так и боковых зазоров *a*.

Центровку двигателей с механизмами можно проверить с помощью одной пары скоб, двух пар скоб и по полумуфтам.

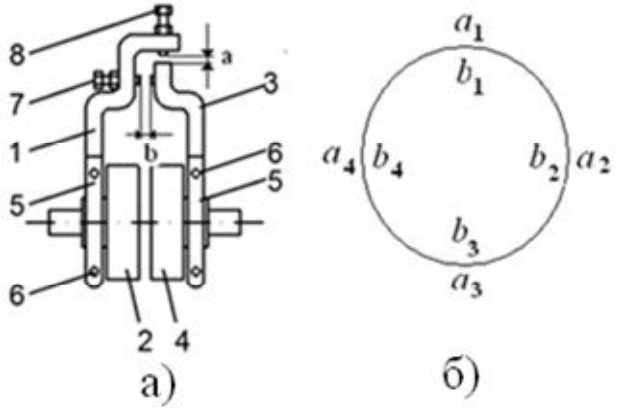


Рисунок 10.35 Центровка валов при помощи одной пары скоб

Для центровки при помощи одной пары скоб (рисунок 10.35, а), наружную скобу 1 закрепляют на полумуфте 2 установленной машины, а внутреннюю скобу 3 на полумуфте 4 механизма. Скобы крепят с помощью хомутов 5 и болтов 6. Перед началом измерения полумуфты разъединяют, а валы раздвигают с тем, чтобы скобы и полумуфты при вращении валов не прикасались. Для большей точности измерений при помощи болтов устанавливают минимальные зазоры *a* и *b*. Полумуфты устанавливают так, чтобы отметки, нанесенные на них при спаренной обработке на станке или перед их рассоединением, совпали, а скоба при этом находилась в верхнем положении. В процессе центровки измеряют боковые зазоры *a* и угловые зазоры *b* при помощи щупов, индикаторов или микрометров. В двух последних случаях индикатор или микрометрическую головку устанавливают на место болтов 7 и 8. Затем проворачивают оба ротора относительно первоначального положения на 90, 180 и 270° и в каждом из этих положений замеряют зазоры *a* и *b*. Значения радиальных зазоров записывают вне окружности, аксиальный – внутри окружности (рисунок 10.35, б). В целях исключения ошибок, вызванных смещением оси ротора, в каждом из четырех

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

его положений (0, 90, 180 и 270) следует замерять зазор в четырех точках: вверху, внизу и по бокам. Для верха, например, будут получены четыре значения аксиального зазора ($b_1^{0^\circ}, b_2^{90^\circ}, b_3^{180^\circ}, b_4^{270^\circ}$). В расчет принимают среднеарифметический зазор b_1, полученный делением суммы этих четырех зазоров на четыре. Таким же образом определяют среднеарифметический зазор b_3 для низа и зазоры с обоих боков – b_2 и b_4 .

После выполнения всех замеров роторы устанавливают в первоначальное положение (скоба вверху) и вновь измеряют зазор *a*, значение которого должно совпасть с прежним. Отличие в результатах замеров зазоров в начале и конце проверки более чем на 0,02 мм недопустимо. Это свидетельствует о недостаточно жестком креплении скобы; в таком случае необходимо перекрепить скобы и замер зазоров повторить. При измерениях пластины щупа следует заводить с легким усилием. Точность центровки определяют сравнением зазоров, замеренных в противоположных точках полумуфт. Разность значений этих зазоров (a_1 - a_3. a_2 - a_4; b_1- b_3, b_2- b_4) должна быть не более указанных в нормах завода – изготовителя.

Расцентровку в горизонтальной плоскости (большая разность в зазорах a_2 и a_4, b_2 и b_4) устраняют перемещением по горизонтали корпусов выносных подшипников или всего электродвигателя и механизма. Для подкладок применяют листовую сталь, стальную или латунную фольгу. Для сохранения центровки во время эксплуатации обычно набор тонких подкладок заменяют одной-двумя аналогичной толщины.

10.5.14. Замена подшипников качения

Снимать с вала подшипник качения необходимо только в том случае если он неисправен, так как неисправные подшипники не ремонтируются, а заменяются новыми. Также съемка подшипника необходима для обеспечения возможности ремонта или замены некоторых частей СЭМ. Например, для ремонта обмотки якоря необходимо снять с вала вентилятор, но его невозможно снять с вала, не сняв предварительно подшипник и внутреннюю крышку.

Непригодный к дальнейшей работе подшипник можно снимать любым съемником, в том числе и применяемым для снятия полумуфт.

При этом лапами съемника можно захватывать как за внутреннее, так и за наружное кольцо. Для облегчения снятия допустимо подогревать непригодный к работе подшипник автогеном. Если снять подшипник не удается, то , в крайнем случае, можно прибегнуть к разрезанию его автогеном. При разрезании внутреннего кольца следует соблюдать большую осторожность, чтобы не повредить вал; пламя горелки направлять по касательной к валу, постепенно сдувая металл внутреннего кольца.

Исправные подшипники следует снимать специальным съемником. Он значительно удобнее съемника для снятия полумуфт, и его нецелесообразно применять для снятии дефектных подшипников (рисунок 10.36 а,б).

Могут быть применены и другие конструкции съемников подшипников.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

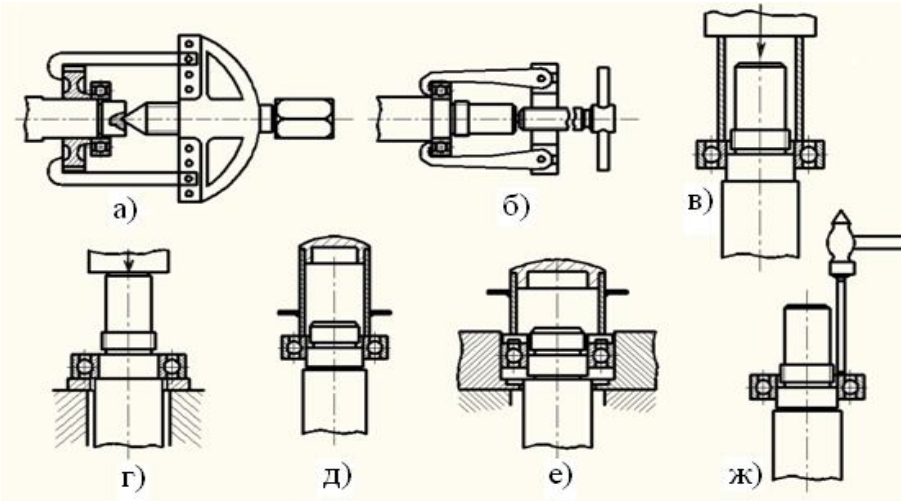


Рисунок 10.36 - Замена подшипников

Но, независимо от конструкции съемников, при снятии исправного подшипника недопустимо захватывать его за наружное кольцо, так как можно повредить подшипник, или за края шпильки внутреннего уплотняющего фланца, потому что фланец, как правило, чугунный и легко ломается.

Усилие для снятия подшипника должно быть приложено только к внутреннему кольцу. Если между внутренним фланцем и кольцом подшипника расстояние мало, то разъемный фланец съемника можно установить за внутренним фланцем так, чтобы усилие снятия передавалось на подшипник через внутренний фланец. Однако при этом между внутренним фланцем и внутренним кольцом подшипника должно быть заложено разрезное кольцо.

Необходимо следить за тем, чтобы направление усилия совпало с осью вала. В противном случае возможен перекос, который вызовет повреждение места посадки подшипника на валу.

Ряд СЭМ снабжаются роликовыми подшипниками, имеющими разборную конструкцию. При разборке СЭМ кольца таких подшипников необходимо маркировать. Если при сборке будут перепутаны кольца однотипных подшипников, могут нарушиться зазоры между роликами и кольцами и подшипник будет работать неправильно. Нельзя заменить, например, внутреннее кольцо с роликами и оставить старое наружное кольцо. Необходимо менять весь комплект.

После снятия подшипника необходимо проверить посадочную поверхность вала (шейку вала).

Посадочные поверхности шеек валов, работающих с подшипниками качения, могут повреждаться при неправильной посадке и снятии подшипников, а также в процессе эксплуатации в результате проворачивания внутреннего кольца подшипника.

Слишком тугая насадка подшипника в подшипниковом щите может повлечь за собой заклинивание подшипника и проворачивание его внутреннего кольца. Обычно при этом на валу образуются задиры. Повреждение шеек возможно при нарушении системы смазки и при попадании в подшипник твердых посторонних тел.

Общее состояние посадочной поверхности шейки вала под подшипник определяется визуально для выявления трещин, забоин,

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

следов коррозии. Выявленные заусеницы, забоины, царапины, задиры удаляют мелкой шлифовальной шкуркой с последующей шлифовкой шейки вала.

Кроме визуальной проверки поверхности шейки вала контролируются следующие параметры - диаметр посадочного места под подшипник, овальность, конусность и бочкоообразность.

Контроль посадочных мест вала и устранение выявленных дефектов необходимы для обеспечения требуемого натяга при установке подшипника на вал.

При чрезмерно большом натяге из-за увеличения диаметра дорожки внутреннего кольца радиальные зазоры в подшипнике уменьшаются до таких пределов, при которых свободное вращение шариков или роликов становится невозможным или сильно затруднено. Защемление шариков или роликов приводит к повышению температуры подшипника и к возрастанию нагрузок на сепаратор. Кроме того, от чрезмерного натяга появляются недопустимые напряжения во внутреннем кольце, вызывающие в некоторых случаях его разрыв. Ненормальные условия работы всех деталей, вызванные чрезмерным натягом, приводят в конце концов к тому, что подшипник выходит из строя аварийно, не отработав положенного ему срока.

При слабой посадке внутреннее кольцо подшипника может проворачиваться на валу, что вызовет недопустимый нагрев и расширение кольца, защемление шариков или роликов и выход подшипника из строя. Одновременно может появиться выработка на валу, а в некоторых случаях и произойти изгиб вала.

К преждевременному выходу подшипника из строя приведет слишком тугая или чрезмерно слабая посадка подшипника в подшипниковом щите.

Монтаж подшипников производят с помощью специальных приспособлений. При запрессовке особое внимание обращают на соосность вала и подшипника. Даже незначительные перекосы затрудняют посадку, приводят к образованию задиров на посадочных поверхностях. Посадочные поверхности перед сборкой протирают и смазывают.

Усилие при запрессовке подшипников на вал должно быть приложено к внутреннему кольцу. Шарикоподшипники небольших размеров насаживают монтажной трубой, торец которой должен быть ровным, чтобы обеспечить посадку без перекоса. С противоположной стороны трубы расположена заглушка, ее сферическая поверхность обеспечивает более правильное приложение усилия от молотка вдоль оси вала (рисунок 10.36 в,д,е).

Монтаж некрупных подшипников с небольшим натягом иногда осуществляют с помощью выколотки, которую изготавливают в виде прутка из мягкого материала (медь, латунь, мягкая сталь). Ее прижимают к торцу кольца и равномерными ударами молотка насаживают подшипник на вал. Чтобы избежать перекоса, удары следует наносить в диаметрально противоположных точках кольца. Выколотку часто применяют для подшипников, монтируемых с предварительным подогревом, чтобы окончательно прижать его внутреннее кольцо к опорному буртику вала (рисунок 10.36, ж).

Перед установкой подшипник нагревается в ванне с трансформаторным маслом до температуры 90…100°С (но не выше). Подогревать масло можно прогревом стенок ванны автогеном. Но при этом

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

следует опасаться загорания масла, так как температура воспламенения его паров равна 135…140°С. Поэтому безопасней под дном ванны установить электропечь. Температуру следует контролировать термометром, опущенным в масло. Подшипник должен лежать на решетке, отстоящей от дна на 30…50 мм, так как при соприкосновении его с дном ванны может произойти перегрев и отпуск колец и тел качения.

Нагретый до 90…100°С подшипник легко надевается на вал вручную. Однако на случай, если произойдет заедание, необходимо иметь наготове молоток и трубу из мягкого металла (меди, алюминия) для добивки на место подшипника.

10.5.15. Эксплуатация систем охлаждения судовых электромашин

СЭМ с искусственным охлаждением бывают как с самовентиляцией (внутренней и наружной), так и с независимой системой охлаждения, при которой охлаждающий воздух в машину нагнетает отдельный электровентилятор.

Практика эксплуатации СЭМ, особенно крупных агрегатов, показывает, что длительность их безаварийной работы и объём трудозатрат по обеспечению нормального их технического состояния во многом зависят от степени соответствия принятой системы вентиляции условиям работы на судне. Качество охлаждающего воздуха определяет скорость нарастания и степень загрязнения обмоток электромашин, возможность и выбор способа их очистки. Оно же влияет на величину сопротивления их изоляции, состояние коллекторов и коммутацию.

Замкнутая система вентиляции. В замкнутой системе вентиляции ограниченное количество воздуха циркулирует по контуру, охлаждая машину и отдавая теплоту воздухоохладителю. Система защищает машину от попадания паров масла из машинного отделения. Такие системы обычно применяют для охлаждения генераторов переменного тока, у которых контактные кольца и щётки вынесены за пределы вентиляционного контура.

Применение такого вида систем для машин постоянного тока приводит к тому, что угольная пыль от щёток циркулирует внутри системы, загрязняя обмотки машины и снижая сопротивление изоляции. Эксплуатация таких вентиляционных систем на судах показывает, что через 500 часов сопротивление изоляции снижается весьма значительно. В связи с этим возникает необходимость чистить машину. После установки фильтров, задерживающих угольную пыль, сроки чисток машины увеличиваются до 1500…2000 часов. Другим недостатком подобных систем является то, что при возникновении протечек воздухоохладителей распылённая вода попадает в машины. Известны случаи когда именно это приводило к авариям СЭМ.

Разомкнутая система вентиляции. Разомкнутая система с продувочной активной самовентиляцией и выбросом воздуха в машинное отделение достаточно часто используется на судах. Одним из недостатков в работе таких систем является загрязнение щёточной угольной пылью помещений и размещённого в них оборудования. При неправильно выбранном направлении воздушного потока (от коллектора в машину) обмотки генераторов быстро запыляются и сопротивление изоляции снижается. В машинном отделении воздух насыщается масляными парами, что в соединении с щёточной пылью создаёт труд-

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ноудаляемые загрязнения обмоток. По результатам анализа эксплуатации СЭМ постоянного тока рекомендуется чистку их проводить через каждые 400…500 часов работы. Для СЭМ переменного тока чистку щёточных устройств и колец производят по мере их загрязнения.

В разомкнутых системах вентиляции с воздухоохладителями воздух, нагретый в машине, проходит через воздухоохладитель и поступает в машинное отделение, откуда вентилятором вновь попадает в машину. Такие системы получили широкое распространение благодаря тому, что в этом случае при протечках воздухоохладителей вода не попадает в систему вентиляции, угольная пыль выносится из машины в помещение. При пользовании такими системами в обязательном порядке следует устанавливать фильтры, задерживающие угольную пыль на выходе из машины. Для снижения трудозатрат на эксплуатацию рекомендуется применять электростатические фильтры.

Системы с приёмом воздуха с палубы. Эти системы подразделяются на прямые и с рециркуляцией. В прямых системах воздух с палубы поступает в машину и выбрасывается в машинное отделение. Для уменьшения засорения помещений угольной пылью на выходе воздуха из машины устанавливаются фильтры. Температурный режим работы машины поддерживают, используя дроссельную заслонку, установленную в воздуховоде перед машиной. В системах с рециркуляцией в машину подаётся воздух, взятый частично с палубы и частично из машинного отделения. Заданная температура воздуха поддерживается изменением соотношения холодного и тёплого воздуха. Недостатком системы вентиляции с приёмом воздуха с палубы является возможность попадания в систему воды и снега.

Для охлаждения используют, как правило, забортную воду из судовой магистрали или воду, подаваемую отдельным насосом. Наиболее слабым звеном воздухоохладителей являются трубки, в значительной степени – места вальцовки трубок в трубной доске. В основном повреждения возникают как результат развития коррозии, разъедания и выкрашивания металла трубок под действием гальванических токов, возникающих вследствие разнородности металлов, входящих в конструкцию воздухоохладителей.

Методом борьбы с неисправностями и протечками в воздухоохладителях, применяемых на флоте, в настоящее время является установка протекторов. Выбор материала протектора зависит от того, в каком воздухоохладителе он находится. Воздухоохладители с латунными трубками требуют цинковых протекторов, с мельхиоровыми трубками – протекторов, изготовленных из стали.

Особое внимание следует обратить на следующее обстоятельство. В СЭМ как постоянного, так и переменного тока температура охлаждающего воздуха на входе в полость, в которой располагаются обмотки и магнитопровод, не должна быть выше 35°С. Ещё лучше, если она не будет превышать 30°С.

На состояние и срок работы, особенно изоляции СЭМ влияют колебания температуры воздуха. В системах охлаждения СЭМ, имеющих возможность автоматического удерживания этой температуры, соответствующую уставку целесообразно принимать равной 18…24°С.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

10.5.16. Контроль воздушного зазора

Воздушный зазор – зазор между статором и ротором (индуктором и якорем) играет важную роль в электрических машинах. Его величина и равномерность распределения по расточке статора оказывают большое влияние на основные энергетические показатели машин и ряд других показателей, в том числе на вибрацию, шум, нагрев.

Изменение воздушного зазора вследствие эксплуатационного износа выражается в его равномерном или неравномерном увеличении по расточке статора в машинах переменного тока или под полюсами в машинах постоянного тока.

Повышенный воздушный зазор снижает коэффициент полезного действия машин, увеличивает ток холостого хода.

Неравномерность воздушного зазора вызывает искажение магнитного поля машины. В асинхронных электродвигателях в результате этого увеличивается вибрация и шум. В машинах постоянного тока, кроме того, может ухудшаться коммутация, что приводит к усилению искрения щеток. Особенно ощутимое влияние на качество коммутации имеет воздушный зазор между якорем и дополнительными полюсами. Кроме того, изменение воздушного зазора под этими полюсами влияет на величину тока в коммутирующей секции обмотки якоря. При увеличении этого тока обмотка якоря и щеточный аппарат перегреваются.

В судовых электрических машинах постоянного тока мощностью до 50 кВт величина воздушного зазора составляет от 0,7 до 3,0 мм; при большей мощности – до 10 мм. В синхронных генераторах его величина обычно от 3 до 15 мм, в асинхронных электродвигателях – от 0,25 до 1,5 мм.

Допустимые отклонения величин воздушных зазоров судовых электрических машин приведен в таблице 10.7 [12].

Таблица 10.7 - Допустимые отклонения величины воздушного зазора в судовых электрических машинах

Вид электрической машины	Отклонение от номинального значения, не более
Генератор, двигатель постоянного тока	Под главными полюсами: для петлевой обмотки при зазорах 3мм и меньше – 10%; при зазорах свыше 3 мм – 5 мм; для волновой обмотки при зазорах 3 мм и меньше – 20%; при зазорах свыше 3 мм – 10% Под серединой дополнительных полюсов – 5% от среднего арифметического значения всех зазоров
Синхронный генератор	Для тихоходных – 10%, для быстроходных – 5%; Неравномерность зазора (отношение разности наибольшего и наименьшего зазоров и наименьшему) – 10%

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором имеют наименьший воздушный зазор по сравнению с машинами других видов. Поэтому даже небольшие по абсолютной величине изменения воздушного зазора оказывают существенное влияние на показатели этих машин. Повышение воздушного зазора асинхронных электродвигателей на каждый процент от номинальной величины вызывает

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

увеличение тока холостого хода примерно на 0,6% и уменьшение коэффициента полезного действия на 0,3%. Измерение воздушного зазора в этих машинах требует высокой точности и составляет определенные трудности.

При отсутствии точных величин воздушного зазора асинхронных электродвигателей могут быть использованы ориентировочные данные таблицы 10.8 [10].

Вследствие малых величин воздушного зазора для асинхронных электродвигателей в некоторых случаях нормируется степень неравномерности воздушного зазора ε, которая определяется выражением:

$$\varepsilon=(\delta max-\delta min)/\delta min,$$

где δmax, δmin – соответственно наибольшее и наименьшее значение зазора .

Таблица 10.8 - Допустимые значения воздушного зазора асинхронных электродвигателей

Частота вращения электродвигателя об/мин	Воздушный зазор (мм) при мощности, кВт								
	До 0,1	До 0,2	До 0,5	До 10	10-20	20-50	50-100	100-200	200-300
До 1500	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,8	1,0
3000	0,3	0,35	0,4	0,5	0,65	0,8	1,0	1,25	1,5

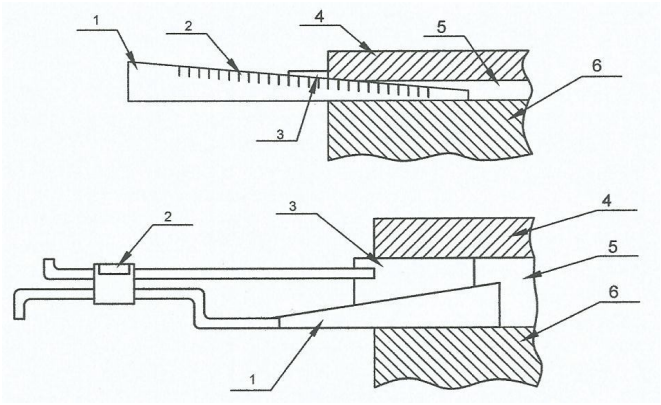


Рисунок 10.37 - Клиновые щупы для измерения воздушного зазора
1 – клин; 2 – шкала; 3 – подвижный упор;

Проверка воздушного зазора электрических машин производится с помощью обычных пластинчатых шупов или специальных клиновых шупов (рисунок 10.37).

Для проверки воздушных зазоров, не превышающих 1 мм, применяются пластинчатые шупы с толщиной пластин от 0,03 до 1 мм и интервалом толщин 0,01 мм или больше в зависимости от номера набора пластин.

Шупы выпускаются промышленностью длиной 50, 100 и 200 мм. Регистрируемая величина измеряемого воздушного зазора соответствует толщине набора пластин шупа, который входит в воздушный зазор с некоторым усилием. Точность измерения воздушного зазора такими шупами составляет 0,01 мм.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Клиновые шупы применяются при проверке больших воздушных зазоров – в машинах постоянного тока и синхронных генераторах.

На поверхности острия клинового шупа (рисунок 10.37,а) нанесена шкала, по которой перемещается указатель делений. Острие шупа вводят в измеряемый воздушный зазор до упора и указатель перемещают по шкале до соприкосновения с торцевой поверхностью статора или ротора. Затем шуп, не изменяя положения указателя, вынимают из воздушного зазора и его измеренную величину считывают со шкалы против указателя. Точность измерения воздушного зазора такими шупами составляет 0,1мм.

Клиновые шупы с подвижным клином (рисунок 10.37,б) применяются при измерении зазоров величиной 10…20мм.

При проверке воздушного зазора машин, имеющих отверстия в корпусе и подшипниковых щитах, шуп вводится в воздушный зазор сквозь эти отверстия. При отсутствии таких отверстий величина воздушного зазора измеряется после снятия подшипниковых щитов. Для этого ротор (якорь) опускают на поверхность расточки статора и измеряют в радиальном направлении расстояние между верхней точной точкой ротора (якоря) и поверхностью расточки статора. Затем ротор (якорь) поворачивают на 90° и измерение повторяют. Величину воздушного зазора рассчитывают как половину среднего значения измеренных таким образом величин.

При измерениях шуп должен вводиться в воздушный зазор параллельно оси машины и должен касаться поверхности статора (полюса) и ротора (якоря), не попадая на бандаж или в пазы сердечника.

Величину воздушного зазора в явнополюсных машинах проверяют под каждым полюсом, в неявнополюсных машинах в четырехвосьми точках. При небольшой длине сердечников (до 300 мм) допускается измерять воздушный зазор с одного конца ротора (якоря), при большой длине эти измерения проводят с обоих концов.

При проверке воздушного зазора синхронных генераторов явнополюсного исполнения следует учитывать, что зазор под центром полюсного наконечника этих машин в 1,5…2 раза меньше, чем у краев. Такое выполнение полюсных наконечников обусловлено необходимостью обеспечения синусоидального распределения магнитной индукции в зазоре и, в конечном итоге, получения синусоидальной ЭДС в обмотке статора.

В машинах постоянного тока также предусмотрено некоторое увеличение воздушного зазора под краями главных полюсов. Это связано с необходимостью уменьшения искажения и ослабления магнитного поля машины действием реакции якоря.

В соответствии с рекомендациями предприятий-изготовителей проверка воздушного зазора электромашинных преобразователей, имеющих в своем составе, например, машины постоянного тока и синхронный генератор, производится следующим образом.

Для проверки зазора между статором и якорем выбирают на окружности статора произвольную точку, вводят шуп в зазор через окно щита и, проворачивая вручную якорь, измеряют величину зазора против указанной точки при разных положениях якоря.

Если результаты измерения будут отличаться друг от друга, то в положении якоря, при котором имеет место наименьший зазор, на поверхности якоря наносят метку, например мелом, против метки статора.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Затем измеряют зазор между статором и якорем в точке, соответствующей его метке, при четырех-шести различных положениях якоря. Углы поворота якоря при этой смене положений должны быть примерно одинаковыми.

Контрольная величина воздушного зазора определяется как среднее значение указанных измерений. Это величина не должна отличаться от номинальной, указываемой в ремонтной документации, более чем на 10%.

После этого проверяют зазор между полюсами и якорем. Для этого вводят шуп в люковое окно и, проворачивая вручную якорь, измеряют величину зазора между якорем и произвольно выбранным полюсом при нескольких положениях якоря. Так же, как и в предыдущем случае, на якоре наносят метку, соответствующую наименьшему результату измерений. Затем измеряют зазор между меткой якоря и каждым полюсом в двух-трех точках.

Контрольная величина воздушного зазора также определяется, как среднее значение указанных измерений, и не должна отличаться от номинальной более, чем на 10%.

Восстановление требуемых размеров воздушных зазоров в машинах постоянного тока производится установкой между станиной и сердечниками полюсов металлических прокладок.

В машинах с подшипниками скольжения изменение воздушного зазора может быть вызвано выработкой подшипниковых вкладышей. В этом случае производится замена вкладышей или их перезаливка .

Возможную причину изменения воздушного зазора асинхронных электродвигателей можно определить путем проведения повторных измерений зазора при нескольких положениях статора. Если измеренные величины зазора по окружности статора различаются между собой, но остаются неизменными при разных положениях ротора, то наиболее вероятными причинами изменения зазора являются повышенный износ подшипников, смещение подшипниковых щитов, деформация пакетов активного железа статора.

В том случае, если измеряемая величина зазора изменяется в зависимости от положения ротора, то причинами изменения воздушного зазора могут быть деформация (искривление) вала ротора, деформация или повреждения пакетов его активного железа.

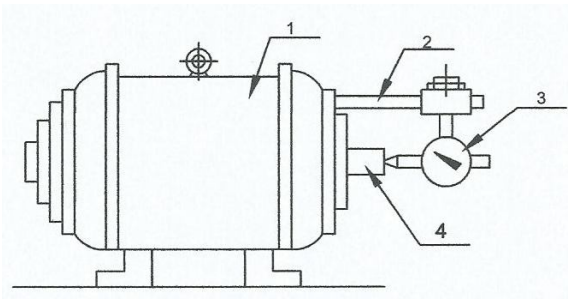


Рисунок 10.38 – Измерение осевого разбега ротора

Для измерения осевого разбега ротора последний сдвигают в одну сторону до упора. С той же стороны крепят приспособление 2 (рисунок 10.38), на которое устанавливают индикатор 3 так, чтобы его наконечник упирался в торец 4 вала машины 1, а стрелка находилась против нулевого деления шкалы. Затем якорь смещают в сторону индикатора и по его показанию определяют значение осевого разбега, которое должно быть не менее 0,2 мм. Верхний предел разбега определяется конструкцией подшипника.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

10.6. Техническое использование и обслуживание трансформаторов

При вводе в действие трансформаторов для автономной работы следует включать и выключать их только со стороны первичного напряжения.

При вводе в действие трансформаторов для параллельной работы необходимо включать их сначала со стороны первичного, а затем вторичного напряжения (нагрузки); выключать трансформаторы необходимо в обратном порядке: сначала со стороны вторичного напряжения, затем со стороны первичного.

Трансформаторы, увлажненные и имеющие сопротивление изоляции ниже нормы, необходимо подвергать сушке.

Сушка трансформаторов в судовых условиях осуществляется методами внешнего нагревания или короткого замыкания, а также комбинированным методом.

Сушка методом замыкания накоротко обмотки высокого напряжения и питания со стороны низкого напряжения не рекомендуется.

При ТО2 трансформаторов необходимо:

- снять и очистить защитные кожухи, осмотреть магнитопровод с клемной колодкой и изоляцию обмоток;
- протереть поверхности корпуса и обмоток сухой ветошью, а в случае сильного загрязнения – ветошью, смоченной в рекомендованном моющем средстве;
- обжать наружные и внутренние контактные соединения;
- проверить затяжку железа магнитопровода и обмоток относительно корпуса;
- просушить обмотки и покрыть изношенные места изоляции эмалью;
- проверить надежность заземления корпуса.

10.7. Вопросы для самопроверки и контроля знаний

1. Что понимается под техническим использованием (ТИ) судового электрооборудования?.
2. Что понимается под техническим обсуживанием (ТО) судового электрооборудования?.
3. Виды ремонта судового электрооборудования.
4. Какая техническая документация должна быть на судне для эксплуатации судового электрооборудования?.
5. В каких документах на судне должна отражаться эксплуатация судовых электрических машин (СЭМ).
6. Обязанности судового электротехнического персонала.
7. Что контролируется при ТИ судовых генераторов?.
8. Какие операции должны выполняться при вводе в действие генератора для автономной работы?.
9. Какие операции должны выполняться при вводе в действие генератора постоянного тока для параллельной работы?.
10. Какие операции должны выполняться при вводе в действие синхронного генератора (СГ) для параллельной работы?.
11. Каким образом осущесвляется перераспределение нагрузки параллельно работающих СГ?.
12. Какие операции должны выполняться при выводе генератора из действия?.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

13. Приведите обозначения выводов однофазных и трехфазных трансформаторов.

14. Какие должны соблюдаться условия для обеспечения параллельной работы трансформаторов?

15. Какие действия выполняются при ежедневном осмотре генераторов судовой электростанции?

16. Какими параметрами характеризуется качество электрической изоляции?

17. Укажите предельно допустимые значения сопротивления изоляции СЭМ.

18.Какие номинальные напряжения мегаометров должны быть при измерении сопротивления изоляции СЭМ?

19. Каким образом производится оценка увлажненности изоляции?

20. Каким образом осуществляется продувка, чистка, протирка СЭМ?

21. Каким образом осуществляется пропитка обмоток СЭМ?

22. Опишите процесс сушки СЭМ.

23. Какому контролю подвергаются подшипники качения в процессе эксплуатации?

24. По каким причинам может возникнуть вибрация СЭМ в процессе эксплуатации?

25. Какие дефекты могут возникнуть при эксплуатации коллектора (колец)?

26. Как измеряется биение коллектора?

27. Что контролируется при ТО щеточного аппарата?

28. Назовите методы проверки и установки на нейтраль щеточной траверсы.

29. Назовите методы согласования обмоток трехфазных машин переменного тока.

30. Каким образом осуществляется проверка выводных концов машин постоянного тока?

31. Каким образом осуществляется проверка чередования главных и добавочных полюсов машин постоянного тока?

32. Каким образом осуществляется определение места короткого замыкания между катушками одной фазы машин переменного тока?

33. Каким образом осуществляется определение места повреждения обмотки якоря машин постоянного тока с простой петлевой обмоткой?

34. Каким образом осуществляется определение места повреждения обмотки якоря машин постоянного тока с волновой обмоткой?

35. Назовите виды повреждений в обмотках полюсов машин постоянного тока и способы их обнаружения.

36. С помощью каких приспособлений и в какой последовательности производят разборку СЭМ?

37. Как производится снятие подшипника качения с вала и замена его новым?

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Базисные и производные единицы системы СИ, их обозначение и формула на английском языке

SI base units

Quantity	Name	Symbol
Lenght	Meter	m
Mass	Kilogram	kg
Time	Second	s
Electric current	Ampere	A
Thennodynamic temperature	Kelvin	K
Amount of substance	Mole	mol
Luminous intensity	Candela	cd

Derived units in SI

Quantity	Name	Formula	Symbol
Acceleration - linear	Meter per second per second	m/s^2	
Velocity - linear	Meter per second	m/s	
Frequency	Herts	S^{-1}	Hz
Force	Newton	$kg \cdot m/s^2$	N
Pressure or stress	Pascal	n/m^2	Pa
Density	Kilogram per cubic meter	Kg/m^3	
Energy of work	Joule	N·m	J
Pover	Walt	J·s	W
Electric charge	Coulomb	A·s	C
Electric potential	Volt	W/A	V
Electric resistanc	Ohm	V/A	Ω
Electric capacitance	Farad	C/V	F
Magnetic flux	Weber	V/s	Wb
Inductance	Henry	Wb/A	H

SI prefixes

Multiple	Prefix	Symbol
10^{12}	Tera	T
10^{9}	Giga	G
10^{6}	Mega	M
10^{3}	Kilo	K
10^{-2}	Centi	C
10^{-3}	Mini	M
10^{-6}	Micro	^
10^{-9}	Nano	N
10^{-12}	pico	P

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Классификация электроизоляционных материалов по нагревостойкости

Обозначение класса нагревостойкости	Температура, характеризующая данный класс нагревостойкости (ºС).	Основные группы электроизоляционных материалов
Y	90	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и натурального шелка, не пропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал.
A	105	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или натурального, искусственного и синтетического шелка, в рабочем состоянии пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал.
E	120	Синтетические органические материалы (пленки, волокна, смолы, компаунды и т.д.) и другие материалы, для которых установлено, что они могут работать при температуре до 120º С.
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами.
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, соответствующие данному классу нагревостойкости.
H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры.
C	Свыше 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц и другие материалы.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ПРИЛОЖЕНИЕ В Допустимые превышения температур электрических машин

Части электрических машин	Превышение температуры, °С, при классе изоляции. (по ГОСТ 8865 - 70)														
	A			E			B			F			H		
	При измерении методом.														
	Термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов
1.Обмотки переменного тока машин мощностью 5000кВа и выше или с длиной сердечника 1м и более.	-	60		-	70		-	80		-	100		-	125	
2.Обмотки: а)переменного тока машин мощностью менее 5000 кВа или с длиной сердечника менее 1м; б)обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током; в)якорная обмотка, соединённая с коллектором.	50	60		55	75		70	80		85	100		105	125	
3.Обмотки возбуждения неявно-полюсных машин с возбуждением постоянным током.								90			110				

СЕВАСТОПОЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Продолжение таблицы приложения В

Части электрических машин	Превышение температуры, °С, при классе изоляции. (по ГОСТ 8865 - 70)														
	A			E			B			F			H		
	При измерении методом.														
	Термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов	термометра	сопротивления	температурных индикаторов
4.Однородные обмотки возбуждения с оголёнными поверхностями, стержневые обмотки роторов и синхронных машин.	65			80			90			110			135		
5.Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоёв, и компенсационные обмотки.	60			75			80			100			125		
6.Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с обмотками.	60			75			80			100			125		
7. Коллекторы и контактные кольца.	60			70			80			90			100		

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Характеристика лаков, эмалей, компаундов

Марка лака	Химическая основа	Растворители	Класс нагревостойкости °С	Применение
ГФ-95 ГОСТ 8018-70	Модифицированный глифталь	Уайт-спирит, ксилол (сольвент)	130	Для пропитки обмоток электрических машин
ПЭ-9180 ТУ 16-93И37.021 4.012ТУ	Полиэфирэпоксид	Толуол, этилцеллозольв	155	Для пропитки обмоток электрических машин
ПЭ-9153М ТУ 2311-072-05758799-2002	Модифицированный олигоимидалкид	Ксилол, уайт-спирит	155	Для пропитки обмоток электрических машин. Пониженное содержание токсичных, пожаро- и взрывоопасных органических растворителей, сокращённое время и пониженная температура сушки.
ПЭ-993ЭП ТУ 2311-061-05758799-01	Модифицированный полиэфирэпоксид	Ксилол, циклогексанон	155	Для пропитки обмоток электрических машин
ИД-9152* ТУ 2311-087-05758799-2002	Полиэфирциануратимид	Циклогексанон, толуол	180	Пониженное содержание токсичных, пожаро- и взрывоопасных органических растворителей, сокращённое время и пониженная температура сушки. Может применяться взамен дорогих и дефицитных кремнийорганических лаков.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Продолжение таблицы приложения Г

Эмаль ЭП-992, ЭП-992Э (красно- коричневая, салатная, кремовая, голубая) ТУ 2312-002-05758799-95	Суспензия пигментов и наполнителей в эпоксиэфирном лаке	Ксилол, сольвент	155	Для покрытия лобовых частей, секций катушек и других деталей электрических машин, для окрашивания постоянных непроволочных резисторов.
Эмаль КО-976 (красно-коричневая) ТУ 16-504.048-82	Суспензия пигмента в кремний-органическом лаке	Толуол	180	Для покрытия обмоток электрических машин (горячей сушки).
Эмаль КО-983 (красноко-ричневая) ТУ 16-89И79.027 5.001 ТУ	Суспензия пигмента в кремний-органическом лаке	Толуол	180	Для защитного покрытия и ремонта покрытий деталей электрических машин (холодной сушки).
Компаунд ЭПЛАСТ-155 ИД (кп-98ИД) ТУ 2257-101-05758799-2003	Ненасыщенный олиго-эфиримид	Олигоэфиракрилат	155	Для пропитки обмоток электрических машин и тяговых электродвигателей, изготовленных с применением проводов с эмалевой, стекловолокнистой изоляцией.
ЭЛЛАСТ®180 ИД.ТУ 2257-068-05758799-2002	Ненасыщенный олиго-эфиримид	Олигоэфиракрилат	180	
ЭЛЛАСТ® - 220 ИД / ТУ 05758799-082-2002	Ненасыщенный олигоэфиримид	Олигоэфиракрилат	200	Для пропитки обмоток электрических машин и тяговых электродвигателей класса нагревостойкости Н (180 °С).

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Нормы сопротивления изоляции электрооборудования судов

Вид электрооборудования	Сопротивление изоляции в нагретом состоянии, МОм		
	Морское судно		Речное судно
	номинальное	Минимальное предельно допустимое	Минимальное предельно допустимое
Электрические машины при номинальном напряжении до 500 В.	0,7 и выше	0,2	0,5
Магнитные станции, пусковые устройства.	0,5 и выше	0,2	0,5
Распределительные устройства и пульты управления при отключенных внешних цепях, сигнальных лампах указателей заземления, вольтметрах и др. при напряжении:			
До 100(125) В*	0,3 и выше	0,06	0,3
От 100(125) В до 500 В	1,0 и выше	0,2	1,0
Аккумуляторные батареи при отключенных потребителях и номинальном напряжении:			
до 25 В	0,1 и выше	0,02	0,1
от 25 В до 220 В	0,5 и выше	0,1	0,5
Цепи управления, сигнализации и контроля, коммутационная аппаратура, измерительнные приборы, приборы связи и сигнализации и т. п. при напряжении:			
до 100(125) В	0,3	0,06	0,3
от 100(125) В до 500 В	1,0	0,2	1,0
Изолированный подшипник		0,1	

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Продолжение таблицы приложения Д

Вид электрооборудования	Сопротивление изоляции в нагретом состоянии, МОм		
	Морское судно		Речное судно
	номинальное	Минимальное предельно допустимое	Минимальное предельно допустимое
Фидер кабельной сети: освещения до 100 В, то же от100 В до 220 В, силовой от100 В до500 В	0,3 и выше 0,5 и выше 1,0 и выше	0,06 0,2 0,2	

*В скобках указаны пределы напряжения для речных судов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Показатели качества электроэнергии

Правилами классификационных обществ нормируются:

1. Установившееся отклонение напряжения - ΔU_y, %,

$$\Delta U_y=100(U-U_{ном})/ U_{ном},$$

где U - действительное напряжение в сети, $U_{ном}$ - номинальное напряжение.

2. Установившееся отклонение частоты - Δf_y, %,

$$\Delta f_y=100(f-f_{ном})/ f_{ном},$$

где f- действительное значение частоты.

3. Коэффициент неодинаковости напряжений трехфазной сети - $K_н$,%,

$$K_н=100(U_{макс}-U_{мин})/ U_{ном},$$

где Uмакс, Uмин - наибольшее и наименьшее значение линейных напряжений трехфазной сети.

Для оценки неодинаковости напряжений используют также коэффициент, измеряемый отношением напряжения обратной последовательности U_2 к напряжению прямой последовательности U_1. Напряжение U_2 получают в результате расчета по данным измерений напряжений U_{12},U_{23} ,U_{31}.

При $U_1= U_{ном}$ коэффициент неодинаковости напряжений K_2, %,вычисляется по формуле

$$K_2= 100\ U_2/U_{ном}.$$

Ориентировочно $K_2 =(2/3)K_н$.

4. Коэффициент амплитудной модуляции напряжения $K_м$ %, определяемый по выражению

$$K_м = 100(U_{m\ макс} - U_{m\ мин})/2U_{m\ ном},$$

где $U_{m\ макс}$ - амплитуда наибольшего значения напряжения, $U_{m\ мин}$, $U_{m\ ном}$- амплитуды, соответственно, наименьшего и номинального напряжений сети (определяются путем осциллографирования напряжения).

5. Коэффициент нелинейных искажений (рассчитывается по формуле)

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

$$K_{ни} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{200} U_n^2}}{U_c},$$

где U_c - действующее значение напряжения сети, U_n - действующее значение напряжения гармонических составляющих n-го порядка, n - порядок высшей гармоники.

6. Кратковременное отклонение напряжения $\Delta U_к$, %, вычисляемое по формуле

$$\Delta U_k = 100(U_m - U_{ном})/U_{ном},$$

где U_m - наибольшее или наименьшее значение напряжения в переходном процессе, определяемое путем осциллографирования напряжения.

Кроме ΔU_K для характеристики кратковременного отклонения напряжения используют величину времени восстановления напряжения $t_{вU}$.

7. Кратковременное отклонение частоты Δf_K, %, которое вычисляется по формуле Δf_K -100 (f_m- $f_{ном}$)/$f_{ном}$, и время восстановления $t_{вf}$ частоты.

Нормы показателей качества электроэнергии

Нормы показателей качества электроэнергии согласно Правилам Украинского Морского Регистра судоходства приведены в таблица Е1.

Таблица Е1 Значения показателей качества электроэнергии

Показатель	Допустимое значение показателя	Примечания
Установившееся отклонение: - напряжения - частоты	(+6..-10)% ±5%	Для средств электроники ±10%
Кратковременное отклонение: - напряжения - частоты	±20% ±10%	Время восстановления напряжения не более 1,5 с Время восстановления частоты не более 5 с
Коэффициент искажения формы кривой напряжения судовой сети	10%	
Коэффициент несимметрии напряжений трехфазной сети		Разность токов фаз генераторов не должна превышать 15%
Коэффициент амплитудной модуляции напряжения	—	Практически рекомендуемая величина 1 %

Примечание. Для оборудования, постоянно подключенного к аккумуляторной батарее, допустимое отклонение напряжения составляет (+30...-20)%.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Обозначения отечественных подшипников

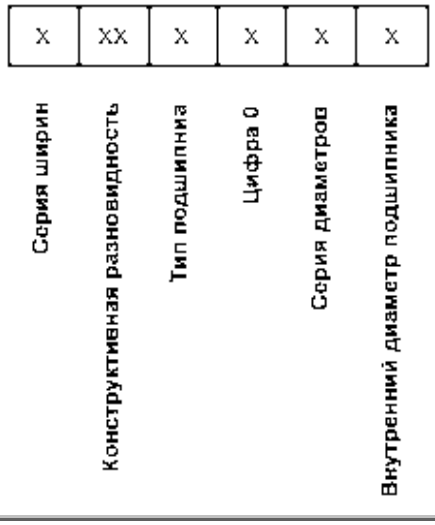
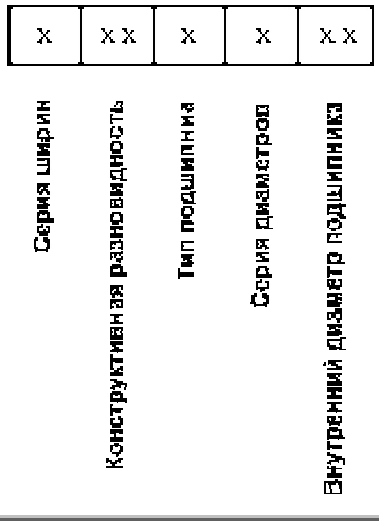
Маркировка подшипников состоит из условного обозначения и стандартизована в соответствии ГОСТ 3189-89 и условного обозначения завода-изготовителя.

Условные обозначение подшипника наносят на торцы колец клеймением, травлением или электроискровым способом. На наружной поверхности наружного кольца - электрохимическим травлением.

Условное обозначение на кольцах не наносят в ряде случаев для миниатюрных и прецизионных подшипников. Их записывают в сопроводительной документации и на упаковке.

Основное условное обозначение подшипника состоит из семи цифр основного условного обозначения (при нулевых значениях этих признаков оно сокращается до 2 знаков) и дополнительного обозначения, которое располагается слева и справа от основного. При этом дополнительное обозначение, расположенное слева от основного, всегда отделено знаком тире (—), а дополнительное обозначение, расположенное справа всегда начинается с какой-либо буквы. Чтение знаков основного и дополнительного обозначения производится справа налево.

Порядок расположения знаков основного условного обозначения соответствует одной из следующих схем:

Подшипники с внутренним **диаметром до 10 мм**, исключая подшипники с внутренним диаметром 0,6; 1,5; 2,5 мм:	Подшипники с внутренним **диаметром от 10 мм и более**, исключая подшипники с внутренним диаметром 22; 28; 32; 500 мм и более:
	

Обозначение диаметра отверстия

Знак, обозначающий диаметр отверстия схемы 1 с диаметром отверстия до 10 мм должен быть равен номинальному диаметру отверстия, кроме подшипников с диаметрами отверстий 0,6, 1,5 и 2,5 мм, которые обозначаются через дробь. Если диаметр отверстия подшипника — дробное число, кроме величин перечисленных ранее, то он имеет обозначение диаметра отверстия округлённого до целого числа, в этом случае в его условном обозначении на втором месте должна стоять

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

цифра 5. Двухрядные сферические радиальные подшипники с диаметром отверстия до 9 мм сохраняют условное обозначение по ГОСТ 5720.

Два знака, обозначающие диаметр отверстия схемы 2 с диаметром отверстия от 10 мм до 500 мм, если диаметр кратен 5, обозначаются частным от деления значения диаметра на 5.

Обозначение подшипников с диаметром отверстия 10, 12, 15 и 17 как 00, 01, 02, 03 соответственно. Если диаметр отверстия в диапазоне от 10 до 19 мм отличается от 10, 12, 15 и 17 мм, то ему присваивается обозначение ближайшего из указанных диаметров, при этом на третьем месте основного обозначения ставится цифра 9.

Диаметры отверстий 22, 28, 32 и 500 мм, обозначаются через дробь (например: 602/32 (д=32мм)

Диаметры отверстия, равные дробному или целому числу, но не кратное 5, обозначаются целым приближенным частным от деления значения диаметра на 5. В основное условное обозначение таких подшипников на третьем месте ставится цифра 9.

Подшипники имеющие диаметр отверстия 500 мм и более, внутренний диаметр обозначается как номинальный диаметр отверстия.

Обозначение размерных серий

Размерная серия подшипника — сочетание серий диаметров и ширин (высот), определяющее габаритные размеры подшипника. Для подшипников установлены следующие серии (ГОСТ 3478):

диаметров 0, 8, 9, 1, 7, 2, 3, 4, 5;

ширин и высот 7, 8, 9, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Перечень серий диаметров указан в порядке увеличения размера наружного диаметра подшипника при одинаковом внутреннем диаметре. Перечень серий ширин или высот указан в порядке увеличения размера ширины или высоты.

Серия 0 в обозначении не указывается.

Нестандартные подшипники по внутреннему диаметру или ширине (высоте) имеют обозначение серии диаметра 6, 7 или 8. Серия ширин (высот) в этом случае не проставляется.

Обозначение типов подшипников

Типы подшипников обозначаются согласно таблице Ж.1.

Обозначение конструктивного исполнения

Конструктивные исполнения для каждого типа подшипников, согласно ГОСТ 3395, обозначают цифрами от 00 до 99.

Знаки дополнительного обозначения

Слева от основного обозначения ставят знаки:

класс точности (7, 8, 0, 6X, 6, 5, 4, 2);

группа радиального зазора по ГОСТ 24810-81 (1, 2…9; для радиально-упорных шариковых подшипников обозначают степень преднатяга 1, 2, 3);

момент трения (1, 2…9);

категорию подшипников (А, В, С).

Справа от основного обозначения ставят знаки:

материал деталей подшипников (например, Е — сепаратор из пластических материалов, Ю — детали подшипников из нержавеющей стали,

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Я — подшипники из редко применяемых материалов (твёрдые сплавы, стекло, керамика и т. д.), W — детали подшипников из вакуумированной стали, А — обозначение подшипника повышенной грузоподъёмности, Х,Х1 — кольца и тела качения или только кольца (в том числе одно кольцо) из цементируемой стали, Р, Р1 — детали подшипников из теплостойких (быстрорежущих сталей), Г, Г1 — сепаратор из чёрных металлов, Б, Б1 — сепаратор из безоловянистой бронзы, Д, Д1 — сепаратор алюминиевого сплава, Н, Н1 — кольца и тела качения или только кольца (в том числе одно кольцо) из модифицированной жаропрочной стали (кроме подшипников радиальных роликовых сферических двухрядных), Э, Э1 — детали подшипника из стали марки ШХ со спецприсадками (ванадий, кобальт и др.).

- конструктивные изменения (например, К — конструктивные изменения деталей подшипников, М — роликовые подшипники с модифицированным контактом);
- требования к температуре отпуска (Т, Т1, Т2, Т3, Т4, Т5);
- смазочный материал, закладываемый в подшипники закрытого типа при их изготовлении (например, С1, С2, С3 и т. д.);
- требования по уровню вибрации (например, Ш1, Ш2, Ш3 и т. д.).

Таблица Ж.1 Обозначение типов подшипников.

Тип подшипника	Обозначение
Шариковый радиальный	0
Шариковый радиальный сферический	1
Роликовый радиальный с короткими цилиндрическими роликами	2
Роликовый радиальный сферический	3
Роликовый игольчатый или с длинными цилиндрическими роликами	4
Радиальный роликовый с витыми роликами	5
Радиально-упорный шариковый	6
Роликовый конический	7
Упорный или упорно-радиальный шариковый	8
Упорный или упорно-радиальный роликовый	9

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Библиографический список

1. Белов Д. В. Судовые электрические машины /Д.В. Белов, В. В . Кордюков, А.С. Титар. – Л.: Судостроение, 1972. – 388с.

2. Берков К.И. Справочник электромеханика по судовым электрическим машинам / К.И. Берлов, К.П. Котриков, В.Н. Васильев. – Одесса: Маяк. 1975. – 239 с.

3. Беспалов В. Я. Электрические машины: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений /В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 360с.

4. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. /Под ред. Р.Б. Уманцева. Л.: Энергоатомиздат. 1989. – 336 с.

5. Бургардт К. А. Корабельные электрические машины. Ч II. Машины переменного тока / К. А. Бургардт, Р. П. Просужих. – Учебник. – ВВМИОЛУ имени Ф. Э. Дзержинского, 1980. – 459 с.

6. Загірняк М. В. Єлектричні машини. 4.3. Асинхронні машини. 4.4. Синхронні машини / М. В. Загірняк, В.І. Невзлін: Навчальний посібник – К.: ІСДО, 1996. – 196с.

7. Иванов – Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов./А. В. Иванов – Смоленский – М.: Изд - МЭИ, 2004. – 680с.

8. Копылов И. П. Электрические машины: учебник для студентов электромехан. и электроэнерг. вузов /И. П. Копылов. – М.: Высш. шк.: , 2004. – 360с.

9. Железняков А.Т. Справочник по ремонту электрооборудования на судах / А.Т. Железняков. – Л.: Судостроение, 1982. – 124 с.

10. Котриков К.П. Эксплуатация и ремонт судовых электрических машин. /В.Н. Васильев, И.С. Мирошниченко. – М.: Транспорт, 1981. – 224 с.

11. Кузнецов С.Е. Техническая эксплуатация судового электрооборудования. /С.Е. Кузнецов, Л.А. Лемин, Ю.В. Кудрявцев, А.В. Пруссаков, Д.В. Исаков. – М.Проспект, 2010. – 512 с.

12. Лазаревский Н.А. Дефектация судовых электрических машин и преобразователей. /Н.А. Лазаревский, В.А. Шафранский. – Л.: Судостроение, 1990. – 96 с.

13. Маршак Е.Л. Ремонт и модернизация асинхронных двигателей /Е.Л. Маршак. – М.: Энергия,1970. – 280 с.

14. Международная Конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты, 1978 года с Кодексом 1995 года (ПДНВ 78/95).

15. Мезин Е. К. Судовые электрические машины. – Учебник. – Л.: Судостроение, 1985. – 320с.

16. Могильников В. С. Теория, технология и режимы работы асинхронных двигателей с двухслойным ротором. Издание второе дополненное и переработанное /В. С. Могильников, А. М. Олейников – Севастополь: Изд. СевНТУ, 2008. – 350с.

17. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэлектрогенераторы /В.С. Кривцов, А.М Олейников, А.И Яковлев. – Учебник. – Харьков: национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», Севастополь: Севастопольский национальный технический университет, 2003. – 400с.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

18. Проектирование электрических машин: Учеб. для втузов /О. О. Гольдберг, Я.С. Гурин, И. С. Свириденко,; под редакцией Гольдберга О. Д. – М.: Высшая школа, 2001. – 430с.

19. Олейников А.М. Трансформаторы. Лекция /А. М. Олейников, Э. А. Вильсон, М. Ф. Гришко. – Севастополь: СВВМИУ, 1976. – 61 с.

20. Олейников А. М. Проектирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором /А. М. Олейников, А. И. Тищенко Учебное пособие - Херсон: Олди-плюс, 2000. – 150с.

21. Пипченко А.Н. Электрооборудование , электронная аппаратура и системы управления. /А.Н. Пипченко, В.В. Пономаренко, Ю.И. Теплов, А.В. Романенко. Учеб. пособие.- Одесса, 2005. – 370 с.

22. Правила технической эксплуатации морских и речных судов. Электрооборудование. КНДЗ 31.2.002.07-96. – 1996. – 112 с.

23. Правила классификации и постройки морских судов. Том 2. – СПб: Российский Морской Регистр Судоходства, 2008.- 690с.

24. Просужих Р. П. Основы электротехники и электрооборудование кораблей /Р. П. Просужих, А. М. Олейников, А. А. Беркун. – Учебник. – Севастополь: СВВМИУ, 1990. – 348 с.

25. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Учебное пособие. – Севастополь: СВВМИУ, 1983. – 249 с.

26. Просужих Р. П. Расчет трехфазных трансформаторов /Р. П. Просужих, Н. М. Шайтор. – Учебно-методич. пособие. – Севастополь. СНИЯЭиП, 2003. – 72 с.

27. Путилин К. П. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие /К. П. Путилин, Н. А. Петерсон – Севастополь.: СНУЯиП, 2008. – 260с.

28. Радин В. И. Электрические машины. Асинхронные машины/В. И. Радин, Д. Е. Брускин, А. Е. Зохорович, - М.: Высш. шк. 1998. – 350с.

29. Роджеро Н.И. Справочник судового электромеханика и электрика / Н.И.Роджеро. - М.: Транспорт, 1986. – 319 с.

30. Сюбаев М.А. Эксплуатация судового электрооборудования. / М.А. Сюбаев. – СПб.: Элмор, 1999. – 48 с.

31. Хайдуков О.П. Эксплуатация электроэнергетических систем морских судов: Справочник /О.П. Хайдуков, А.Н. Дмитриев, Г.Н. Запорожцев – М.: Транспорт, 1988. – 211 с.

32. Лемин Л.А. Эксплуатация судовых систем электроснабжения/Л.А. Лемин, А.В. Пруссаков, А.Н. Григорьев, уч. пособие. – СПб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2006. – 184 с.

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Предисловие……..…….....3
Введение. Условия работы, особенности конструкции
судовых электрических машин ……..……4
Глава 1. Устройство и принцип действия машин постоянного тока.
Физика основных взаимодействий……...…...6
1.1. Принцип действия машин постоянного тока…….....6
1.2. Устройство машины постоянного тока…….……..8
1.3. Обмотки якорей машин постоянного тока……..……...12
1.3.1. Принципы построения обмоток ..……..……...12
1.3.2. Простая петлевая обмотка…….....14
1.3.3. Принципы построения сложной петлевой обмотки ….....16
1.3.4. Простая волновая обмотка…….....17
1.3.5. Принципы построения сложной волновой обмотки…….19
1.4.Электродвижущая сила якоря и электромагнитный
момент…… ……..…..……19
1.5. Принципы расчета магнитной цепи машины
постоянного тока ……..…21
1.6. Реакция якоря машины постоянного тока ..……..23
1.7. Коммутация в машинах постоянного тока……...…….....25
1.7.1. Физические процессы коммутации……25
1.7.2. Причины и степени искрения…….…….....29
1.7.3. Средства улучшения коммутации……...30
1.8. Потери мощности и КПД машин постоянного тока…….....33
1.9. Щетки электрических машин…….……...34
1.10. Обозначения выводов и схемы соединений
электрических машин постоянного тока……..36
1.11. Установка щеточной траверсы относительно
нейтрали машины …….……...……..….38
1.12.Вопросы для самопрверки и контроля знаний .....…..41
Глава 2. Генераторы постоянного тока ……..…..….42
2.1. Основные соотношения и классификация генераторов
постоянного тока……...42
2.2. Уравнения электрического и механического
равновесия генераторов постоянного тока…….43
2.3. Характеристики генераторов независимого
возбуждения……..……44
2.4. Генераторы параллельного возбуждения …….... 48
2.4.1. Условия самовозбуждения генератора…….....48
2.4.2. Характеристики генератора параллельного
возбуждения……...50
2.5. Генераторы последовательного возбуждения ……..… 51
2.6. Генераторы смешанного возбуждения……52
2.7. Параллельная работа генераторов …….. 54
2.8. Электромашинные усилители……..…58
2.9. Серии судовых генераторов постоянного тока…….....60
2.10. Вопросы для самопрверки и контроля знаний 61
Глава 3. Электродвигатели постоянного тока ……..…….....62
3.1. Общие сведения о двигателях постоянного тока.....…62
3.2. Характеристики двигателей параллельного
возбуждения……...64
3.3. Характеристики двигателей последовательного
возбуждения……...……..…..66

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

СЕВАСТОПОЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

3.4. Характеристики двигателей смешанного возбуждения……..68
3.5. Серии судовых двигателей постоянного тока…..…69
3.6. Вопросы для самопроверки и контроля знаний……..…70
Глава 4. Судовые трансформаторы……...72
4.1. Устройство и принцип действия трансформатора……...72
4.1.1. Классификация и устройство трансформаторов……...72
4.1.2. Принцип действия трансформатора……..…….73
4.1.3. Напряжения и ЭДС в трансформаторе при холостом ходе…….....…….....74
4.2. Режимы работы трансформатора…...……..…75
4.2.1. Холостой ход однофазного трансформатора…....…75
4.2.2. Работа трансформатора под нагрузкой…..….....…77
4.2.3. Режим короткого замыкания…….....80
4.3. Приведенный трансформатор……...…..……....80
4.3.1. Приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной……..……..……...80
4.3.2. Схема замещения и уравнения электрического равновесия приведенного трансформатора……...…81
4.3.3. Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора……83
4.3.4. Упрощенная векторная диаграмма приведенного трансформатора..……...……..85
4.4. Рабочие характеристики трансформатора……...85
4.4.1. Зависимость вторичного напряжения трансформатора от величины и характера нагрузки……..85
4.4.2. Внешняя характеристика трансформатора……....87
4.4.3. Потери в трансформаторе и его КПД……..…88
4.5. Понятие о трехфазных и специальных трансформаторах...89
4.5.1. Трехфазные трансформаторы……..……89
4.5.2. Автотрансформатор…….90
4.5.3. Сварочные трансформаторы……...92
4.5.4. Измерительные трансформаторы……..92
4.6. Обозначения выводов и группы соединения трансформаторов……..93
4.7. Параллельная работа трансформаторов……...94
4.8. Вопросы для самопрверки и контроля знаний……96
Глава 5. Общие вопросы теории машин переменного тока……. 97
5.1. Основные элементы конструкции электрических машин переменного тока……..……..……..…97
5.1.1. Общие законы электромеханики ……..……..... 97
5.1.2. Конструктивная схема синхронной машины…….. 98
5.1.3. Устройство асинхронного двигателя……..... 99
5.2. Трехфазные обмотки электрических машин переменного тока……..……100
5.2.1. Принцип построения обмотки……..……..100
5.2.2. Параметры обмоток……..……102
5.2.3. Двухслойные обмотки……...103
5.3. Электродвижущая сила в обмотках машин переменного тока……...……..……..…….104
5.4. Вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки машин переменного тока……109

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

5.5. Обозначения выводов машин переменного тока……114
5.6. Вопросы для самопроверки и контроля знаний……116
Глава 6. Асинхронные электродвигатели……...117
6.1. Принцип действия асинхронного двигателя……..117
6.2. Режимы работы асинхронного двигателя……..……119
6.2.1. Режим холостого хода при заторможенном роторе……119
6.2.2. Режим короткого замыкания АД……..……121
6.2.3. Рабочий режим асинхронного двигателя ……....122
6.3. Приведение вращающегося ротора к эквивалентному неподвижному ротору. Схема замещения и векторная диаграмма приведенного АД…..……123
6.4. Энергетическая диаграмма и механическая характеристика асинхронного двигателя……..……126
6.4.1. Энергетическая диаграмма. Коэффициент полезного действия АД……126
6.4.2. Вращающий момент АД ……..……..…….....127
6.4.3. Механическая характеристика АД…….....128
6.4.4. Зависимость вращающего момента $M_{эм}$ от сопротивления r_2' 130
6.5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя…….131
6.6. Проблемные режимы работы судовых асинхронных двигателей……132
6.6.1. Проблемы пуска АД……...…….....133
6.6.2. Способы пуска судовых АД……..……...134
6.6.3. Применение АД с улучшенными пусковыми характеристиками…….....…..……..136
6.6.4. Обрыв фазы обмотки статора……..…….....140
6.6.5. Реверс двигателя и работа при «вывернутой» фазе……141
6.6.6. Влияние качества электроэнергии на работу судовых асинхронных двигателей……141
6.6.6.1. Общая оценка влияния качества электроэнергии……..141
6.6.6.2. Работа АД при неноминальном напряжении судовой сети……..142
6.6.6.3. Работа АД при неноминальной частоте судовой сети……..144
6.6.6.4. Характер изменения тока статора АД при нагрузке и одновременном изменении напряжения и частоты 145
6.7. Регулирование скорости вращения судовых АД…….....148
6.7.1. Способы регулирования……..…….....148
6.7.2. Регулированием изменением подводимого напряжения……...148
6.7.3. Регулированием изменением активного сопротивления цепи ротора……...149
6.7.4. Регулированием изменением частоты питающей сети……150
6.7.5. Регулированием изменением числа пар полюсов ……..151
6.8. Реверсирование и электрическое торможение АД……..152
6.9. Однофазные асинхронные двигатели……154
6.9.1. Принцип действия однофазного АД…….....154

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

СЕВАСТОПОЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

6.9.2. Схемы включения АД в однофазную сеть…….....155
6.10. Экранированные асинхронные двигатели……156
6.11. Серии судовых асинхронных двигателей…….....157
6.12. Вопросы для самопроверки и контроля знаний……...163
Глава 7. Синхронные машины……..……..…….……..164
7.1. Принцип действия, устройство и классификация синхронных машин…….……..……...164
7.1.1. Общие сведения о синхронных машинах……...…164
7.1.2. Принцип действия синхронного генератора……....165
7.1.3. Классификация синхронных машин..……..166
7.1.4. Устройство синхронных машин……. 167
7.1.5. Особенности устройства бесщеточного синхронного генератора……..……..……170
7.2. Реакция якоря в синхронном генераторе при симметричной нагрузке……..……172
7.2.1. Общее представление о реакции якоря…….....172
7.2.2. Реакция якоря СГ при различных по характеру нагрузках……..……..……..172
7.3. Параметры СГ в установившемся режиме работы……176
7.3.1. Составляющие магнитных потоков…….……176
7.3.2. Индуктивное сопротивление рассеяния..……176
7.3.3. Индуктивное сопротивление реакции якоря…..…… … 177
7.3.4. Активное сопротивление фазы статора…….....178
7.3.5. Схема замещения неявнополюсного СГ…….....178
7.3.6. Система относительных единиц……..……179
7.4. Уравнения электрического равновесия и векторные диаграммы СГ…….....180
7.4.1. Неявнополюсный .СГ……..…….....180
7.4.2. Явнополюсный СГ……...…….....182
7.4.3. Векторная диаграмма насыщенного неявно полюсного СГ (диаграмма Потье)……....……...…183
7.4.4. Изменение напряжения СГ при изменении нагрузки…….....185
7.4.5. Определение изменения напряжения СГ по векторным диаграммам……...……...……186
7.5. Характеристики синхронных генераторов…..……..….188
7.5.1. Общие определения характеристик……188
7.5.2. Основные характеристики СГ……..……188
7.6. Определение параметров СГ……..……..……..……192
7.7. Потери и К.П.Д. синхронных машин…..…….....194
7.8. Схемы возбуждения синхронных генераторов……..195
7.8.1. Принцип построения систем возбуждения…….....195
7.8.2. Процесс самовозбуждения СГ……..……196
7.8.3. Особенности возбуждения бесщеточных СГ…..…....198
7.9. Вопросы для самопроверки и контроля знаний…….....200
Глава 8. Параллельная работа судовых синхронных генераторов……..201
8.1. Преимущества и недостатки параллельной работы генераторов……....……..201
8.2. Включение судовых синхронных генераторов на параллельную работу…....……..201

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

8.2.1. Особенности работы СГ на сеть большой мощноти……...201
8.2.2. Условия включения СГ на параллельную работу……...202
8.2.3. Физические процессы в СГ при нарушении условий синхронизации……..…..……204
8.2.4. Способы синхронизации……..…….……206
8.3. Регулирование активной мощности при работе генератора с сетью……..…….……209
8.4. Угловая характеристика неявнополюсного синхронного генератора……...…...……211
8.5. Статическая и динамическая устойчивость параллельной работы СГ с сетью…...……..……..213
8.6. Угловая характеристика явнополюсного синхронного генератора……...……..216
8.7. Регулирование реактивной мощности СГ при параллельной работе с сетью……..……218
8.8. Переход синхронной машины в двигательный режим работы……..…….……221
8.9. Особенности параллельной работы генераторов соизмеримой мощности……..…225
8.10. Вопросы для самопроверки и контроля знаний……...226
Глава 9. Переходные процессы в судовых электрических машинах переменного тока……228
9.1. Общее описание переходных процессов……228
9.1.1. Сущность переходных процессов…….....228
9.1.2. Общее описание переходных процессов при коротком замыкании…….…...…...228
9.1.3. Короткое замыкание в цепи r – L.…….....229
9.2. Переходные процессы в судовых трансформаторах…….230
9.2.1. Переходные процессы при включении трансформатора в сеть…..……..…230
9.2.2. Изменение тока включения трансформаторас учетом насыщени…..……...……233
9.2.3. Внезапное короткое замыкание трансформатора……...234
9.2.4. Действие токов короткого замыкания……..……...…237
9.2.5. Витковое короткое замыкание в обмотках ……237
9.3. Переходные процессы в асинхронных двигателях…..…. 238
9.3.1. Общие представления о переходных процессах в асинхронных двигателях……...…..238
9.3.2. Пуск асинхронного двигателя в ход……239
9.4. Переходные процессы в синхронном генераторе при коротком замыкании……..……..……...242
9.4.1. О постоянстве потокосцеплений в сверхпроводящем контуре……242
9.4.2. Симметричное внезапное короткое замыкание СГ……244
9.4.3. Апериодическое внезапное короткое замыкание СГ……246
9.4.4.Переходные и сверхпереходные индуктивные сопротивления……..……248
9.4.5. Величина токов внезапного короткого замыкания СГ……...249
9.5. Вопросы для самопроверки и контроля знаний…….249

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

Глава 10. Техническая эксплуатация судовых электрических машин……..……...…251
10.1. Основные понятия, определения и задачи технической эксплуатации судовых электрических машин…… 251
10.1.1. Основные понятия и определения…….…….…….251
10.1.2. Общие положения по организации эксплуатации судового электрооборудования……..……..253
10.1.3. Нормативная документация по обеспечению технической эксплуатации судового электрооборудования…….....253
10.1.4. Обязанности электротехнического персонала…..255
102. Техническое использование судовых генераторов..256
10.2.1. Общие положения…….256
10.2.2. Ввод в действие генератора для автономной работы…….……...257
10.2.3. Ввод в действие генераторов постоянного тока для параллельной работы……258
10.2.4. Ввод в действие синхронного генератора для параллельной работы……...259
10.2.5. Вывод из действия генераторов……..261
10.3. Техническое использование гребных электрических установок……..…….……..……..……261
10.4. Техническое использование электроприводов вспомогательных механизмов и устройств……...263
10.5. Техническое обслуживание судовых электрических машин……..…....265
10.5.1 Общие требования по техническому обслуживанию судового электрооборудования…….……265
10.5.2. Общие положения технического обслуживания судовых электрических машин……..267
10.5.3. Техническое обслуживание генераторов……..267
10.5.4. Контроль и поддержка требуемого уровня сопротивления изоляции судовых электрических маши…….….268
10.5.5. Проверка степени нагрева СЭМ…….288
10.5.6. Контроль состояния подшипников качения…….291
10.5.7. Контроль уровня вибрации СЭМ……...298
10.5.8. Контроль состояния коллектора (колец)……...303
10.5.9. Проверка щеточного аппарата……308
10.5.10. Проверка правильности включения обмоток…..312
10.5.11. Определение повреждений обмоток машин переменного тока……318
10.5.12. Повреждения обмоток машин постоянного тока.…….…327
10.5.13. Разборка и сборка судовых электрических машин….331
10.5.14. Замена подшипников качения……..342
10.5.15. Эксплуатация систем охлаждения судовых электромашин……..345
10.5.16. Контроль воздушного зазора…….……...347
10.6. Техническое использование и обслуживание трансформаторов ……351
10.7. Вопросы для самопроверки и контроля знаний..…351

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)

СЕВАСТОПОЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Приложение А. Базисные и производные единицы системы СИ, их обозначение и формула……353
Приложение Б. Классификация электроизоляционных материалов по нагревостойкости……...354
Приложение В. Допустимые превышения температур электрических машин……..…….355
Приложение Г. Характеристика лаков, эмалей, компаундов..357
Приложение Д. Нормы сопротивления изоляции электрооборудования судов……359
Приложение Е. Показатели качества электроэнергии…….…360
Приложение Ж. Обозначения отечественных подшипников..362
Библиографический список……..……..365
Содержание…….……..……367

Print to PDF without this message by purchasing novaPDF (http://www.novapdf.com/)