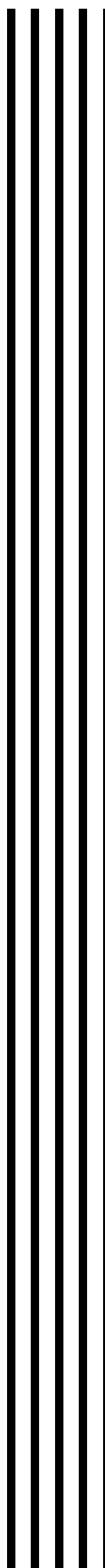


Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам по дисциплине
“Электрические машины”

для студентов

направления 6.050702 - ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

всех форм обучения

Часть 1

“Машины постоянного тока”

Севастополь
2009



УДК 621.313(07)
М 545

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине “Электрические машины” для студентов всех форм обучения направления 6.050702 – «Электромеханика»/ разраб. А.М.Олейников, Ж.Ю. Слепушкина, В.В. Алаев. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. - Ч.1: Машины постоянного тока. - 72с.

Цель методических указаний: оказать помощь студентам при подготовке и проведении лабораторных работ по курсу “Электрические машины”, ознакомить их с методами контроля правильности работы электрических машин и проведением опытных исследований. В методических указаниях приведены основные теоретические сведения, описание лабораторных установок и используемого оборудования, даны порядок проведения экспериментальных исследований и контрольные вопросы по рассматриваемым темам.

Методические указания утверждены на заседании кафедры "Судовые и промышленные электромеханические системы", протокол № 6 от 17.04.2008 г.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

Рецензент: доктор техн. наук, проф. Коноплев К.Г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Подготовка к лабораторной работе и порядок.....	5
ее проведения	
2 Правила техники электробезопасности.....	7
3 Лабораторная работа № 1.....	10
4 Лабораторная работа № 2.....	18
5 Лабораторная работа № 3.....	28
6 Лабораторная работа № 4.....	42
7 Лабораторная работа № 5.....	49
8 Лабораторная работа № 6.....	60
Библиографический список.....	71

ВВЕДЕНИЕ

Основным способом практического освоения и закрепления теоретического материала по дисциплине «Электрические машины» является выполнение лабораторных работ. Они позволяют студентам углубить полученные на лекциях теоретические знания, овладеть практическими навыками по обслуживанию, диагностике и устранению неисправностей Электрических машин и другого электрооборудования. Кроме того, занятия в лаборатории позволяют на практике ознакомиться с методами научных исследований, способствуют развитию у студентов творческой инициативы и самостоятельности в работе, знакомят их с реальными условиями и требованиями эксплуатации судового электрооборудования.

Основой для проведения лабораторных занятий является самостоятельное изучение студентами устройства, свойств и правил эксплуатации электрических машин непосредственно на образцах машин, исследование их в составе лабораторных установок и стендов.

Предлагаемое методическое указание призвано помочь студентам в подготовке и проведении лабораторных занятий. В нем содержатся основные теоретические положения, описания лабораторных работ, составленных применительно к программе курса «Электрические машины», а конкретно к той части, которая касается машин постоянного тока, и соответствующим лабораторным установкам. В каждом описании изложены тема, учебная цель и методика выполнения работы, приведены примерные результаты выполненных графиков и методика их анализа. Кроме того, в пособии изложены необходимые сведения по технике безопасности, устройству и правилам оформления отчетов. Для самопроверки, подготовки к защите и сдаче модулей по дисциплине студентам предлагается примерный перечень вопросов по каждой лабораторной работе.

1 Подготовка к лабораторной работе и порядок ее проведения

Эффективность выполнения и защиты лабораторной работы обусловлена качеством подготовки к ней каждого студента. Подготовку целесообразно организовывать в лаборатории в часы самостоятельных занятий или часы, предусмотренные расписанием для консультаций по предмету.

При подготовке необходимо:

- ознакомиться с целью и программой работы;
- повторить теоретические положения по теме работы и продумать последовательность выполнения экспериментов с учетом рекомендаций настоящего пособия;
- подготовить бланк отчета, в котором должны быть записаны название и цель работы, начерчена электрическая схема установки с указанием элементов изображенных на схеме, подготовлены таблицы для записи наблюдений.

Для выполнения лабораторных работ группа разбивается на бригады по 3-4 студента, исходя из количества лабораторных установок. В бригаде на каждую лабораторную работу назначается старший. Методика подготовки и проведения лабораторного занятия состоит в следующем.

1. На предшествующем занятии преподаватель объявляет, какая бригада какую лабораторную работу будет выполнять.

2. Перед началом лабораторного занятия преподаватель в течение 10-15 минут проверяет степень подготовленности студентов к занятию, дает необходимые указания и напоминает о правилах техники безопасности. (На первом лабораторном занятии в каждом семестре должен быть проведен подробный инструктаж по технике безопасности. При этом студенты, получившие инструктаж, и преподаватель, проводивший инструктаж, должны расписаться в специальном журнале, который хранится в лаборатории).

Неподготовленные студенты к выполнению работы не допускаются и по указанию преподавателя приступают к изучению соответствующего материала.

3. В начале работы студенты, ознакомившись с используемыми в лабораторной установке электрическими машинами, измерительными приборами и другим оборудованием, записывают их номинальные данные и проверяют соответствие приборов ожидаемым значениям измеряемых величин.

К номинальным данным оборудования относятся:

- для электрических машин – наименование, тип, номер, схема соединения обмоток, номинальные значения мощности, напряжения, частоты вращения, тока якоря, а также частоты тока и коэффициента мощности для машин переменного тока;
- для измерительных приборов – наименование, система, класс точности, пределы измерения, заводской номер;

- для реостатов, катушек индуктивности, конденсаторов, коммутационных аппаратов – наименование, тип и другие, указанные на табличке номинальные данные.

4. Затем, для лучшего понимания происходящих процессов, электрическая схема установки должна быть мысленно разделена на цепь главного тока (например, тока якоря машины) со всеми ее элементами, на цепь обмотки возбуждения, а также на вспомогательные цепи управления, сигнализации и т.п. Это позволяет понять, как подключается машина к питанию, и какова должна быть последовательность действий при дальнейшем выполнении работы, что сокращает вероятность ошибок, время на реализацию задания и повышает эффективность обучения.

5. Старший подгруппы предупреждает преподавателя или инженера о готовности бригады выполнять лабораторную работу и только после получения их разрешения может вместе со своей бригадой включать лабораторную установку к напряжению питания.

В момент включения необходимо наблюдать за показаниями приборов и направлением вращения вала машины. При неправильном или недопустимо большом отклонении стрелок приборов, а также при неправильном направлении вращения схема должна быть немедленно отключена от сети, преподаватель и инженер должны быть уведомлены о обнаруженных неисправностях.

6. Далее студенты под руководством старшего подгруппы приступают к выполнению программы работы в порядке и в соответствии с указаниями, изложенными в описании соответствующей лабораторной работы.

Каждая группа студентов при выполнении работы ведет один протокол, в котором записываются состав группы, результаты наблюдений и другие сведения, предусмотренные описанием. Особое внимание следует обращать на осмысленное, а не механическое выполнение каждой операции, стремиться понять физическую сущность происходящих в электрических машинах и аппаратах явлений. Установив пределы измерений приборов, необходимо определить и записать цену их делений. Запись показаний в этом случае можно вести в делениях шкалы, а при обработке результата опыта необходимо умножить число делений на соответствующую цену делений. Снятие показаний приборов рекомендуется производить одновременно по команде старшего бригады.

7. После выполнения задания схема приводится в исходное состояние, старший подгруппы докладывает об этом преподавателю, предъявляет ему результаты работы для проверки. Далее старший сдает рабочее место инженеру и организует оформление отчетов студентами своей бригады.

Каждый студент составляет отчет по лабораторной работе в индивидуальном порядке на листах формата А4. Отчет составляется от руки или печатным способом, а схемы и графики аккуратно выполняются карандашом с помощью линейки, циркуля и транспортиров с использованием стандартных электротехнических обозначений с соблюдением требований ЕСКД и ДСТУ. Измеренные и вычисленные величины записываются в

подготовленные для этой цели таблицы. В отчете обязательно должны быть приведены все расчетные формулы с подстановкой цифр и результатов расчета для одного из реальных режимов работы схемы. Опытные и расчетные данные наносят на график в виде отчетливых точек, звездочек или кружков при этом для каждой зависимости применяют свои обозначения. По точкам и между точками проводят плавную кривую или прямую линию, выражающую функциональную зависимость. Размер графиков не должен быть меньше 10×10 см.

В конце отчета пишутся выводы. Выводы должны содержать конкретный анализ полученных результатов по каждому пункту программы, особые свойства машин и оценку эксплуатационных качеств. При этом следует отметить, какие явления и процессы наблюдались, и каковы причины их возникновения.

Внимание! Порядок выполнения работы у стенда выделен **жирным шрифтом!**

2 Правила техники электробезопасности

Степень физиологического воздействия на организм человека электрического тока, который является непосредственной причиной поражения при электротравме, определяется в основном его величиной, частотой, длительностью воздействия и зависит от пути тока через тело человека. Наиболее вероятные пути протекания тока: «рука-рука», «нога-нога», «рука-ноги». При этом электрическое сопротивление тела на пути тока колеблется в широких пределах и зависит от многих факторов, в частности, от влажности и чистоты кожи, от величины поверхности соприкосновения и плотности контакта, и от общего состояния человека. Следует отметить, что наиболее опасны прикосновение токоведущих частей электрооборудования к коже лица, шеи, туловища, тыльной стороны рук и т. д., где электрическое сопротивление кожи человека очень мало.

Безопасным током промышленной частоты 50 Гц при длительном воздействии на человека принимается величина 0,001А, при воздействии 30с – 0,006А; 1с – 0,065А; 0,2 с – 0,25А. Такие величины тока при принятом по документам сопротивлении тела человека 1000 Ом достигаются уже при напряжения 12 В приложенном к телу. В лаборатории величина напряжения достигает 400В, и, безусловно, является опасной для жизни. Поэтому при выполнении лабораторных работ студенты обязаны строжайшим образом выполнять инструкцию по технике безопасности.

Инструкция по технике безопасности при проведении занятий в электротехнической лаборатории

I. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Перед началом занятий преподаватель или ответственный руководитель должен напомнить студентам настоящую инструкцию и основные правила техники безопасности.

II. ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ

1. Сборка схемы должна производиться только при полном снятии напряжения.

2. Студент должен расположиться таким образом, чтобы лабораторная установка постоянно находилась в зоне его прямой видимости.

3. На рабочем месте студента должен находиться диэлектрический пол (и/или коврик). Инструменты должны быть с изолированными ручками.

III. ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

1. Запрещается производить включение схемы под напряжение без разрешения преподавателя. Студенты, нарушающие указанное правило, удаляются из лаборатории и привлекаются к дисциплинарной ответственности.

2. Нельзя касаться незащищенными руками токоведущих частей (контактов, обмоток проволочных реостатов и т. д.), когда цепь находится под напряжением.

3. Категорически запрещается делать какие – либо переключения или изменения в схеме, когда она находится под напряжением.

4. Включение цепи, переключение приборов и выключателей, перемещение движков реостатов производить одной рукой, не касаясь другой металлических и неизолированных частей и предупреждать бригаду командой: **«Включаю»** или **«Подаю напряжение»**.

5. При работе с вращающимися преобразовательными агрегатами соблюдать особую осторожность, помня, что вращающийся вал способен «захватывать» мягкие предметы одежды и привести к несчастному случаю.

6. Категорически запрещается какие-либо включения, переключения и т.п. на щитах и установках, не входящих в комплект оборудования выполняемой работы.

IV. ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ

1. Закончив работу, студент обязан привести схему в исходное состояние, отключить напряжение от лабораторной установки, доложить преподавателю или инженеру об окончании работы и предъявить таблицы результатов.

2. Привести в порядок рабочее место: аккуратно сложить приборы, аппараты, переносные кабели и провода, убрать секундомеры, индикаторы напряжения и т.п. в отведенное для этой цели место или сдать инженеру. Соблюдать чистоту в районе лабораторной установки.

3. Получив разрешение, оставить рабочее место и приступить к обработке полученных результатов.

V. ПОВЕДЕНИЕ ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

1. О всякой замеченной опасности или неисправности в работе лабораторной установки необходимо оповестить преподавателя или инженера.

2. При возникновении, каких-либо ненормальностей в работе схемы, а также при исчезновении напряжения необходимо отключить установку от источника питания и доложить преподавателю или инженеру.

3. Студентам запрещается производить какие-либо ремонтные работы установки или щитов питания. При перегорании предохранителей или при срабатывании автоматических выключателей необходимо доложить преподавателю или инженеру.

4. **При попадании человека под напряжение надо немедленно обесточить установку.** Если обесточить нельзя, надо за одежду оттащить пострадавшего от источника питания, не касаясь его голыми руками, и послать за врачом. Если пострадавший находится в сознании, обеспечить ему полный покой. При отсутствии у пострадавшего дыхания и пульса **немедленно** начать искусственное дыхание и непрямой массаж сердца и продолжать их непрерывно до прибытия врача.

VI. ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА НАРУШЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ИНСТРУКЦИИ

Лица, нарушившие требования данной инструкции, несут дисциплинарную, а в некоторых случаях и уголовную ответственность. Студенты, изучившие правила техники безопасности, расписываются в специальном журнале, хранящемся в лаборатории, и только после этого допускаются к выполнению лабораторных работ в данном семестре.

3 Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить конструкцию машины постоянного тока (МПТ).
2. Изучить принцип действия машины постоянного тока.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

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 закона электромагнитных сил.

Схематично устройство машины представлено на рисунке 3.1, при этом МПТ состоит 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.

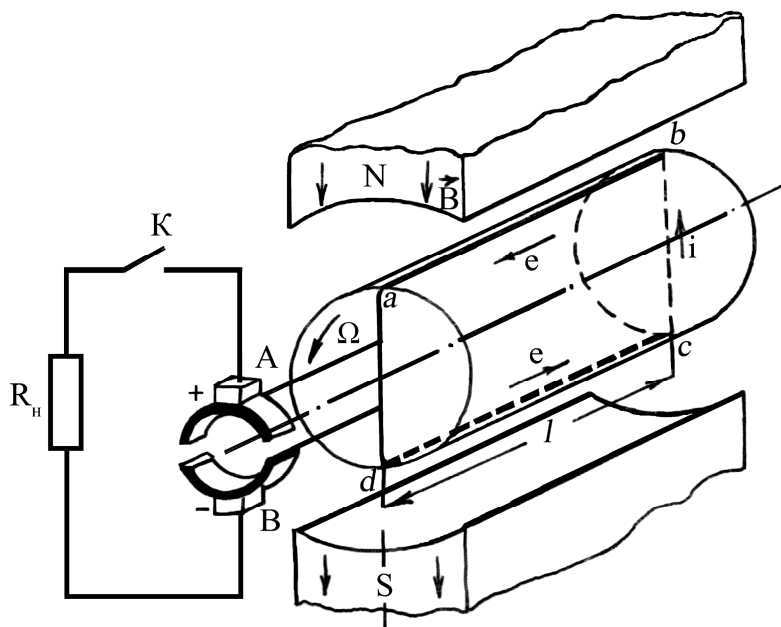


Рисунок 3.1 – Принцип работы машины постоянного тока

При вращении якоря в соответствии с законом электромагнитной индукции в проводниках витка **ab** и **cd** при пересечении ими магнитного поля будет индуцироваться ЭДС, которая при наличии стального цилиндра равна

$$e = Blv, \quad (3.1)$$

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

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, то ЭДС витка будет

$$e_v = 2e_{np}. \quad (3.2)$$

Характер изменения во времени ЭДС в проводнике при вращении определяется характером распределения индукции в зазоре. Распределение ее по окружности якоря неравномерное, так как магнитное сопротивление R_μ потоку различное. Под полюсами индукция B имеет максимальное значение, в промежутке между полюсами индукция уменьшается, достигая на линии qq нулевого значения (рисунок 3.2,а). Линия dd , проходящая через центр якоря вдоль полюсов, называется продольной осью машины, а линия qq , проходящая через центр якоря посередине между полюсами, – поперечной. Поперечную ось также называют геометрической нейтралью. Часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс, называют полюсным делением и обозначают τ .

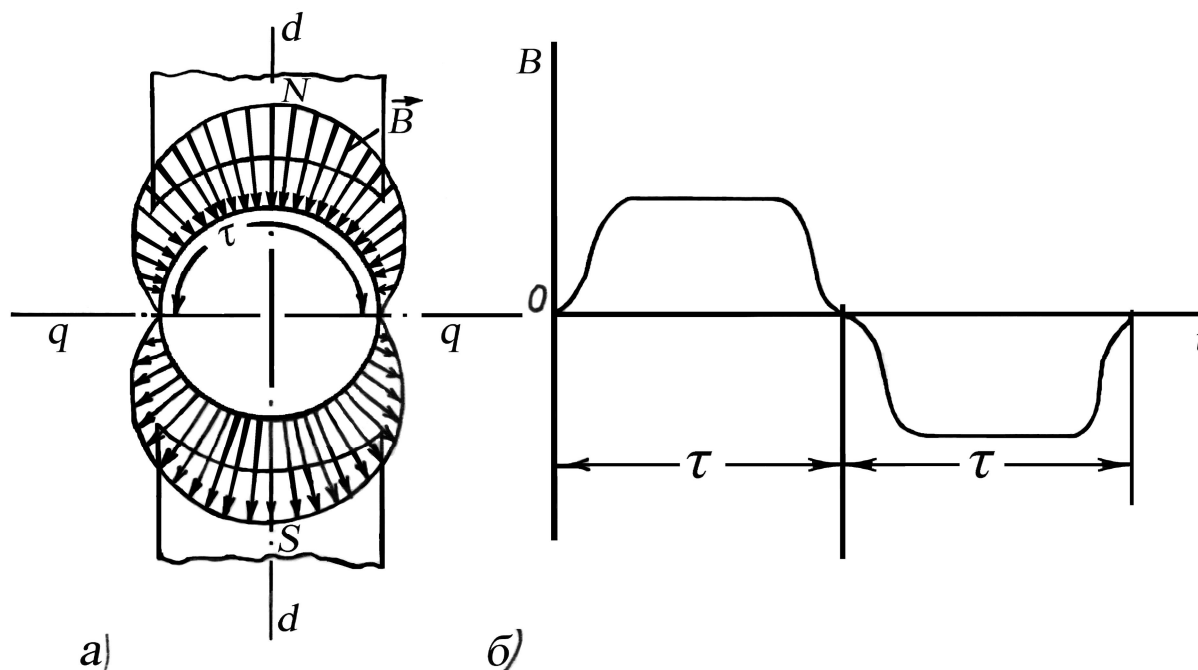


Рисунок 3.2 – Распределение магнитной индукции в зазоре МПТ

При вращении якоря через каждые пол-оборота проводники ab и cd оказываются в поле противоположных полюсов. Поэтому направление ЭДС в них меняется на противоположное. Таким образом, при вращении якоря в витке индуцируется переменная ЭДС. Для получения во внешней цепи по-

стоянного тока устанавливают специальный 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 про-

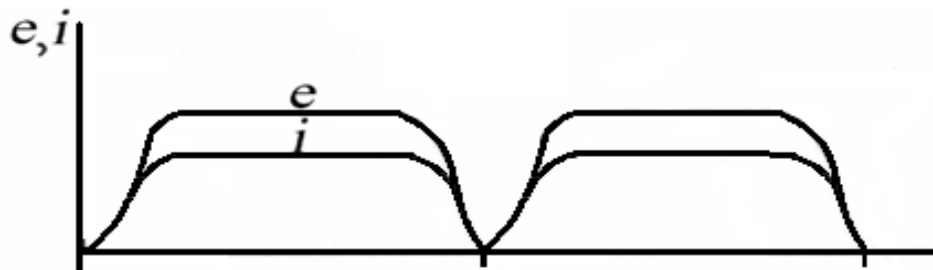


Рисунок 3.3 - Выпрямленные ЭДС и ток

цессе работы машины остается неизменной, а ЭДС и ток во внешней цепи становятся постоянными по направлению и переменными по величине (рисунок 3.3). Таким образом, коллектор играет роль механического переключателя сторон витка к щеткам, т.е. является выпрямителем. Чтобы сгладить пульсацию 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.

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 будет действовать сила

$$F_{\text{эм}} = Bli. \quad (3.3)$$

Эта сила создает вращающий момент

$$M = F_{\text{эм}} D_a. \quad (3.4)$$

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

Устройство машины постоянного тока

Электротехническая промышленность выпускает электрические машины постоянного тока для работы в различных условиях, общая конструктивная схема машин одинакова. Машины состоят из 2-х основных частей: неподвижной – статора и вращающейся – якоря (ротора). Между ними всегда имеется воздушный зазор.

Статор (индуктор), в котором создается магнитное поле, состоит из станины, главных и добавочных полюсов. К статору относятся также подшипниковые щиты с подшипниками. На статоре крепятся щеточный аппарат и коробка выводов (клеммная коробка).

Якорь состоит из сердечника якоря и коллектора, насаженных на вал. В машинах с самовентиляцией на валу крепится вентилятор.

Станина служит в качестве магнитопровода и одновременно является конструктивной основой, к которой крепятся главные и добавочные полюсы и подшипниковые щиты. Часть станины, по которой замыкаются магнитные потоки главных и добавочных полюсов, называется ярмом. Вместе со станией отливаются лапы для крепления машины к фундаменту. На станине устанавливается рым-болт для подъема машины.

Главные полюсы предназначены для создания в машине магнитного потока необходимой величины. Главный полюс (рисунок 3.4) состоит из сердечника 1 и катушек обмоток возбуждения 2,3. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник заканчивается полюсным наконечником 4, с помощью которого обеспечивается требуемое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре.

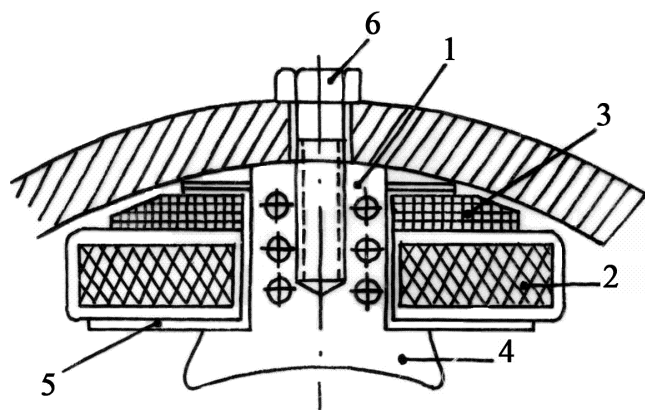


Рисунок 3.4 – Главный полюс машины постоянного тока

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 или 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). Полюс в собранном виде крепится к станине болтами 6.

Добавочные полюсы служат для улучшения коммутации машины, т.е. обеспечивают безыскровую работу щеток и коллектора. Они состоят из сердечника и полюсной катушки и устанавливаются между главными полюсами по линии геометрической нейтрали.

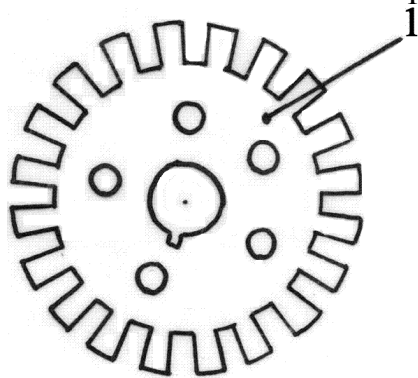


Рисунок 3.5 – Лист сердечника якоря машины постоянного тока

Якорь состоит из сердечника магнитопровода, обмотки, вала и конструктивных деталей для их крепления. Сердечник якоря – это стальной цилиндр, набранный из штампованных листов (рисунок 3.5) 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 крепится 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, называется зубцовой зоной. Обмотка якоря выполняется из изолированного провода круглого или прямоугольного сечения. Она состоит из отдельных элементов – секций, образованных из одного или нескольких витков. Секции изготавливаются по шаблонам. Концы секций припаиваются к коллекторным пластинам.

Коллектор (рисунок 3.6) набирается из медных пластин I, изолированных друг от друга и от вала, на котором он крепится, с помощью миканитовых прокладок 8 и манжет 5,7. Со стороны, обращенной к валу, пластины имеют форму ласточкиного хвоста 2. В два конусообразных углубления коллектора вставляются изолированные нажимные конусы 3, 4, которые стягивают кол-

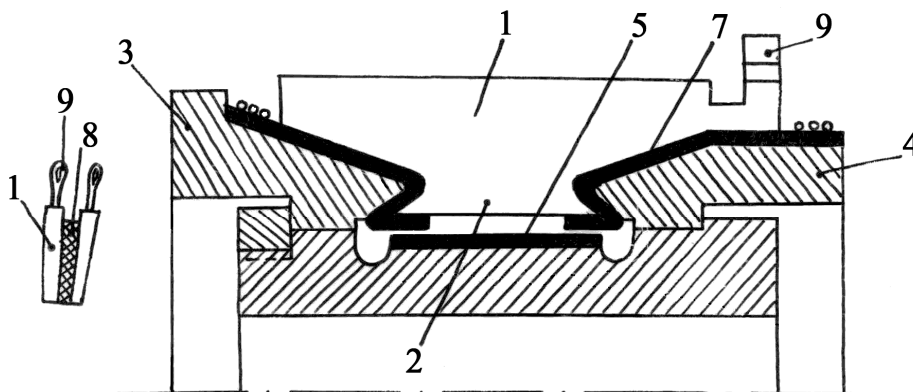


Рисунок 3.6 – Продольный разрез коллектора

лекторные пластины в осевом направлении. В собранном виде коллектор спрессовывают в горячем состоянии, после чего обтачивают для придания ему строго цилиндрической формы. 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.

Щеточное устройство – предназначено для обеспечения электрической связи между неподвижными зажимами, соединенными с внешней цепью, и вращающейся обмоткой якоря (через коллектор). Оно состоит из щеток, щеткодержателей, пальцев, траверзы и соединительных шин. Непосредственный контакт с коллектором имеет щетка. Она выполняется обычно из специальным образом обработанной смеси угля, графита и других компонентов в виде прямоугольной призмы и помещается в обойму щеткодержателя. 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.

На станине имеется клеммная коробка. В клеммной коробке устанавливается изоляционная панель с клеммами, к которым подсоединяются выводы обмоток машины для соединения с внешней электрической сетью.

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 предъявляется ряд требований. Она должна обеспечить получение необходимой ЭДС, прохождения тока номинальной величины и безыскровую работу щеточного контакта. При этом она должна иметь достаточную электрическую, термическую и механическую прочность, обеспечивать возможно меньший расход материалов, 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. Части секций, лежащие в пазу, называются активными сторонами секции, они находятся в магнитном поле главных полюсов и при вращении якоря в них индуцируется ЭДС. Части секции, находящиеся вне пазов, называются лобовыми частями. Они находятся вне основного магнитного потока и ЭДС в них не индуцируется. По внешнему очертанию контуров, образуемых последовательно соединенными секциями, различают петлевые, волновые и комбинированные обмотки.

Простая петлевая обмотка – это такая обмотка, в которой начало и конец секции присоединяются к рядом лежащим коллекторным пластинам.

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.

В простой волновой обмотке последовательно соединяются секции, находящиеся под разными парами полюсов, при этом расстояние между

коллекторными пластинами, к которым присоединяются концы секции, примерно равно двойному полюсному делению, т.е. за один обход по якору укладывается столько секций, сколько пар полюсов имеет машина.

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

Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент

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

$$e_x = B_x l V, \quad (3.5)$$

где e_x – ЭДС произвольно взятого проводника обмотки якоря; B_x – магнитная индукция в месте размещения данного проводника; l – длина якоря; V – линейная скорость движения проводника.

Распределение индукции в воздушном зазоре на одном полюсном делении τ имеет примерно трапециидальный характер.

Среднее значение ЭДС, индуцируемой в одном проводнике равно

$$E_{cp} = B_{cp} l V. \quad (3.6)$$

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

$$E = E_a = E_{cp} \cdot \frac{N}{2a} = B_{cp} l V \cdot \frac{N}{2a}, \quad (3.7)$$

где $V = \frac{p D_a n}{60}$ – линейная скорость вращающегося якоря; n – частота вращения якоря, об/мин; D_a – диаметр якоря. Учитывая, что $p D_a = 2 p \phi$, можно записать $V = \frac{\tau \cdot 2 p \cdot n}{60}$. Подставив значение V в формулу для ЭДС получим

$$E = B_{cp} l \frac{2 p n}{60} \cdot \frac{N}{2a}, \quad (3.8)$$

здесь произведение $l \cdot \tau = S$ представляет собой площадь, которую пронизывает магнитный поток Φ под одним полюсом, поэтому, $B_{cp} l \cdot \phi = B_{cp} \cdot S = \Phi$. Следовательно,

$$E = \frac{p N}{60 a} \cdot \Phi \cdot n = C_e \Phi n, \quad (3.9)$$

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

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

Момент машины находится из выражения

$$M_a = \frac{pN}{2\pi a} \cdot I_a \cdot \Phi = C_m \Phi I_a, \quad (3.10)$$

где $\frac{pN}{2p \cdot a} = C_m$ – для данной машины величина постоянная, зависящая от конструкции.

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

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Краткие материалы позволяющие пояснить устройство и принцип действия машины постоянного тока.

Контрольные вопросы

1. Как устроен статор МПТ?
2. Как устроен ротор МПТ?
3. Для чего предназначен и как устроен коллектор в МПТ?
4. Какие типы обмоток МПТ известны?
5. Поясните, как протекают процессы в МПТ при ее работе в двигательном режиме.
6. Поясните, как протекают процессы в МПТ при ее работе в генераторном режиме.

4 Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить конструкцию двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением (ДПТсв).
2. Снять и построить рабочие характеристики ДПТсв – зависимости потребляемой активной мощности (P_1), тока якоря (I_a), электромагнитного момента (M), К.П.Д. (η), частоты вращения якоря (ω) от мощности на валу двигателя (P_2) при постоянном напряжении якоря ($U=const$) в токе возбуждения ($I_e=const$).
3. Снять и построить механическую характеристику ДПТсв – зависимость частоты вращения (ω) от момента (M) при постоянном напряжении ($U=const$) и токе возбуждения ($I_e=const$).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1. Основные уравнения электродвигателей постоянного тока любой системы возбуждения

Подведенное к зажимам якоря напряжение уравнивается индуктированной в обмотке якоря Э.Д.С. и падением напряжения в цепи якоря

$$U = E + I_a \Sigma R, \quad (4.1)$$

где ΣR - сопротивление цепи якоря, включая сопротивление щеточного контакта.

Электродвижущая сила, которая равна

$$E = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N}{a} \cdot n\Phi = C_e n\Phi, \quad (4.2)$$

где C_e - конструктивная постоянная; p – число пар полюсов; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря; N – число проводников; n - скорость вращения двигателя, об/мин; Φ – полный магнитный поток, Вб.

Из равенств (1) и (2) получаем одно из важнейших уравнений двигателя

$$\omega = \frac{U - I_a \cdot \Sigma R}{C_e \Phi}, \quad (4.3)$$

где $\Phi = \Phi_{ш} \pm \Phi_c$,

$\Phi_{ш}$ - магнитный поток параллельной обмотки возбуждения,

Φ_c - магнитный поток последовательной обмотки возбуждения.

Полезная мощность на валу (P_2) находится по формуле:

$$P_2 \cong U_z I_a + \Delta U_{щ} I_a + I_a^2 r_a, \quad (4.4)$$

где U_z и I_a - напряжение и ток якоря генератора (ГПТ);

$\Delta U_{щ}$ - падение напряжения на щетках ($\Delta U_{щ}=1$ В)

r_a - сопротивление якорной цепи ГПТ (измеряется методом ампер-вольтметра).

Вращающий момент M_a , развиваемый двигателем в результате взаимодействия потока Φ с током якоря I_a определяется уравнением, Н·м

$$M_a = \frac{pN}{2\pi \cdot a} I_a \Phi = C_m \Phi I_a, \quad (4.5)$$

где C_m - конструктивная постоянная.

Вращающий момент M_a может быть представлен как сумма:

- полезного момента M на валу двигателя, равного моменту сопротивления машины;
- момента холостого хода M_0 , обусловленного механическим и вентиляционными потерями, а также потерями в стали;

- динамического момента $M_\partial = \pm J \frac{d\Omega}{dt}$, возникающего при увеличении (плюс) и замедлении (минус) скорости вращения двигателя.

$$M_a = M + M_0 + M_\partial. \quad (4.6)$$

Ток в цепи якоря может быть найден из формулы

$$I_a = \frac{U - E}{\Sigma R}. \quad (4.7)$$

Полезная мощность и момент на валу двигателя связаны между собой известной зависимостью

$$P_2 = M\Omega, \quad (4.8)$$

где P_2 - полезная мощность, Вт; Ω - угловая скорость вращения, рад/с; M - момент, Н·м.

Коэффициент полезного действия равен отношению полезной мощности на валу P_2 к полной потребляемой мощности P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}, \quad (4.9)$$

где ΣP - сумма потерь.

2. Пуск в ход двигателей постоянного тока

При неподвижном якоре Э.Д.С. в его обмотке $E=0$, поэтому согласно уравнению (4.7)

$$I_a = \frac{U}{\Sigma R} . \quad (4.10)$$

Так как в нормальных машинах постоянного тока падение напряжения в цепи якоря $I_{ан} \cdot \Sigma R \approx (0.04 \div 0.1)U_H$, то кратность пускового тока при непосредственном включении двигателя достигает недопустимо большого значения

$$I_{ан} = \frac{U_H}{R} \approx (10 \div 25)I_{ан} , \quad (4.11)$$

где $I_{ан}$ - пусковой ток.

Поэтому пуск в ход путем непосредственного включения в сеть может быть применен для двигателей малой мощности до $2 \div 5$ кВт, имеющих относительно большое внутреннее сопротивление якоря. В остальных случаях для ограничения пускового тока прибегают к включению последовательно с обмоткой якоря дополнительного сопротивления (пускового реостата $R_{пм}$).

При этих условиях начальный пусковой ток в цепи якоря равен

$$I_{ан} = \frac{U}{\Sigma R + R_{пм}} . \quad (4.12)$$

Сопротивление пускового реостата рассчитывается так, чтобы пусковой ток находился в пределах $(1,5 \div 2,0)I_{ан}$.

Выводить пусковой реостат следует плавно, чтобы пусковой ток не превосходил допустимых пределов. При сборке схемы ДПТ иногда допускают ошибку, присоединяя обмотку возбуждения непосредственно в зажимах якоря. При таком соединении ток возбуждения, а, следовательно, и поток, в первый момент пуска будет малым, так как напряжение на зажимах якоря и начальный момент пуска составляет лишь $(0,05 \div 0,1)U_H$. Пусковой момент может оказаться недостаточным, и двигатель не придет во вращение при вводе реостата, несмотря на то, что ток якоря может превзойти минимальный ток в несколько раз.

Реостат в цепи возбуждения $R_{вм}$ должен быть выведен.

Изменение направления вращения следует производить изменением полярности зажимов обмотки якоря или обмотки возбуждения.

3. Снятие и построение характеристик ДПТ

При изучении свойств двигателя необходимо выяснить, как работает двигатель при различных нагрузках и при отсутствии какого-либо регулирования. Обычно двигатели работают при постоянном напряжении питающей сети ($U = U_H = const$), постоянном токе возбуждения ($I_{в} = const$) и меняющейся нагрузки $I_a = var$. Характеристики при работе двигателя с переменной нагрузкой, при отсутствии регулирования напря-

жения U и постоянстве тока возбуждения I_e называются **рабочими характеристиками**. Они представляет собой зависимости тока якоря I_a , вращающего момента на валу двигателя M , скорости n , коэффициента полезного действия η , потребляемой мощности P_1 от полезной мощности на валу двигателя P_2

$$I_a, M, n, \eta, P_1 = f(P_2), \text{ при } U = \text{const и } I_e = \text{const}.$$

Наибольший интерес представляют рабочие характеристики, снятые при номинальных значениях напряжения якоря и тока возбуждения.

Так как номинальное значение тока возбуждения не всегда бывает указано в паспорте машины, то за номинальный ток возбуждения принимают ток возбуждения, при котором двигатель вращается с номинальной скоростью при номинальном значении тока нагрузки.

Двигатели смешанного возбуждения, имеющие параллельную обмотку возбуждения, могут быть:

1. **Компаундными двигателями параллельного возбуждения**, в которых основная роль в создании потока принадлежит параллельной обмотке возбуждения.

2. **Двигателями последовательного возбуждения**, снабженными двоичной обмоткой параллельного возбуждения, в которых поток создается в основном обмоткой последовательного возбуждения.

В последнее время чаще применяется компаундные двигатели смешанного возбуждения.

Способ соединения обмоток резко сказывается на рабочих и пусковых свойствах двигателя, в чем можно убедиться при его испытании.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема соединений, применяемая для испытаний двигателей со смешанным возбуждением, приведена на рисунке 4.1. В цепь якоря двигателя включают реостат R_{nm} для ограничения пускового тока. Для регулирования тока в обмотке возбуждения последовательно с ней включают шунтовой реостат R_{vm} .

Нагрузкой двигателя в лаборатории является генератор постоянного тока (ГПТ) с независимым возбуждением, к якорю которого подключен магазин сопротивления ($R_1 - R_5$), позволяющий менять нагрузку от нуля до номинальной.

Скорость двигателей постоянного тока измеряется с помощью тахогенератора, насаженного на вал двигателя и присоединенного к тахометру (измерительному прибору), отградуированному в об/мин.

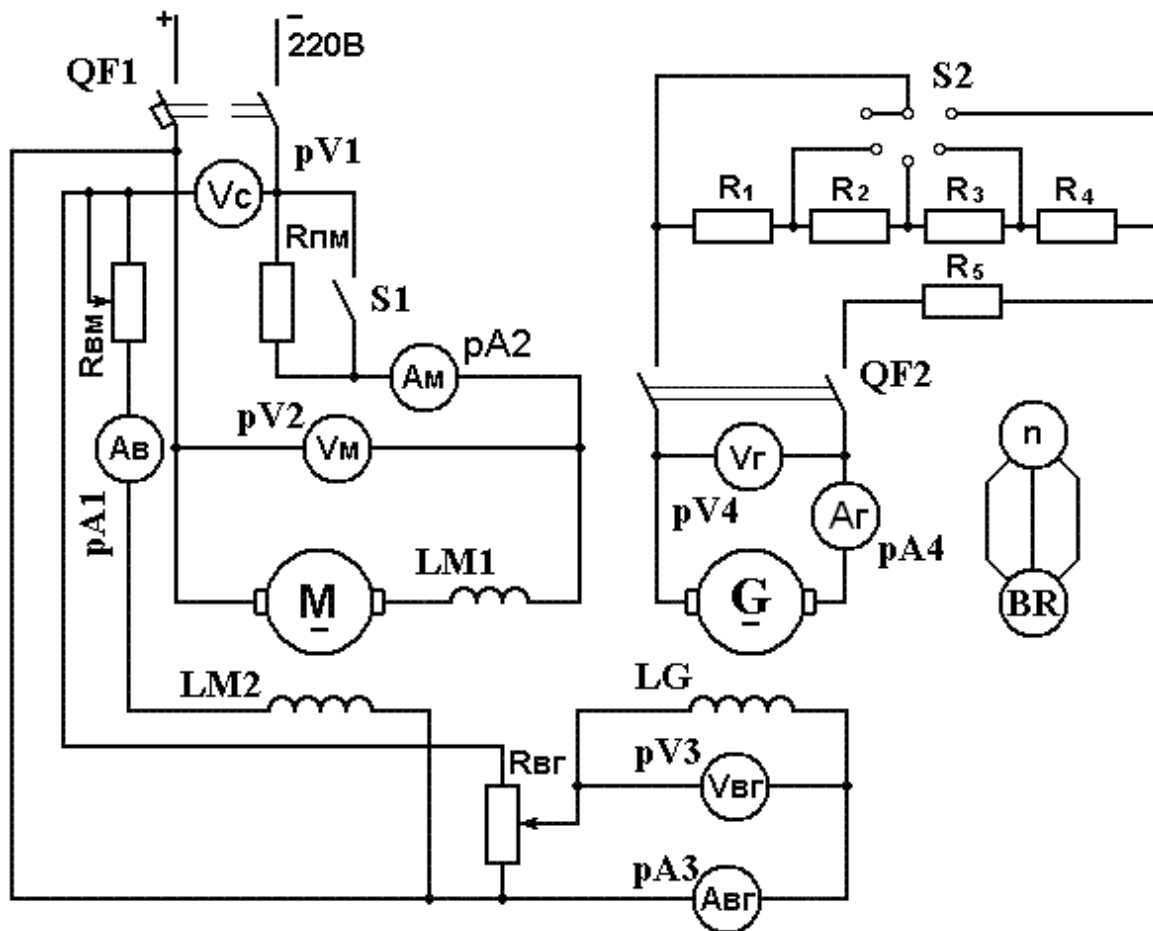


Рисунок 4.1 – Электрическая принципиальная схема стенда

Элементы схемы:

M, LM1, LM2 – ДПТ и обмотки возбуждения ДПТ,

G – генератор постоянного тока (ГПТ),

LG – обмотка возбуждения ГПТ,

QF1, QF2 – автоматический выключатели,

S2 – переключатель нагрузки,

S1 – тумблер для шунтирования пускового сопротивления R_{nm} ,

R_{nm} – пусковое сопротивление,

$R_{вм}$ – реостат возбуждения ДПТ,

$R_{вг}$ – потенциометр возбуждения генератора,

$R_1 - R_5$ – сопротивления нагрузки,

BR, n – таходатчик и тахометр,

pU_1, pU_2, pU_3, pU_4 – вольтметры,

pA_1, pA_2, pA_3, pA_4 – амперметры.

Размещение оборудования стенда показано на рисунке 4.2

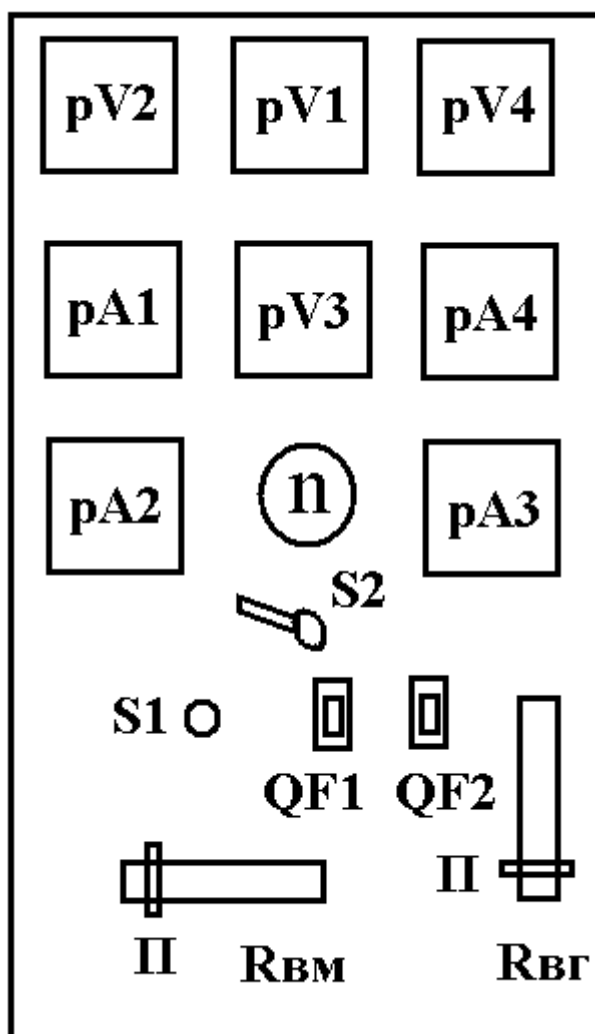


Рисунок 4.2 – Размещения оборудования

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы необходимо изучить конструкцию и принцип действия исследуемой машины, расположение оборудования на стенде.

В исходном состоянии автоматические выключатели QF1, QF2 и тумблер S1 находятся в положении «откл.», переключатель S2 – в положении «0», реостаты $R_{вм}$ и $R_{вг}$ - в положении «пуск» (П).

При снятии рабочих характеристик в данной лабораторной работе необходимо придерживаться следующей последовательности действий:

1. Включить автомат QF1, после разгона якоря ДПТ включить тумблер S1.
2. Записать показания приборов.
3. Включить автомат QF2г и, нагружая ДПТ изменением тока возбуждения ГПТ (передвижением движка $R_{вг}$) и тока якоря ГПТ (переключателем S2), произвести измерения $U, I_{вм}, U_{вг}, I_{вг}, U_{г}, I_{г}, n$ (не менее 4-х опытов). Данные записать в таблицу 4.1.

4. Для отключения стенда все действия необходимо произвести в обратном порядке: S2 поставить в положение «0», снять возбуждение генератора ($R_{вг}$), ввести пусковое сопротивление (тумблер S1 отключить) и отключить автомат QF1.

Таблица 4.1

№ п/п	Опытные данные					Расчетные данные				Примечания
	I_a	$I_{вм}$	$U_{Г}$	$I_{аг}$	n	M	P_1	P_2	η	
	А	А	В	А	об/мин	Н·м	кВт	кВт	%	$I_{в} = I_{вн} = const$ $U = U_{н} = const$

Затем по опытным данным строятся рабочие характеристики, примерный вид которых представлен на рисунке 4.3.

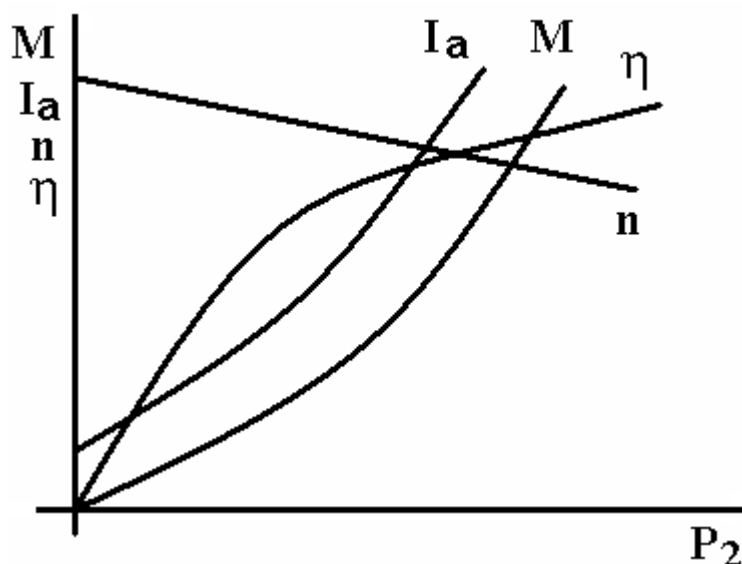


Рисунок 4.3 - Рабочие характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

Рабочие и механические характеристики рассчитываются по следующим формулам, если известны $R_{аг}=1\text{Ом}$, $\Delta U_{щ}=1\text{В}$, $R_{вг} = R_{вм} = 400\text{Ом}$

- $P_1 = U \cdot I_a + I_{вм}^2 \cdot R_{вм},$
- $P_2 \cong U_{г} \cdot I_{аг} + I_{аг}^2 \cdot R_{аг} + \Delta U_{щ} \cdot I_{аг} + I_{вг}^2 \cdot R_{вг},$
- $\eta = \frac{P_2}{P_1},$
- $M = M_0 + M_2,$

$$\text{где } M_0[Hm] \cong \frac{1000 \cdot P_{10}[kBm]}{\omega_0[rad/c]}.$$

$$M_2[Hm] \cong \frac{1000 \cdot P_2[kBm]}{\omega_0[rad/c]} \quad (\text{при наличии электромагнитного тормоза})$$

Панасенкова на валу двигателя момент M_2 снимается по шкале, имеющейся на электромагнитном тормозе; при этом показания в [кГм] необходимо перевести в [Н·м]); скорость вращения, снимаемую с датчика в [об/мин] перевести в [рад/с]: ($\omega = \frac{2\pi n}{60}$).

После заполнения таблицы 4.1 необходимо провести анализ полученных кривых и составить вывод по работе.

Анализ полученных результатов

Характеристика К.П.Д.

Непосредственный метод определения К.П.Д., применяемый при снятии рабочих характеристик двигателя, заключается в том, что измеряются отдаваемая и потребляемая электрические мощности, после чего К.П.Д. определяется из равенства (9)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M\omega}{U(I_a + I_e)}. \quad (4.13)$$

Характер изменения К.П.Д. в зависимости от нагрузки двигателя (рисунок 4.3) типичен для всех электрических машин. В начале кривой К.П.Д. резко возрастает, затем, достигнув максимума, он несколько уменьшается при номинальной нагрузке. Для объяснения этого явления потери в машине целесообразно представить в функции тока якоря

$$\Sigma P = C_0 + C_1 \cdot I_a + C_2 \cdot I_a^2, \quad (4.14)$$

где C_0 - потери холостого хода; $(C_1 \cdot I_a)$ - потери в щеточном контакте; $(C_2 \cdot I_a^2)$ - электрические потери в цепи якоря и добавочные потери.

Коэффициент полезного действия в функции от тока можно записать в виде

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = \frac{U(I_a + I_e) - (C_0 + C_1 I_a + C_2 I_a^2)}{U(I_a + I_e)} = \\ &= 1 - \frac{C_0}{UI_a} - \frac{C_0}{UI_e} - \frac{C_1}{U} - \frac{C_2 I_a}{U}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

При малых токах тепловые потери будут весьма незначительны. Вследствие чего последними двумя членами равенства (15) можно пренебречь и считать, что в начале кривой К.П.Д. равен

$$\eta = 1 - \frac{C_0}{UI_a} . \quad (4.16)$$

Из равенства (16) следует, что даже при незначительном увеличении тока К.П.Д. резко возрастает. Наоборот, при токах нагрузки, близких к номинальному, электрические потери превышают потери холостого хода, вследствие чего К.П.Д. уменьшается почти пропорционально току якоря.

Максимум К.П.Д. машины наступает при равенстве потерь холостого хода и нагрузочных

$$C_0 = C_2 \cdot I_a^2 . \quad (4.17)$$

Равенство имеет место, обычно, при некоторой нагрузке машины. Так как электрические машины большую часть времени работают с недогрузкой, то это обстоятельство обуславливает наименьшие потери в машине при ее эксплуатации.

Характеристики $I_a, M = f(P_2)$.

Зависимость тока якоря $I_a = f(P_2)$, как это следует из формулы $M = C_m I_a \Phi$, при постоянстве магнитного потока была бы прямолинейна. Однако из-за размагничивающего действия реакции якоря с ростом нагрузки, поток уменьшается. Ввиду этого рост тока I_a происходит относительно быстрее, чем по прямолинейному закону.

Действительно, при установившемся режиме двигателя развиваемый им момент, согласно равенству (6) имеет вид

$$M_a = C_m (\Phi_0 - \Delta\Phi) I_a = M + M_0 , \quad (4.18)$$

где Φ_0 - поток холостого хода; $\Delta\Phi$ - уменьшение потока вследствие реакции якоря.

Умножив левую и правую части равенства на $1,018 \cdot n$, получим

$$1,028 C_m (\Phi_0 - \Delta\Phi) I_a n = P_2 + P_0 , \quad (4.19)$$

откуда

$$I_a = \frac{P_2}{1,028 C_m \cdot n (\Phi_0 - \Delta\Phi)} + \frac{P_0}{1,028 C_m \cdot n (\Phi_0 - \Delta\Phi)} . \quad (4.20)$$

Второе слагаемое можно приравнять току холостого хода двигателя, составляющего (2-4)% от номинального тока якоря. Таким образом, ток якоря I_a будет зависеть в основном от первого слагаемого и будет нелинейно возрастать с увеличением полезной мощности, так как обычно скорость вращения и поток двигателя при этом уменьшается. Характер кривой $M = f(P_2)$ определяется уравнением (8). При постоянстве n кривая $M = f(P_2)$ была бы прямой линией, выходящей из начала координат. В

действительности, вследствие незначительного уменьшения n с ростом P_2 , момент M возрастает быстрее, чем по прямолинейному закону.

Кривая $n = f(P_2)$ мало отличается от скоростной характеристики $n = f(I_a)$, так как P_2 пропорциональна I_a . Это следует из того, что

$$P_2 = P_1 \cdot \eta = U(I_a + I_\epsilon),$$

где величина η , при широком диапазоне изменения мощности, так мало изменяется, что в первом приближении его можно считать постоянным, $I_\epsilon = \text{const}$, и поэтому P_2 пропорциональна I_a . В связи с этим при анализе кривой $n = f(P_2)$ нужно исходить из тех же положений, что и при анализе скоростной характеристики.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему установки с перечнем оборудования и приборов, использованных в работе.
3. Таблицы экспериментальных данных, расчеты и соответствующие им графики.
4. Выводы о работе.

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики ДПТ называются рабочими, при каких условиях они снимаются?
2. Какие характеристики ДПТ называются механическими, в каких осях они строятся?
3. Какие способы пуска ДПТ известны? Расскажите о них.
4. Как изменить направление вращения ДПТ?
5. Напишите уравнения механического и электрического равновесия ДПТ.
6. Как найти ток якоря?
7. Какие способы регулирования частоты вращения ДПТ существуют и кокой из них применен в лабораторной работе?

5 Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить конструкцию генератора постоянного тока со смешанным возбуждением (ГПТсв).
2. Снять и построить характеристику холостого хода (х..х.х.) $E = f(I_{\theta})$ при $I_a = 0, n = const$.
3. Снять и построить нагрузочную характеристику (н. х.) $U = f(I_B)$ при $I_a = I_A, n = const$.
4. Снять и построить внешнюю характеристику (в. х.) $U = f(I_a)$ при $I_{\theta} = const, n = const$.
5. Снять и построить регулировочную характеристику (р.х.) $I_{\theta} = f(I_a)$ при $U = const, n = const$.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Свойства генератора анализируются с помощью характеристик, устанавливающих зависимость между основными величинами, определяющими работу генератора.

Таковыми величинами являются:

- а) напряжение на зажимах генератора U ;
- б) ток возбуждения I_{θ} ;
- в) ток в якоре генератора I_a ;
- г) скорость вращения n .

Основными характеристиками генераторов являются:

1. **Нагрузочная характеристика** $U = f(I_{\theta})$, при $I = const, n = const$, в частном случае, когда $I_a = 0$, нагрузочная характеристика переходит в характеристику холостого хода, имеющую важное значение для оценки свойств генератора и построения его характеристик,
2. **Внешняя характеристика** $U = f(I)$ при постоянном сопротивлении цепи возбуждения $r_{\theta} = const$ ($I_{\theta} = const$) и $n = const$,
3. **Регулировочная характеристика** $I_{\theta} = f(I)$, при $U = const, n = const$. В частном случае, когда $U = 0$, регулировочная характеристика переходит в характеристику короткого замыкания $I_{\theta} = f(I_K)$.

Программа работы включает в себя снятие вышеуказанных характеристик для генераторов постоянного тока.

Системы возбуждения генераторов

Генераторы постоянного тока по способу их возбуждения разделяются на следующие основные группы:



- а) генераторы независимого возбуждения;
- б) генераторы параллельного (шунтового) возбуждения;
- в) генераторы смешанного (компаундного) возбуждения.

Для генераторов независимого возбуждения требуется дополнительный источник постоянного тока. Обычно в крупных машинах таким источником служит генератор постоянного тока параллельного возбуждения, называемый возбудителем. В учебной лаборатории для питания обмотки возбуждения используется сеть постоянного тока.

Независимое возбуждение применяется в тех случаях, когда по условиям работы напряжение на его зажимах изменяется в широких пределах, как, например, при регулировании скорости вращения двигателей постоянного тока в системе генератор-двигатель.

Кроме того, в машинах весьма низкого напряжения (6-18 В), а также высокого напряжения (свыше 500 В) независимое возбуждение применяется потому, что при проектировании катушек обмотки возбуждения при параллельном возбуждении возникают трудности.

При параллельном возбуждении обмотка возбуждения присоединяется к зажимам якоря генератора, поэтому отпадает необходимость в дополнительном источнике постоянного тока. Это преимущество явилось причиной широкого распространения генераторов параллельного возбуждения.

Генераторы смешанного возбуждения снабжаются двумя обмотками: параллельной и последовательной. Применение последовательной обмотки, М.Д.С. которой пропорциональна току якоря и направлена согласно с М.Д.С. возбуждения, позволяет получить стабильное напряжение на зажимах генератора при изменении тока нагрузки в широких пределах (от 0 до $1,25 I_{вн}$). Это свойство генератора является весьма ценным.

В тех случаях, когда требуется поддержать стабильное напряжение на зажимах потребителя, удаленного от генератора, М.Д.С. последовательной обмотки принимают несколько большей с целью компенсировать падение напряжения в линии. Напряжение на зажимах такого генератора будет повышаться с увеличением тока нагрузки (целесообразно такие генераторы называть **компаундированными**).

В машинах постоянного тока предусмотрено устройство последовательной стабилизирующей (**компенсационной**) обмотки, предназначенной для компенсации размагничивающего влияния поперечной реакции якоря. В таких машинах напряжение на зажимах при увеличении тока нагрузки будет уменьшаться приблизительно в пределах 5-10%. В некоторых специальных генераторах, например сварочных, последовательная обмотка включается встречно главной обмотки возбуждения.

Основные уравнения генератора

а) Э.Д.С. и напряжение на зажимах якоря

При вращении якоря в магнитном поле в его обмотке индуцируется Э.Д.С

$$E = \frac{p \cdot n}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot \Phi, \quad (5.1)$$

где p – число пар полюсов;

n – скорость вращения якоря;

a – число пар параллельных ветвей;

N – число проводников обмотки якоря;

Φ – результирующий магнитный поток.

При исследовании ГПТ скорость вращения поддерживается постоянной, поскольку в промышленных условиях генераторы приводятся во вращение, как правило, двигателями переменного тока, скорость вращения которых при изменении нагрузки или вовсе не изменяется (синхронные двигатели) или изменяется незначительно в пределах до 2-3% (асинхронные двигатели).

Таким образом, Э.Д.С генератора при $n = \text{const}$ пропорциональна магнитному потоку. Если генератор отдает ток во внешнюю сеть, то в цепи якоря возникает падение напряжения, в результате чего напряжение на зажимах генератора будет равно

$$U = E - I_a \Sigma R, \quad (5.2)$$

где $I_a \cdot \Sigma R = I_a \cdot (R_a + R_\partial + R_c) + \Delta U_{щ}, \quad (5.3)$

где R_a, R_∂, R_c – сопротивления обмотки якоря, дополнительных полюсов и серийной, соединительных между собой последовательно;

$\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в щеточных контактах щеток обеих полярностей.

Для наиболее ходовых сортов щеток падение напряжения составляет в среднем (1,5÷2)В, в то время как падение напряжения в последовательно включенных обмотках составляет 3÷8% от номинального напряжения генератора (верхний предел относится к машинам малой мощности).

Уравнение (5.2) является основным, позволяющим определить напряжение генератора при известном значении Э.Д.С. для любого тока нагрузки.

б) намагничивающие силы и магнитный поток генератора

Если бы магнитный поток генератора при изменении тока нагрузки оставался постоянным, то Э.Д.С. также была бы постоянной, и напряжение на зажимах практически находилось бы в линейной зависимости от тока нагрузки.

Такая зависимость между напряжением и током нагрузки генератора имеет место только в **компенсированных машинах независимого возбуждения, в которых компенсированная** обмотка, уложенная в наконечниках главных полюсов, компенсирует размагничивающее влияние поперечной реакции якоря. В компенсированных машинах магнитное состояние при нагрузке определяется совместным действиям намагничивающих сил обмотки возбуждения и обмотки якоря, в результате чего в воздушном зазоре возникает результирующий магнитный поток

$$\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi, \quad (5.4)$$

где Φ_0 - поток при холостом ходе; $\Delta\Phi$ - приращение магнитного потока при нагрузке.

Результирующему магнитному потоку генератора соответствует М.Д.С., которая при смешанном возбуждении равна

$$F = F_n + F_0 + F_{dr}, \quad (5.5)$$

где F_n, F_0 - М.Д.С. параллельной и последовательной обмоток возбуждения;

F_{dr} - продольная составляющая М.Д.С. реакции якоря.

При параллельном и независимом возбуждении

$$F = F_n - F_{dr}.$$

С другой стороны результирующую М.Д.С. мы можем рассмотреть как разность или сумму двух М.Д.С.

$$F = F_0 \pm \Delta F, \quad (5.6)$$

где F - М.Д.С. при холостом ходе, создающая поток Φ_0 ;

ΔF - изменение М.Д.С. при нагрузке, соответствующее изменению магнитного потока $\Delta\Phi$.

В соответствии с этим уравнением (5.2) можно представить в таком виде

$$U = E_0 \pm \Delta E - I_a \Sigma R, \quad (5.7)$$

где $E_0 \equiv \Phi_0$; $\Delta E \equiv \Delta\Phi$.

Из равенства (5.7) видно, что напряжение на зажимах генератора любой системы возбуждения будет изменяться в зависимости от тока нагрузки по двум причинам: во-первых, оно всегда будет уменьшаться вследствие падения напряжения в якорной цепи; во-вторых, будет уменьшаться или увеличиваться вследствие изменения магнитного потока при нагрузке, являющегося единственной причиной изменения Э.Д.С. при $n = const$.

При независимом возбуждении генератора напряжения на его зажимах будет уменьшаться с увеличением нагрузки вследствие увеличения падения напряжения в якорной цепи и уменьшения Э.Д.С. из-за размагничивающего влияния реакции якоря.

В генераторе параллельного возбуждения напряжение будет уменьшаться с увеличением нагрузки не только вследствие этих двух причин, но и потому, что при уменьшении напряжения будет уменьшаться ток возбуждения. Поэтому уменьшение потока $\Delta\Phi$ в (5.4) и уменьшение Э.Д.С. ΔE в (5.7) при исследовании генератора этих систем возбуждения должны быть со знаком «-».

В генераторах смешанного возбуждения при согласном включении обмоток напряжение будет уменьшаться с увеличением нагрузки в том случае, если М.Д.С. последовательной обмотки не в состоянии компен-

сировать падение напряжения в якорной цепи и размагничивающее влияние реакции якоря.

Величина ΔE в (5.7), зависящая также от насыщения магнитной системы машины, не может быть выражена в виде аналитической функции тока якоря, поэтому характеристику, представляющую собой зависимость $U = f(I_a)$, или снимают опытным путем, или строят графическим способом по характеристике холостого хода и реактивному треугольнику.

Самовозбуждение генераторов

В генераторах параллельного, последовательного и смешанного возбуждения источником питания обмоток возбуждения является якорь самой машины. Такие генераторы называются самовозбуждающимися. Рассмотрим процесс самовозбуждения в генераторе параллельного возбуждения.

Магнитная система машины, будучи однажды намагниченной, сохраняет небольшой поток остаточного магнетизма. В машинах постоянного тока он невелик и составляет 2.2 - 3% от номинального потока. При вращении якоря в поле остаточного магнетизма в его обмотке возникает Э.Д.С. $E_{ост}$ (рисунок 2.), которая создает в обмотке возбуждения первоначальный ток

$$\Delta I_e \approx \frac{E_{ост}}{R_e}, \quad (5.8)$$

где R_e - сопротивление цепи возбуждения.

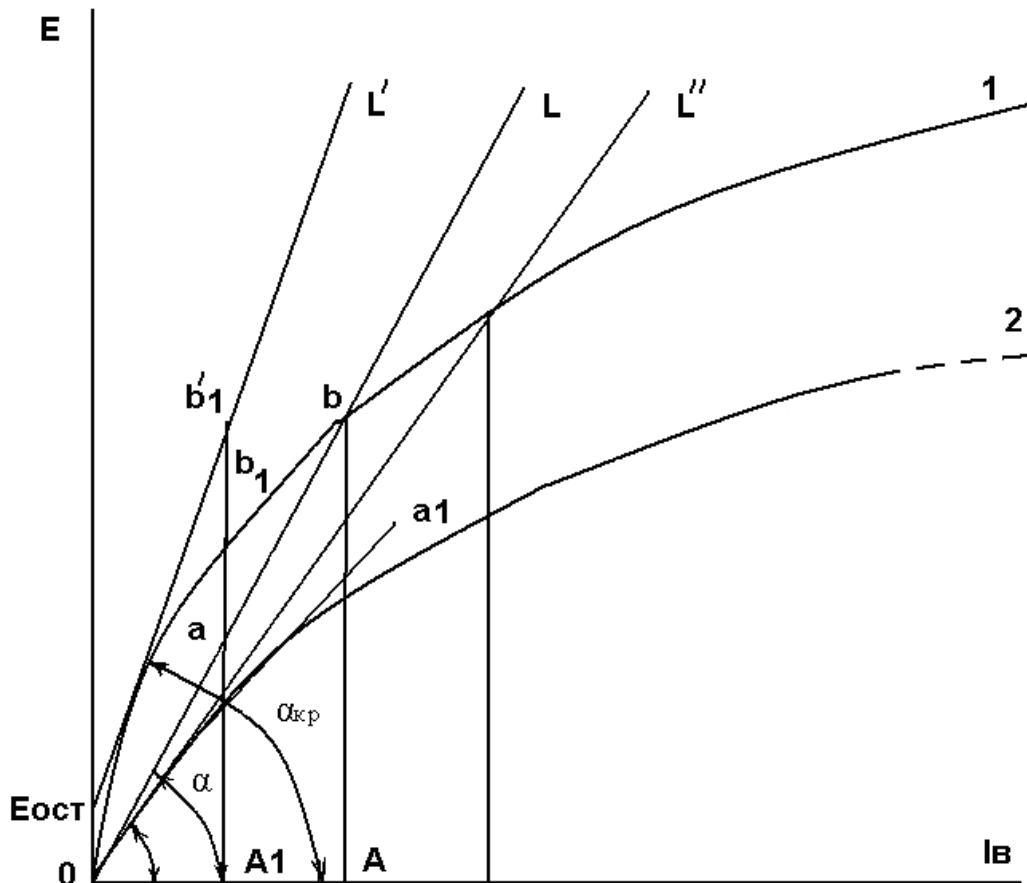


Рисунок 5.1 - К вопросу о самовозбуждении

Этот ток усилит магнитное поле машины, вследствие чего напряжение на зажимах якоря и обмотки возбуждения возрастает, что повлечет за собой увеличение тока возбуждения и т. д.

Таким образом, процесс самовозбуждения есть одновременное нарастание напряжения на зажимах и тока возбуждения генератора. Пренебрегая сопротивлением якоря и полагая, что самовозбуждение происходит при холостом ходе, можно считать, что Э.Д.С. в обмотке якоря уравнивается омическим падением напряжения и Э.Д.С. самоиндукции обмотки возбуждения

$$E_0 = I_e \cdot r_e + \frac{d(L_e I_e)}{dt}, \quad (5.9)$$

где r_e, L_e - омические сопротивления и коэффициент самоиндукции обмотки возбуждения.

Падение напряжения в омическом сопротивлении обмотки возбуждения ($L_e \cdot r_e$) является линейной функцией и изображено на рисунке 5.2 прямой OL. Поскольку зависимость Э.Д.С. от тока возбуждения представляет собой характеристику холостого хода, то отрезки между этой кривой и прямой OL равны Э.Д.С. самоиндукции обмотки возбуждения $a_1 b_1 = \frac{d(L_e I_e)}{dt}$.

Процесс самовозбуждения прекратится в точке «b», в которой прямая OL пересекает характеристику холостого хода, поскольку в этой точке Э.Д.С. самоиндукции равна нулю, что может быть только при $I_e = const$.

Процесс самовозбуждения будет возможен при наличии определенных условий. Рассмотрим, в чем состоят эти условия, и какие нужно применять меры, чтобы устранить причины, вследствие которых генератор может не возбуждаться:

1. Сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического.

Наклон прямой OL (рисунок 5.2) зависит от сопротивления цепи возбуждения, поскольку

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{Ab}{OA} = K \cdot R_e, \quad (5.10)$$

где $K = \frac{m_1}{m_n}$; m_1 и m_n - масштабы тока и напряжения, принятые при построении характеристики холостого хода.

При сопротивлении цепи возбуждения $R_e > \operatorname{tg} \alpha$, прямая OL не пересекается с прямоугольной частью характеристики холостого хода. Очевидно, что это сопротивление цепи возбуждения, называемое «критическим», будет предельным, потому что при сопротивлении равном и большем критического самовозбуждение генератора невозможно.

Из этого следует, что при самовозбуждении генератора регулировочный реостат в цепи возбуждения должен быть выведен совсем или настолько, чтобы сопротивление цепи возбуждения было меньше критического.

Наибольшему углу наклона прямой OL'' будет соответствовать сопротивление обмотки возбуждения при выведенном реостате. Если при некоторой скорости вращения $n_{\min}$ снятая характеристика холостого хода (рисунок 5.2, кривая 2) в своей начальной части совпадает с прямой OL'', то для этой характеристики сопротивление обмотки возбуждения $R_e = \operatorname{tg} \alpha_{\min}$ становится критическим. При скоростях вращения $n < n_{\min}$ самовозбуждение генератора также невозможно. Эта минимальная скорость вращения называется «критической» и может быть определена из равенства (5.11), если известно положение OL' и OL'' на рисунке 5.2

$$n_{кр} = n_n \frac{A_1 a_1}{A_1 b_1}. \quad (5.11)$$

2. Направление потока остаточного магнетизма и потока возбуждения должно быть одинаковым.

Если первоначальный ток в обмотке возбуждения создает магнитный поток, направленный встречно остаточному потоку, то генератор не возбуждается. В таком случае нужно изменить направление тока в обмотке возбуждения, изменив полярность напряжения на ее зажимах.

3. В машине должен быть остаточный магнетизм.

Генератор может не возбудиться из-за отсутствия остаточного магнетизма. В этом случае стрелка вольтметра, подключенного к зажимам якоря, не будет отклоняться после пуска в ход генератора. При отсутствии остаточного магнетизма машину следует намагнитить, пропустив ток через обмотку возбуждения от постоянного источника. У генератора с самовозбуждением полярность главных полюсов обуславливается направлением потока остаточного магнетизма, что необходимо иметь в виду при намагничивании генератора.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема соединений, применяемая для испытаний генератора смешанного возбуждением, приведена на рисунке 5.2.

Приводным двигателем генератора является асинхронный двигатель M , который связан с генератором общим валом. Для изменения Э.Д.С генератора последовательно с параллельной обмоткой возбуждения ГПТсв подключен реостат $R_{в2}$.

Нагрузкой генератора в лабораторной работе является магазин постоянных сопротивлений $R_{н1}$, подключаемых последовательно к обмотке якоря ГПТсв.

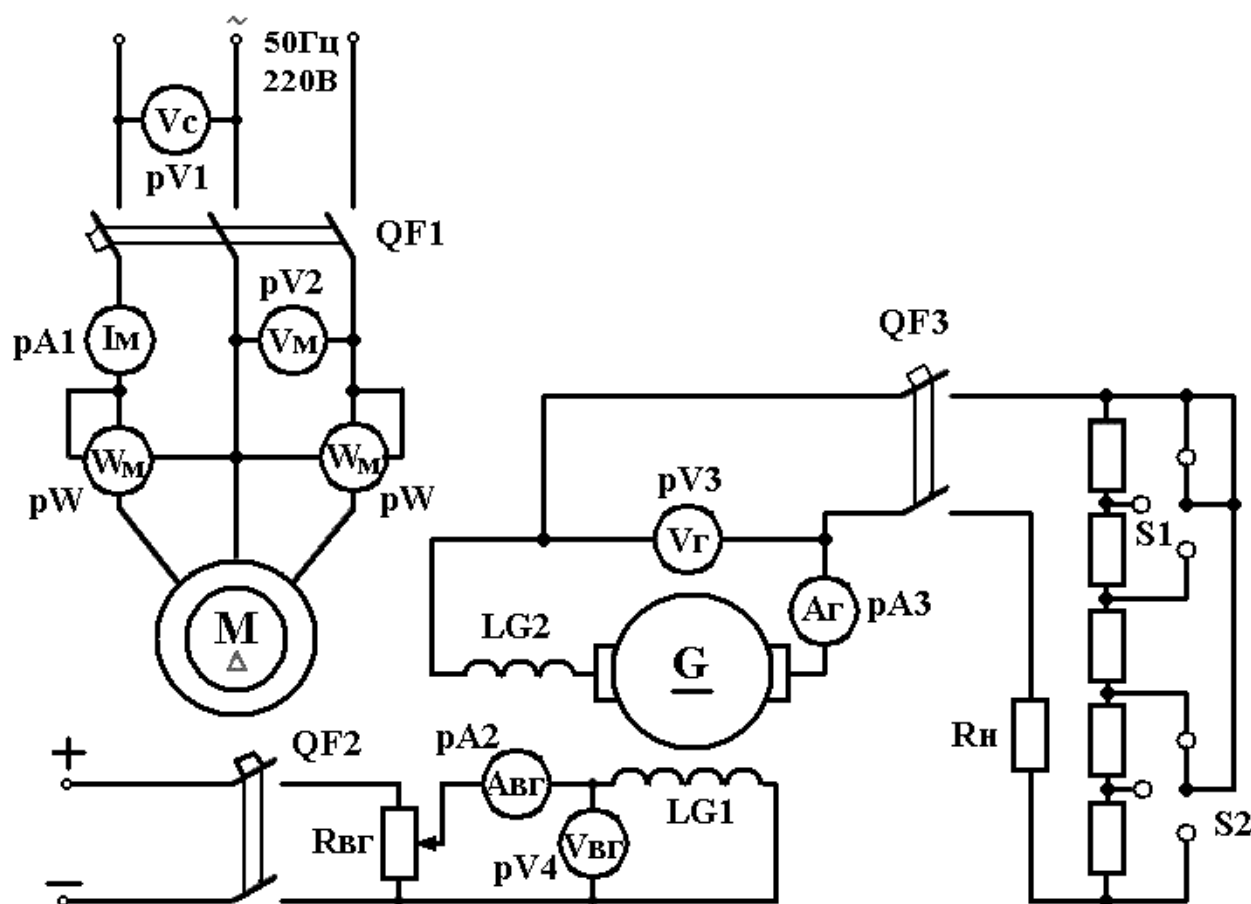


Рисунок 5.2 - Схема соединения генератора смешанного возбуждения

Элементы схемы:

G , $LG1$, $LG2$ – ГПТ, независимая и последовательная обмотки возбуждения ГПТ;

M – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором;

$QF1$, $QF2$, $QF3$ – автоматические выключатели;

$S1$, $S2$ – переключатели;

R_n - сопротивление нагрузки;

$R_{вг}$ - потенциометр;

$pV1$, $pV2$, $pV3$, $pV4$ - вольтметры;

$pA1$, $pA2$, $pA3$ - амперметры;

pW - киловаттметр.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы необходимо изучить конструкцию и принцип действия генератора постоянного тока смешанного возбуждения, выяснить какие характеристики генератора и при каких условиях снимаются, разобраться с расположением оборудования на стенде.

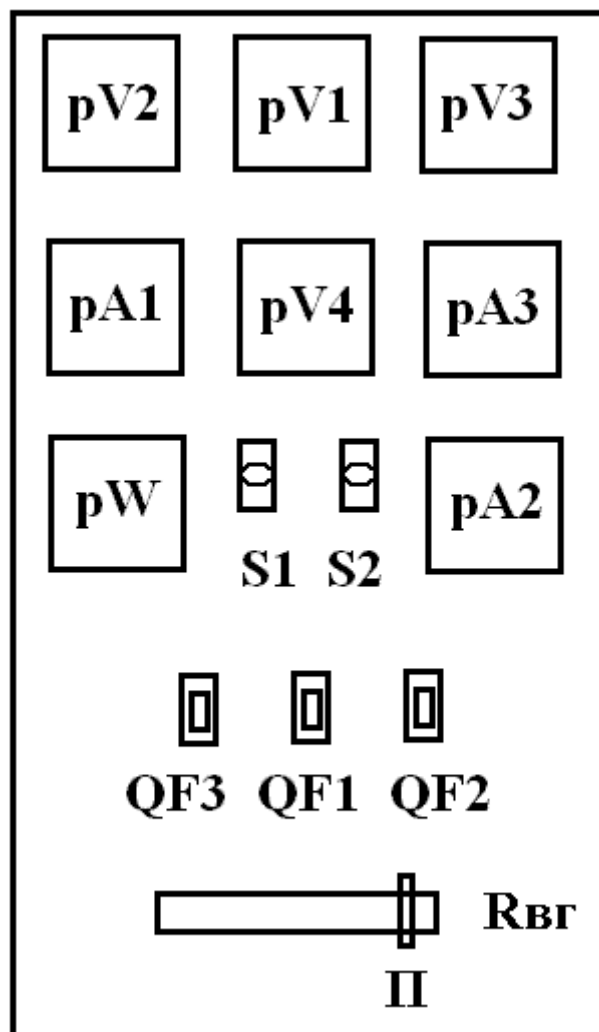


Рисунок 5.3 – Размещение оборудования на стенде

В исходном состоянии автоматические выключатели QF1, QF2, QF3 и переключатели S1, S2 должны находиться в положении «откл.», потенциометр $R_{вг}$ - в положении «пуск» (П).

1. Исследование магнитной системы машины

Для оценки степени насыщения машины, оказывающей большое влияние на ее рабочие свойства, снимают характеристику холостого хода $E_0 = f(I_e)$, при $I_a = 0$; $n = n_H$,

где E_0 - Э.Д.С. при холостом ходе, равная напряжению на зажимах генератора; I_e - ток возбуждения; I_a - ток якоря; n – скорость вращения.

Поскольку при $n = const$ поток генератора $\Phi_0 \equiv E_0$, то характеристика холостого хода представляет собой одновременно и магнитную характеристику машины $\Phi_0 = f(I_e)$, при $I_a = 0$.

Для выполнения работы включить QF1 и QF2. Изменяя потенциометром $R_{\text{вз}}$ величину тока возбуждения, снять и построить восходящую и нисходящую ветви х.х.х.

Сначала снимают восходящую ветвь характеристики, изменяя ток возбуждения от $I_{\text{в}}=0$ до такого значения, при котором

$$U_0 = 1,2U_H$$

Затем снимают нисходящую ветвь, которая располагается вследствие гистерезиса выше восходящей ветви. Ток возбуждения нужно изменять только в одну сторону, в противном случае получится разброс точек из-за гистерезиса. Опытные данные заносятся в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

$E, \text{В}$		Восходящая ветвь
$I_{\text{в}}, \text{А}$		
$E, \text{В}$		Нисходящая ветвь
$I_{\text{в}}, \text{А}$		

Характеристика холостого хода и магнитная характеристика (рисунок 2.4) имеют весьма важное значение еще и потому, что они используются для построения или расчета рабочих характеристик генераторов, так и двигателей постоянного тока.

Обработка опытных данных

а) оценка степени насыщения магнитной системы испытуемой машины

По характеристике холостого хода можно судить о степени насыщения магнитной системы испытываемой машины.

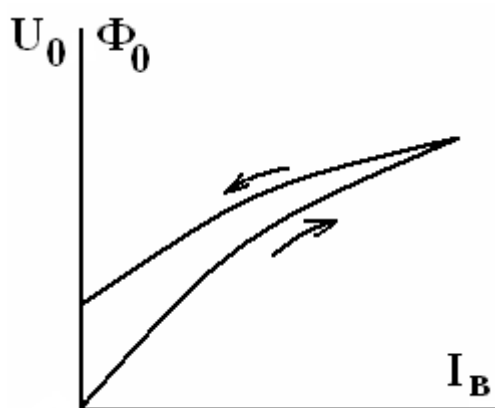


Рисунок 5.4 - Характеристика холостого хода

Для этого на усредненной характеристике холостого хода (рисунок 5.5) нужно отложить номинальное напряжение $U_H = \overline{Ac}$, затем провести прямую $\overline{ac}$, параллельную оси абсцисс, и прямую ob , являющуюся продолжением начальной части характеристики холостого хода.

Намагничивающая сила генератора при номинальном напряжении равна

$$F_0 = F_{\text{в}} + \Sigma F_{\text{см}},$$

где $F_{\delta} = \overline{ab}$ - магнитное напряжение магнитного зазора;

$\Sigma F_{см} = \overline{bc}$ - магнитное напряжение ферромагнитных участков цепи.

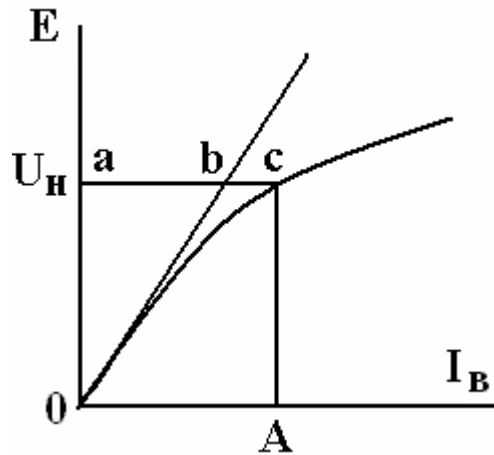


Рисунок 5.5 - Усредненная характеристика холостого хода

Коэффициент насыщения магнитной системы определяется из равенства

$$K_n = \frac{F_{\delta} + \Sigma F_{см}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{\Sigma F_{см}}{F_{\delta}} = \frac{\overline{ac}}{\overline{ab}} \quad (5.13)$$

Степень насыщения магнитной системы машины приближенно оценивается по величине коэффициента насыщения следующим образом, если $K_n < 1,25$, то машина насыщена слабо.

б) определение потока остаточного магнетизма

Обмотка возбуждения отключается от зажимов якоря. Генератор приводят во вращение с номинальной скоростью вхолостую и измеряют напряжение на его зажимах. При подборе вольтметра нужно учесть, что напряжение от остаточного магнетизма не велико и составляет 2-3% от номинального напряжения. Поскольку

$$\Phi_{ост} = E_{ост}; \Phi_{он} = U_n \text{ и } E_{ост} = U_{ост}, \quad \text{то}$$

$$\Phi_{ост} \% = \frac{U_{ост}}{U_n} \cdot 100\% \quad (5.14)$$

2. Исследование реакции якоря

При нагрузке машины ее магнитное состояние обусловлено совместным действием обмоток возбуждения и обмотки якоря.

Влияние поля якоря на основное магнитное поле называется **реакцией якоря**.

Размагничивающее действие поля определяют по характеристике холостого хода и нагрузочной характеристике, представляющей собой зависимость $U = f(I_{\delta})$ при $I_a = I_{ан}$ и $n = n_n$.

Для снятия нагрузочной характеристики включить QF1, QF3 и, поддерживая потенциометром $R_{\text{вз}}$, и переключателями S1 и S2 $I_a = 1 \text{ A} = \text{const}$, снять н. х.

Данные заносят в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

$I_{\text{в}}, \text{A}$					$I_a = 1$
$U, \text{В}$					

По характеристике холостого хода можно судить о степени насыщения магнитной системы испытываемой машины.

Нагрузочная характеристика 2 на рисунке 5.6 по своему виду похожа на характеристику холостого хода 1, но располагается ниже последней. Уменьшение напряжения по сравнению с холостым ходом при одном и том же токе возбуждения (например, $I_{\text{в}} = OA_1$) происходит вследствие падения напряжения в якоре и размагничивающего действия реакции якоря.

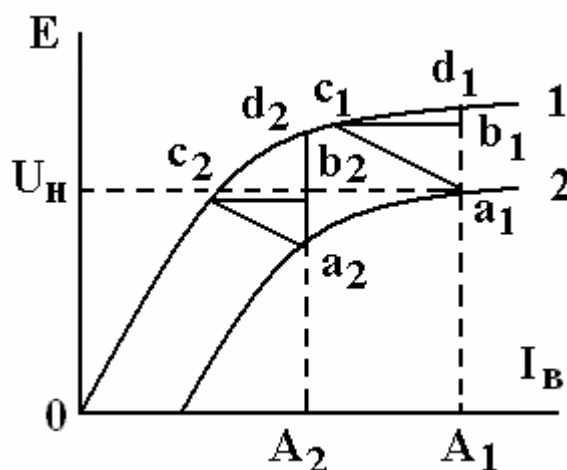


Рисунок 5.6 – Оценка степени насыщения магнитной системы

Чтобы определить продольную размагничивающую М.Д.С. реакции якоря, например, при номинальном напряжении $U_n = A_1 a_1$, строят реактивный треугольник $a_1 b_1 c_1$, катет этого треугольника

$$\overline{a_1 b_1} = I_a \Sigma R + \Delta U_{\text{щ}}, \quad (5.15)$$

где $I_a \Sigma R$ - падение напряжения в якорной цепи; $\Delta U_{\text{щ}}$ - падение напряжения в щеточном контакте; I_a - ток якоря, при котором снималась нагрузочная характеристика.

Катет $b_1 o_1$ учитывает размагничивающее действие поля якоря. Поэтому продольная размагничивающая Н. С. реакция якоря:

$$F_{dr} = \overline{b_1 c_1} \cdot \omega_{\text{в}}, \quad (5.16)$$

где ω_g - число витков в обмотке возбуждения; $b_1 c_1$ - берется в масштабе тока возбуждения.

3 Исследование изменения напряжения генератора при изменении нагрузки

Внешняя характеристика генератора представляет собой зависимость напряжения на его зажимах от тока нагрузки $U = f(I_a)$ при $R_g = const$, $n = const$. Эта характеристика имеет большое практическое применение, т. к. она позволяет произвести выбор генератора для питания разнообразных установок постоянного тока.

Снимать характеристику необходимо следующим образом: установить при номинальном токе якоря $I_a = I_{ан}$ и при $n = n_n$ номинальное напряжение U_n , затем, изменяя ток якоря от 0 до $1,25 I_{ан}$, измерять напряжение якоря генератора U . В этом диапазоне нагрузки нужно снять 5-6 точек.

Для этого включить QF1 и QF2. Установить потенциометром $R_{в2}$ $U = E_0 = 115B$. Включить QF3, изменяя переключателями S1 и S2 величину тока нагрузки, снять показания приборов и построить н. х.

Опытные данные заносятся в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

U, B		$R_a = const$
I_a, A		$n = n_n$

4. Исследование регулировочных свойств генератора

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость

$$E_0 = f(I_g), \text{ при } U = const; n = const.$$

Снятие регулировочной характеристики производится так: при холостом ходе устанавливается U_n генератора, затем нагружают генератор от $I_a = 0$ до $I_{ан}$, поддерживая $U_n = const$, $n = const$. **Для выполнения опыта следует включить QF1 и QF2. Установить потенциометром $R_{в2}$ $U = E_0 = 115B$. Включить QF3 и поддерживая потенциометром $R_{в2}$ $U = E_0 = 115B$ изменять переключателями S1 и S2 величину тока нагрузки. На основании экспериментальных данных построить р. х.**

Опытные данные занести в таблицу 5.4.

Таблица 5.4

I_g, A					$U = \dots$
I_a, A					

Примерный вид регулировочной характеристики показан на рисунке 5.7.

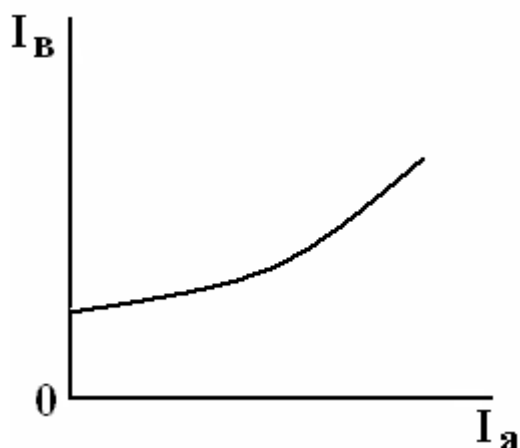


Рисунок 5.7 - Примерный вид регулировочной характеристики

По окончании работы стенд привести в исходное состояние.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему установки с перечнем оборудования и приборов, использованных в работе.
3. Таблицы экспериментальных данных, расчеты и соответствующие им графики.
4. Выводы о работе.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия машины постоянного тока как генератора.
2. Какие способы возбуждения ГПТ известны?
3. Расскажите, как протекает процесс самовозбуждения.
4. Какие причины мешают процессу возбуждения генератора?
5. Что такое характеристика холостого хода, и при каких условиях она снимается?
6. Объясните, как и при каких условиях снимаются нагрузочная, внешняя и регулировочная характеристики?
7. Где на рисунке 2.2 находится обмотка возбуждения генератора, чем регулируется ток возбуждения?
8. Где нагрузка генератора на рисунке 5.2, как определить подключена нагрузка к ГПТ или нет?

6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить условия включения генераторов постоянного тока на параллельную работу.
2. Снять внешние характеристики каждого из двух генераторов со смешанным возбуждением.
2. Включить генераторы на параллельную работу и снять внешнюю характеристику их параллельной работы.
3. Изучить условия и осуществить перевод нагрузки с одного генератора на другой.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

В электростанциях, в том числе и судовых электростанциях постоянного тока, предусматривается параллельная работа генераторов.

Под параллельной работой генераторов понимается их работа на общую нагрузку. Такая работа генераторов применяется в тех случаях, когда дробление мощности экономически целесообразно из-за переменного графика нагрузки станции. При минимальной нагрузке станции работает один генератор, а мере ее роста присоединяются остальные.

Целью настоящей работы является ознакомление с условиями включения генератора на параллельную работу, с распределением и регулированием нагрузки между генераторами.

1 Исследование распределения токов между генераторами при параллельной работе

Токи нагрузки, а соответственно и мощности, между параллельно работающими генераторами распределяются в соответствии с их внешними характеристиками. При экспериментальном исследовании этого вопроса необходимо снять:

- а) внешние характеристики каждого генератора;
- б) включить на параллельную работу два генератора и снять кривую внешней характеристики: $U_1 = U_2 = f(I_{\text{общ}})$ при $R_e = \text{const}$, $n = n_n$.

2 Исследование параллельной работы генераторов смешанного возбуждения

Параллельная работа генераторов смешанного возбуждения может быть устойчива при наличии уравнивающего привода, соединяющего между собой одноименные зажимы якорей, к которым присоединяется последовательные обмотки возбуждения.

Предположим, что два совершенно одинаковых генератора, не соединенных уравнительным проводом, имеющие одинаковые внешние характеристики (рисунок 6.1), включены на параллельную работу, и каждый из них отдает в сеть ток I . При случайном увеличении Э.Д.С. одного из них, например генератора №1, этот генератор возьмет на себя дополнительную нагрузку, разгружая другой. Вследствие увеличения тока, проходящего через последовательную обмотку первого генератора, его Э.Д. С. все время будет возрастать, что повлечет за собой дальнейшие увеличения нагрузки этого генератора и разгрузку другого и т. д.

В результате второй генератор перейдет в режим двигателя со встречным включением параллельной и последовательной обмоток. Вследствие перегрузки первого генератора его первичный двигатель замедлит свой ход, а в определенный момент времени произойдет переход всей нагрузки на второй генератор, первый генератор перейдет в двигательный режим и т.д. Возникает процесс колебания мощности агрегатов.

Неустойчивая работа генераторов происходит в том случае, когда генераторы работают в повышающей части внешней характеристики. Если же генераторы работают в понижающей части, то они ведут себя как машины параллельного возбуждения. При наличии уравнительного провода последовательные обмотки оказываются включенными параллельно (рисунок 6.2) и распределение тока в них будет обратно пропорционально их сопротивлениям. Поэтому соотношение добавочных намагничивающих сил последовательных обмоток возбуждения обеих машин не меняется при случайном изменении режима одной из машин. Однако это справедливо лишь в том случае, если сопротивление уравнительного провода достаточно мало, вследствие чего уравнительный провод следует брать относительно большого сечения. Если оба генератора имеют падающие внешние характеристики, то устойчивая параллельная работа возможна и без уравнительного провода.

Для снятия внешних характеристик генераторов, предназначенных для включения на параллельную работу собирают схему (рисунок 6.1); снимают внешние характеристики каждого генератора $U = f(I_{a1})$ и $U = f(I_{a2})$, при $n = \text{const}$, $R_{e1} = \text{const}$, $R_{e2} = \text{const}$.

Включение на параллельную работу генераторов осуществляется следующим способом: генераторы приводятся во вращение первичным двигателем, в качестве которых в лаборатории служат двигатели постоянного тока (в некоторых схемах – асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором).

При включении генератора на параллельную работу необходимо соблюдать следующие условия:

- 1) к шинам подключается вначале один генератор, возбужденный до номинального напряжения,
- 2) напряжение второго генератора должно быть равно напряжению на шинах, иначе при включении произойдет резкий бросок тока,

3) Полярность зажимов сети и генератора должно быть одинаково: генераторы подключаться к шинам одноименными зажимами (плюс к плюсу, минус к минусу).

Проверка полярности зажимов генератора и шин производится следующим образом: второй генератор подключается к шинам лишь одним из своих зажимов. При правильной полярности генератора вольтметр, взятый со шкалой на двойное рабочее напряжение, включенный между шиной и зажимами генератора (рисунок 6.3), должен показать нуль. При неправильной полярности вольтметр покажет двойное напряжение.

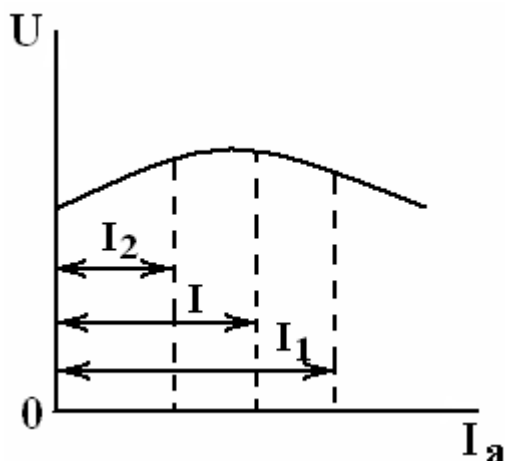


Рисунок 6.1 - Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения

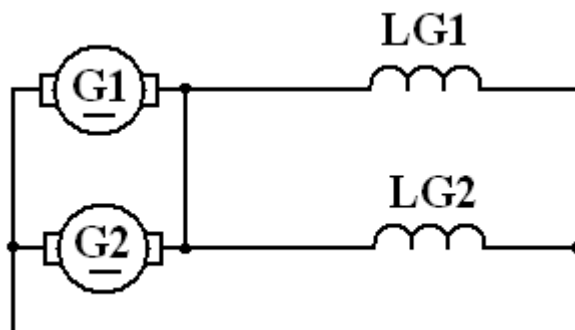


Рисунок 6.2 - Схема включения на параллельную работу генераторов с уравнительным приводом

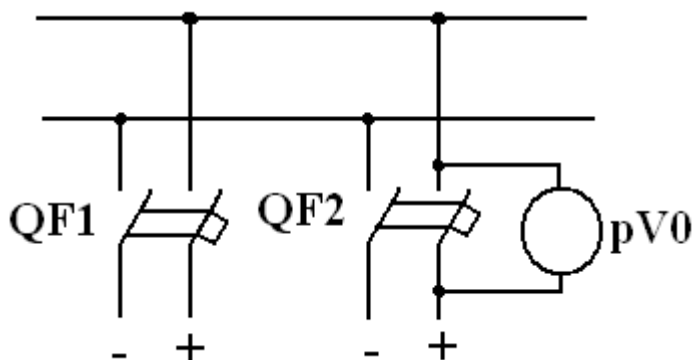


Рисунок 6.3 – Проверка правильности полярности подключения генераторов

3 Исследование распределения тока и нагрузки между параллельно работающими генераторами при постоянном напряжении

Для того чтобы установить, как изменяется ток возбуждения генераторов при переводе нагрузки с одного из них на другой, необходимо произвести следующий опыт: нагрузить генератор так, чтобы $I_{a1} + I_{a2} \approx I_{an}$. Затем, поддерживая напряжение и скорость вращения постоянными, перевести нагрузку на один из генераторов, изменяя токи возбуждения. Здесь необходимо снять кривые изменения тока возбуждения при переводе нагрузки.

А. Исследование регулирования мощности параллельно работающих генераторов

При уменьшении нагрузки возникает необходимость отключения одного из нескольких генераторов от шин. Прежде, чем отключить генератор, с него переводят всю нагрузку на оставшиеся в работе агрегаты. Перевод нагрузки должен осуществляться так, чтобы напряжение на шинах оставалось постоянным. Это достигается регулированием токов возбуждения генераторов. Токи нагрузки будут изменяться в соответствии с равенствами

$$I_{a1} = \frac{E_1 - U}{\Sigma R_{a1}}; \quad I_{a2} = \frac{E_2 - U}{\Sigma R_{a2}}. \quad (6.1)$$

При переводе нагрузки с одного генератора на другой необходимо одновременно изменять токи возбуждения обоих генераторов, причем у того, который хотят нагрузить – увеличивать, а у того, который хотят разгрузить – уменьшать. Доводя ток нагрузки у разгруженного генератора до нуля, его можно отключить от шин.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема стенда приведена на рисунке 6.4.

Приводными двигателями генераторов смешанного возбуждения являются двигатели постоянного тока, пуск которых осуществляется через пусковое сопротивление R_{nm} . Регулирование скорости вращения двигателей осуществляется изменением тока возбуждения в параллельных обмотках с помощью сопротивлений R_{g21} и R_{g22} .

В схеме предусмотрена поочередная работа каждого из генераторов на нагрузку и параллельная работа этих генераторов на общую нагрузку. В качестве нагрузки в лабораторной работе применен реостат R_n .

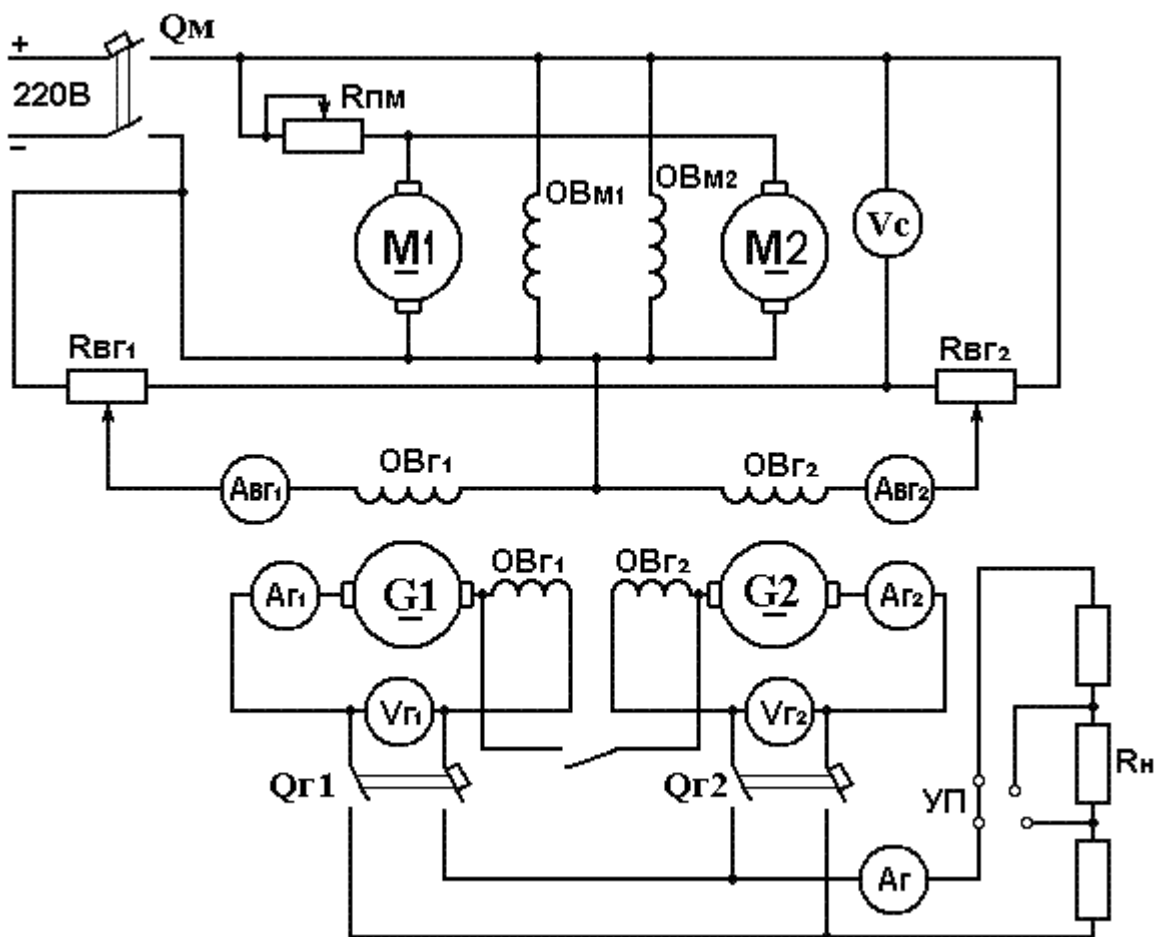


Рисунок 6.4 - Схема включение генератора на параллельную работу

Элементы схемы:

Q_{FM} , Q_{F1} , Q_{F2} – автоматические выключатели;

M_1 , M_2 - двигатели постоянного тока;

G_1 , G_2 - генераторы постоянного тока;

pA_1 , pA_2 , pA_3 , pA_4 , pA_5 - амперметры;

pV_1 , pV_2 , pV_3 - вольтметры;

R_n - реостат нагрузки;

R_{nm} - пусковой реостат;

$R_{\phi 21}$, $R_{\phi 22}$ - потенциометры в цепях возбуждения;

S1 – переключатель нагрузки;

S2 – выключатель на уравнительном проводе.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для того чтобы понять как происходит распределение нагрузки между двумя генераторами смешанного возбуждения, следует снять и построить

внешние характеристики первого и второго генераторов $U = f(I_{a1})$, $U = f(I_{a2})$ общую внешнюю характеристику $U = f(I_{общ})$ при $U = const$, $n = n_H$ с уравнильным проводом.

Последовательность проведения опытов такова:

1. В исходном положении автоматы QF1, QF2, QF3 должны быть в положении «откл.», а токи в цепях возбуждения генераторов должны отсутствовать.

2. Включить QFм, плавно ввести пусковой реостат $R_{нм}$, потенциометрами $R_{вз1}$, $R_{вз2}$ установить $U_{10} = U_{20} = 115 В$.

3. Включить QF1 и снять внешнюю характеристику G1 - $U_1 = f(I_{a1})$, регулируя ток нагрузки сопротивлением R_H .

4. Отключить QF1 и включить QF2. Снять внешнюю характеристику G2 - $U_2 = f(I_{a2})$, регулируя ток нагрузки сопротивлением R_H .

5. Оставить включенным генератор G2, установить по вольтметрам pV1 и pV2 напряжения $U_{10} = U_{20} = 115 В$ и включить QF1. Снять результирующую внешнюю характеристику $U = f(I_{общ})$, где $U = U_1 = U_2$, $I_{общ} = I_{a1} + I_{a2}$.

6. Перевести нагрузку с G2 на G1. Для этого одновременно увеличивать $I_{в1}$ первого генератора и уменьшать $I_{в2}$ второго генератора так, чтобы напряжение на шинах не изменялось $U_{с1} = U_{с2}$.

7. Перевести схему в исходное состояние.

Опытные данные занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

№ опыта	Первый генератор		Второй генератор		Параллельная работа генераторов	
	$U_1, В$	$I_{a1}, А$	$U_2, В$	$I_{a2}, А$	$U = U_1 = U_2, В$	$I_{общ}, А$

По данным опыта строятся внешние характеристики каждого генератора и общая внешняя характеристика в одних осях, а также кривые изменения токов возбуждения генераторов при переводе нагрузки, примерный характер которых представлен на рисунке 6.6.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.

2. Схему установки с перечнем оборудования и приборов, использованных в работе.

3. Таблицы экспериментальных данных, расчеты и соответствующие им графики.

4. Выводы о работе.

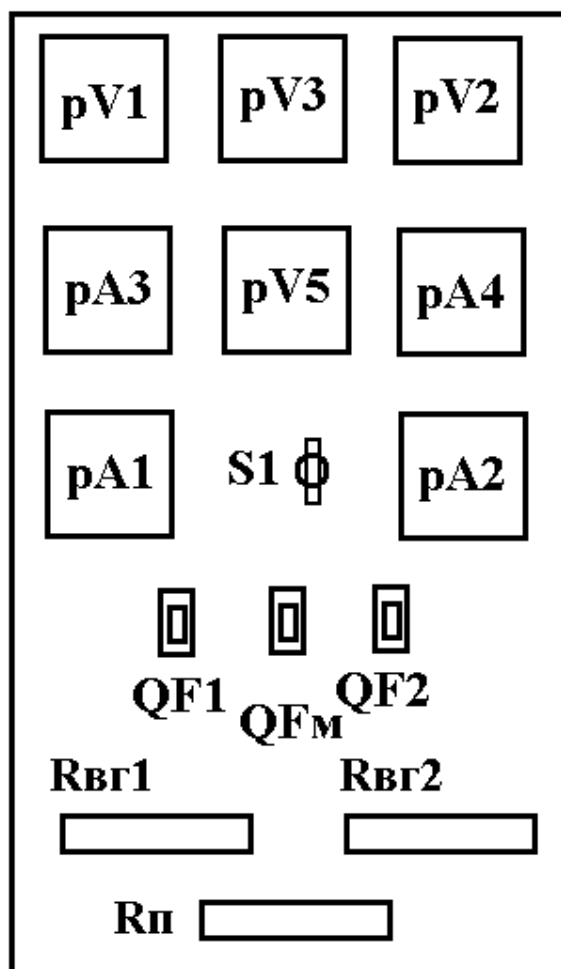


Рисунок 6.5 – Размещение оборудования на стенде

Контрольные вопросы

1. Для чего предусматривается параллельная работа генераторов постоянного тока?
2. Условия включения генераторов на параллельную работу.
3. Как проверить правильность подключения генераторов на параллельную работу (полярность)?
4. Как распределяется нагрузка между параллельно работающими генераторами (объяснить, используя внешние характеристики)?
5. Зачем применяется уравнильный провод при параллельной работе генераторов смешанного возбуждения?
6. Как правильно перевести нагрузку с одного генератора на другой?

7 Лабораторная работа №4

ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить конструкцию и принцип действия электромашинного усилителя (ЭМУ).

2. Исследовать работу электромашинного усилителя при холостом ходе. Для исследования магнитной системы ЭМУ снять характеристики холостого хода:

а) для первой ступени усиления (первого каскада) – зависимость Э.Д.С. на выходе от тока поперечной цепи от тока управления: $E_q = f(I_y)$ при $n=const$;

б) для второй ступени усиления (второго каскада) – зависимость Э.Д.С. на выходе от тока поперечной цепи $E_d = f(I_q)$ при $n=const$;

в) результирующая характеристика холостого хода – зависимость Э.Д.С. на выходе усилителя от тока управления $E_d = f(I_y)$ при $n=const$.

3. Исследовать характеристики ЭМУ.

а) при работе ЭМУ на переменное нагрузочное сопротивление при постоянном токе управления изменяются ток I_d и напряжения U_d на выходе усилителя. Изменение этих величин зависит от степени компенсации реакции якоря по продольной оси. Для изучения этого вопроса необходимо снять внешние характеристики ЭМУ:

$U_d = f(I_d)$ при $I_y = const$ и $n=const$ для трех степеней компенсации:

- для полной компенсации;
- для недокомпенсации;
- для перекомпенсации.

б) при работе ЭМУ на постоянное нагрузочное сопротивление (например, в качестве возбудителя) при изменении тока управления изменяются напряжение и ток на выходе.

Для изучения этого режима снимаются характеристики регулирования, представляющие собой зависимость напряжения на выходе от тока управления:

$$U_d = f(I_y) \text{ при } n=const.$$

Характеристики регулирования снимаются при тех же степенях компенсации, что и внешние характеристики.

4. По опытным данным:

а) построить характеристики холостого хода.

б) по результирующей характеристике холостого хода определять коэффициент насыщения.

в) построить на одном графике внешние характеристики и по ним определить:

- процентное изменение напряжения при $I_d = I_{dH}$;
- коэффициенты усиления для первой и второй ступени усиления и результирующий коэффициент усиления ЭМУ.

5. Построить характеристики регулирования.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

В настоящее время широкое развитие получила автоматика производственных процессов. Наиболее сложным и важным видом автоматики является автоматическое регулирование и управление.

Системы автоматического регулирования создаются для того, чтобы автоматически, без вмешательств человека, поддерживать с определенной точностью заданный режим работы механизма или целой системы.

В качестве регуляторов в таких системах часто применяются электрические машины. Принцип автоматического регулирования с помощью электромашинного усилителя можно уяснить из схемы для регулирования напряжения генератора постоянного тока (рисунок 7.1).

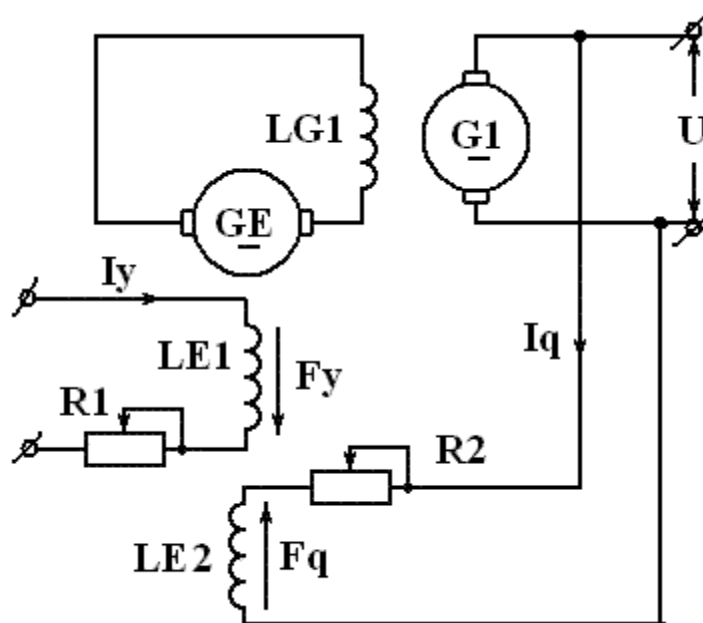


Рисунок 7.1 - Схема автоматического регулирования напряжения генератора G1 с помощью возбудителя GE

Возбудитель генератора GE является одновременно и регулятором. Возбудитель имеет две обмотки возбуждения: задающую обмотку LE1, подключенную к независимому источнику питания, обмотку обратной связи LE2, подключенную к зажимам генератора. Намагничивающие силы F_y и F_q этих обмоток действуют навстречу друг другу. Следовательно, магнит-

направленный противоположно потоку управления Φ_u . Поток Φ_{ad} во много раз больше потока Φ_u , поэтому для нормальной работы усилителя поток Φ_{ad} необходимо скомпенсировать. Для этой цели на статоре устраивается компенсационная обмотка (КО), обтекаемая током I_d и создаваемая поток Φ_k . Для более полной компенсации реакции якоря эта обмотка делается, распределенной по пазам статора.

Намагничивающая сила компенсационной обмотки рассчитывается так, чтобы она была больше М.Д.С., реакция якоря. С помощью сопротивления $R_{шк}$, шунтирующего эту обмотку, регулируется степень компенсации реакции якоря.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема стенда используемого в лабораторной работе приведена на рисунке 7.3, размещение оборудования показано на рисунке 7.4.

Приводным двигателям к ЭМУ является двигатель постоянного тока параллельного возбуждения. Запуск двигателя осуществляется через пусковой реостат $R_{пм}$. Обмотка управления ЭМУ запитана от источника постоянного тока напряжением 220В через реостаты R_{y1} и R_{y2} .

В схеме предусмотрено снятие показаний при работе первой и второй ступеней усиления, для изменения степени компенсации реакции якоря параллельно компенсационной обмотке ЭМУ подключено переменное сопротивление $R_{шк}$. Нагрузкой ЭМУ в лабораторной работе является переменное сопротивление R_H .

В схеме предусмотрено снятие показаний при работе первой и второй ступеней усиления, для изменения степени компенсации реакции якоря параллельно компенсационной обмотке ЭМУ подключено переменное сопротивление $R_{шк}$. Нагрузкой ЭМУ в лабораторной работе является переменное сопротивление R_H .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить конструкцию и принцип действия электромашинного усилителя поперечного поля.

2. Исследовать работу ЭМУ при холостом ходе.

ЭМУ поперечного поля имеет двухступенчатый способ возбуждения. Для первой ступени усиления входной величиной является ток управления I_u , выходной ток I_q – поперечной цепи. Для второй ступени входной величиной является ток I_q , входной – ток I_d и напряжение U_d . При этом способе возбуждения ЭМУ достигается высокий коэффициент усиления.

Для оценки магнитной системы данного типа усилителя снимаются три характеристики холостого хода:

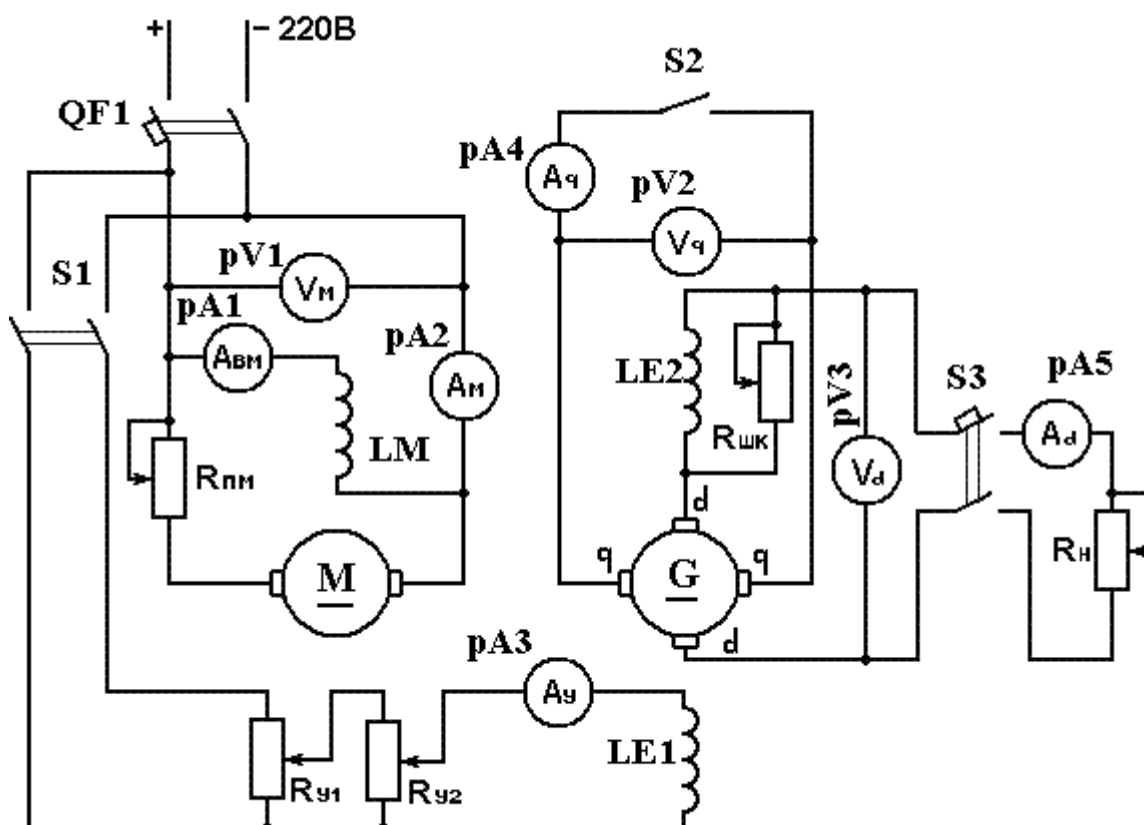


Рисунок 7.3 – Электрическая принципиальная схема стенда для исследования характеристик ЭМУ

Элементы схемы:

G - электромашинный усилитель;

LM, M – обмотка возбуждения ДПТ и сам ДПТ;

LE1 – обмотка управления ЭМУ;

LE2 – компенсационная обмотка ЭМУ;

R_{nm} - пусковое сопротивление ЭМУ;

$R_{шк}$ - сопротивление, шунтирующее КО;

R_H - реостат нагрузки;

QF – автоматический выключатель;

S1, S2, S3 - тумблеры;

pA2, pA4, pA5 - амперметры;

pA1, pA3 – миллиамперметры;

pV1, pV2, pV3 - вольтметры.

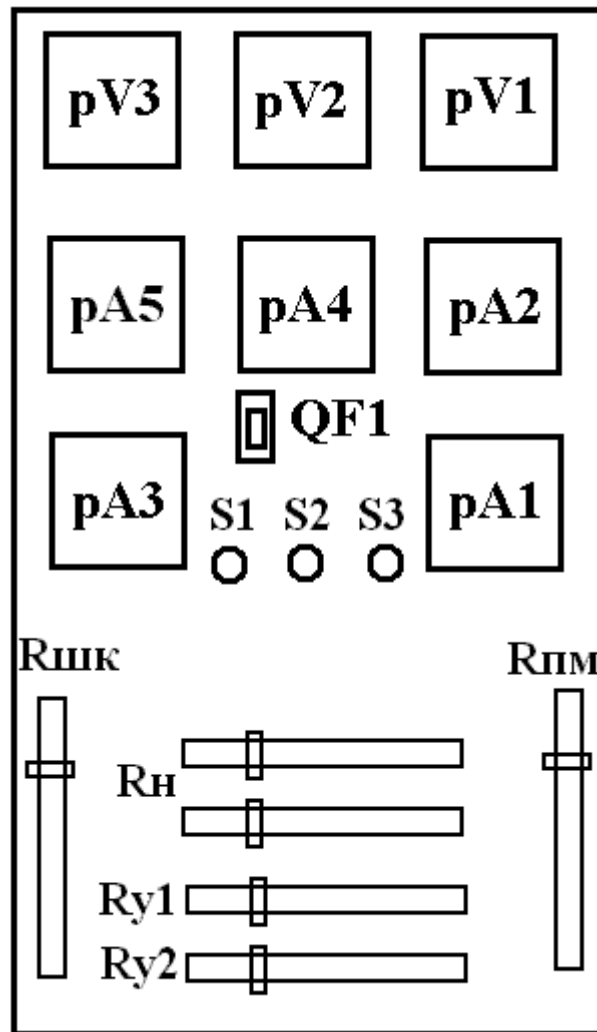


Рисунок 7.4 – Размещение оборудования на стенде

- а) характеристика холостого хода первой ступени $E_q = f(I_y)$ при $n = \text{const}$;
- б) характеристика холостого хода второй ступени $E_d = f(I_q)$ при $n = \text{const}$;
- в) результирующая характеристика холостого хода $E_d = f(I_y)$ при $n = \text{const}$;

Характеристики снимаются по схеме представленной на рисунке 7.3.

2.1 В исходном состоянии автоматический выключатель QF1 и тумблеры S1, S2, S3 должны находиться в положении «откл», реостаты Rпм, Rшк, R_{y1} , R_{y2} , R_n – в положении пуск (П).

2.2 Включить автомат QF1, плавно вывести реостат Rпм, т.е. осуществить плавный пуск приводного двигателя.

2.3 Подать питание на обмотку управления ЭМУ, включив S1. Изменяя реостатами R_{y1} и R_{y2} величину тока возбуждения, снять характеристику холостого хода первой ступени (зависимость $E_q = f(I_q)$). Вернуть R_{y1} и R_{y2} в исходное положение.

2.4. Автомат QF1 и тумблер S1 остаются включенными. Замкнуть поперечную обмотку ЭМУ накоротко, включить выключатель S2. Изменяя Ry_1 и Ry_2 величину тока возбуждения снять характеристику холостого хода второй ступени (зависимость $Ed = f(Iq)$) и х.х.х. третьей ступени - $Ed = f(Iy)$.

Опытные данные занести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1

Первая характеристика	Ed, B					Примечание
	Iy, A					
Вторая характеристика	Ed, B					
	Iq, A					
Третья характеристика	Eq, B					Строки таблицы можно заполнить, имея данные первой и второй характеристик
	Iy, A					

Характеристики холостого хода ЭМУ представляют собой практически линейные зависимости, так как магнитная система этих машин выполняется слабо насыщенной. Это делается с целью повышения коэффициента усиления и получения линейной зависимости между входными и выходными величинами, что является желательным условием при работе ЭМУ в схемах автоматического регулирования.

Повышение коэффициента усиления при малом насыщении ЭМУ объясняется тем, что М.Д.С. и мощность обмотки возбуждения, необходимые для получения заданных значений выходного напряжения и выходной мощности, будут меньше чем в насыщенной машине.

3. Исследовать характеристики ЭМУ при работе на нагрузку.

3.1 Внешние характеристики

Одной из важнейших характеристик ЭМУ при работе на нагрузку является внешняя характеристика, представляющая собой зависимость напряжения на выходе Ud от выходного тока Id , при постоянном значении тока управления Iy и скорости вращения n . Внешние характеристики снимаются по схеме представленной на рисунке 7.3.

Выходное напряжение ЭМУ поперечного поля равно определяется выражением

$$Ud = Ed - Id \Sigma Rd, \quad (7.1)$$

где Ed – Э.Д.С. выходной ступени; ΣRd - сопротивление цепи якоря выходной ступени.

Внешние характеристики зависят от степени компенсации реакции якоря и тока Iy . Если поле якоря, обусловленное током Id , полностью скомпенсировано, то при постоянном токе управления Iy результирующий поток по продольной оси будет постоянным, поэтому ток поперечной цепи Id и

Э.Д.С. E_d также будут постоянными при изменении тока I_d . Вследствие этого уменьшение входного напряжения U_d при увеличении тока произойдет из-за падения напряжения в цепи якоря выходной ступени (рисунок 7.5, кривая 1).

При неполной компенсации реакции якоря, если М.Д.С. компенсационной обмотки F_k меньше М.Д.С. якоря F_{ad} , с увеличением тока I_d вследствие размагничивающего действия поля якоря, уменьшится продольный поток, что вызовет уменьшение тока I_q и Э.Д.С. E_d . Внешняя характеристика в этом случае будут падать более круто, чем в предыдущем случае (рисунок 7.5, кривая 2).

При перекомпенсации, если $F_k > F_{ad}$, М.Д.С. F_d будет увеличиваться при возрастании тока I_d , поэтому внешняя характеристика расположена выше, чем в первых случаях (рисунок 7.5, кривая 3).

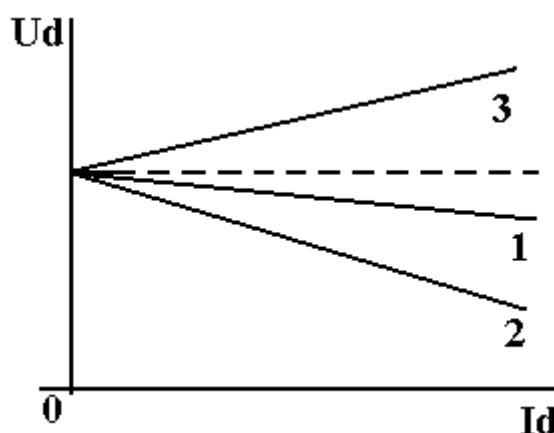


Рисунок 7.5 - Внешняя характеристика ЭМУ при различной степени компенсации

Степень компенсации характеризуется отношением М.Д.С. компенсационной обмотки к М.Д.С. реакции якоря по продольной оси

$$C_k = \frac{F_k}{F_{ad}}.$$

При полной компенсации $C_k = 1$, при недокомпенсации $C_k < 1$ и при перекомпенсации $C_k > 1$.

Степень компенсации устанавливается с помощью шунтирующего сопротивления $R_{шк}$. Полную компенсацию устанавливают таким образом, чтобы при постоянных значениях тока управления I_u и скорости вращения, ток поперечной цепи I_q оставался постоянным при изменении выходного тока I_d (рисунок 7.5, кривая 1).

При увеличении шунтирующего сопротивления по сравнению с сопротивлением при полной компенсации возникает перекомпенсация (рисунок 7.5, кривая 3), а при уменьшении - недокомпенсация (рисунок 7.5, кривая 2).

Степень компенсации во всех случаях следует определять при одном и том же значении тока выходной цепи I_d (например, при $I_d = I_{d_n}$).

После настройки компенсации следует заметить положение движка реостата.

Внешние характеристики снимаются следующим образом:

3.1.1 Включить QF1, S1, S2, S3. Установить при $I_d=0$ и $E_d=110B$.

3.1.2 Снять зависимости $E_d=f(I_d)$ при различных степенях компенсации Φ_{ad} , изменяя степень компенсации реостатом $R_{шк}$.

Опытные данные записываются в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

№ опыта	U_d , В	I_d , А

3.1.3 Для оценки свойства ЭМУ необходимо определить его коэффициент усиления.

Каждая ступень характеризуется своей величиной коэффициента усиления.

Коэффициент усиления первой ступени равен отношению мощности поперечной (короткозамкнутой) цепи к мощности обмотки управления

$$K_{y1} = \frac{I_q \cdot (I_q \cdot R_q + \Delta U_{щq})}{I_y^2 \cdot R_y}, \quad (7.3)$$

где R_q – сопротивление поперечной цепи; $\Delta U_{щq}$ - падение напряжения в щеточных контактах поперечной цепи; R_y – сопротивление обмотки управления.

Коэффициент усиления второй ступени определяется отношением мощности на выходе ЭМУ к мощности поперечной цепи

$$K_{y2} = \frac{I_d \cdot U_d}{I_q \cdot (I_q \cdot R_q + \Delta U_{щq})}, \quad (7.4)$$

Результирующий коэффициент усиления находится по выражению

$$K_y = \frac{U_d \cdot I_d}{I_y^2 \cdot R_y} = \frac{I_q \cdot (I_q \cdot R_q + \Delta U_{щq})}{I_y^2 \cdot R_y} \cdot \frac{U_d \cdot I_d}{I_q \cdot (I_q \cdot R_q + \Delta U_{щq})} = K_{y1} \cdot K_{y2} \quad (7.5)$$

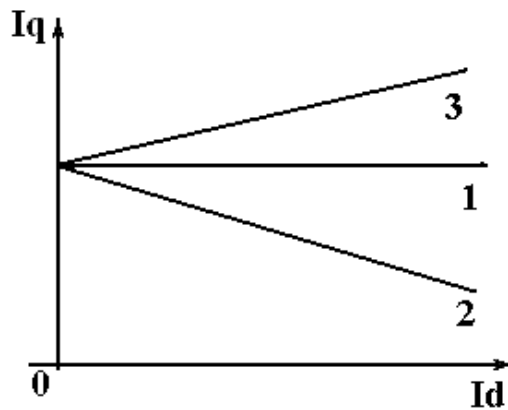


Рисунок 7.6 - Изменение тока поперечной цепи при различных степенях компенсации

Коэффициенты усиления определяются по внешним характеристикам, снятым при трех степенях компенсации.

Коэффициенты усиления рекомендуется уделить при токе I_{dH} . По внешним характеристикам находят соответствующее этому току выходное напряжение U_d , а ток поперечной цепи I_q и ток управления I_y находят из рисунка 7.6 и рисунка 7.8.

Рассчитав коэффициент усиления по вышеприведенным формулам, строят кривую зависимости результирующего коэффициента усиления от степени компенсации. Характер этой кривой показан на рисунке 7.7.

Коэффициент усиления повышается при перекомпенсации и понижается при недокомпенсации.

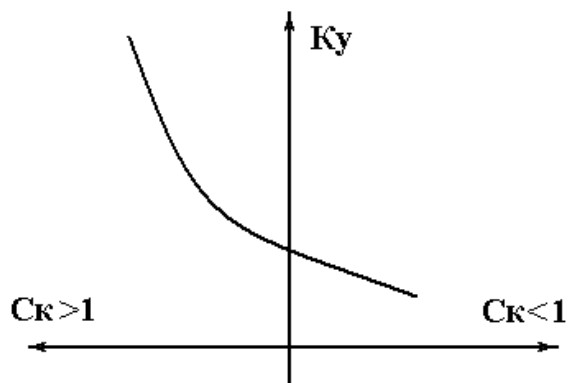


Рисунок 7.7 - Зависимость коэффициента усиления от степени компенсации

3.2 Характеристики регулирования

При работе ЭМУ на постоянное нагрузочное сопротивление (например, в качестве возбудителя) представляет интерес характеристики регулирования, то есть зависимость $I_d = f(I_y)$, при $n = const$.

Эти характеристики снимаются по схеме представленной на рисунке

7.3 для тех же трех степеней компенсации, что и внешние характеристики.

Порядок выполнения опытов такой:

3.2.1 Включить QF1, S1, S2, S3.

3.2.2 Изменяя потенциометрами R_{y1} и R_{y2} величину тока управления при $R_H = \text{const}$, снять зависимость $U_d = f(I_y)$ при различных степенях компенсации Φ_{ad} . Степень компенсации изменяется реостатом $R_{ШК}$.

Опытные данные заносятся в таблицу 7.3.

Привести схему в исходное состояние. Отключить QF1.

Таблицу 7.3

Полная компенсация		Недокомпенсация		Перекомпенсация	
I_y , А	I_d , А	I_y , А	I_d , А	I_y , А	I_d , А

Примерный вид кривых регулирования показан на рисунок 7.8.

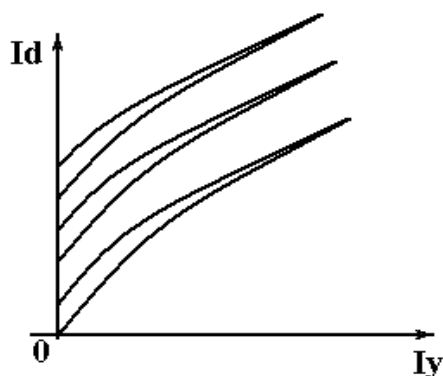


Рисунок 7.8 - Характеристика регулирования при различных степенях компенсации

Вследствие гистерезиса при одном и том же токе управления I_y , ток нагрузки I_d , имеет два значения, поэтому при работе ЭМУ в схемах автоматического регулирования будет иметь место неоднозначность регулировки.

Для уменьшения петли гистерезиса применяют специальную обработку электротехнической стали, из которой изготавливается магнитная система машины.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему установки с перечнем оборудования и приборов, использованных в работе.
3. Таблицы экспериментальных данных, расчеты и соответствующие им графики.
4. Выводы о работе.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях применяются ЭМУ?
2. Объясните принцип автоматического регулирования.
3. Каковы особенности конструкции ЭМУ поперечного поля?
3. Объяснить принцип действия ЭМУ поперечного поля.
4. Как определяется коэффициент усиления ЭМУ?
5. Какой сигнал (постоянный или переменный) усиливает ЭМУ?
6. Сколько ступеней усиления у ЭМУ и какие?
7. Какие характеристики снимаются и для чего?
8. Почему характеристики холостого хода имеют практически линейный вид?

8 Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить конструкцию и принцип действия трансформатора.
2. Провести опыт холостого хода.
3. Провести опыт короткого замыкания.
4. Определить коэффициент трансформации.
5. Построить характеристики холостого хода $I_0 = f(U_1)$;
 $P_0 = f(U_1)$; $I_0 = f(U_1)$.
6. Найти номинальное значение тока холостого хода I_{0H} , активную I_a и реактивную I_p составляющие тока, $\cos \varphi_{0H}$ и потери холостого хода P_{0H} .
7. Построить характеристики короткого замыкания $U_K = f(I_K)$;
 $P_K = f(I_K)$; $\cos \varphi_K = f(I_K)$.
8. Определить процентные значения напряжения короткого замыкания U_K и его активной U_a и реактивной U_p составляющих, а также номинальные потери короткого замыкания P_{KH} и $\cos \varphi_{KH}$, приведенные к температуре $75^\circ C$.
9. Определить напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора U_2 К.П.Д. при $U_1 = U_H$, номинальном токе ($\beta=1$) и $\cos \varphi_2=0,8$.
10. Рассчитать и построить зависимости $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0.5$.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный преобразователь с двумя или больше обмотками, предназначенный (наиболее часто) для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Преобразование энергии в трансформаторе осуществляется переменным магнитным полем. Трансформаторы широко применяются при передаче электрической энергии на большие расстояния, при распределении ее между приемниками, а также в различных выпрямительных, усилительных сигнализационных и других устройствах. При передаче электрической энергии от электростанции к потребителям сила тока в линии обуславливает потери энергии в этой линии и расход цветных металлов на ее устройство. Если при одной и той же передаваемой мощности увеличить напряжение, то сила тока в такой же мере уменьшится, а, следовательно, можно будет применить провода с меньшим сечением. Это сократит расход цветных металлов при устройстве линии электропередачи и снизит потери в ней.

Высокое напряжение, при котором происходит передача электроэнергии, не может быть непосредственно использовано для питания приемников и подводится к ним через понижающие трансформаторы.

В целях улучшения магнитной связи между первичной и вторичной обмотками их помещают на стальном магнитопроводе. Обмотки изолируют друг от друга и от магнитопровода. Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), а обмотку более низкого напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН). Обмотку, включенную в сеть источника электрической энергии, называют первичной, а ту, от которой энергия подается к приемнику, – вторичной. Если первичное напряжение меньше вторичного, трансформатор называют повышающим, а иначе понижающим. Любой трансформатор может быть использован и как повышающий и как понижающий. Повышающие трансформаторы применяют для передачи электроэнергии на большие расстояния, а понижающие – для распределения электроэнергии между потребителями.

Обмоткам трансформатора придают преимущественно цилиндрическую форму, выполняя их при малых токах из круглого медного изолированного провода, а при больших токах из медных шин прямоугольного сечения. Ближе к сердечнику располагают обмотку низшего напряжения, так как ее легче изолировать от него, чем обмотку высшего напряжения. Обмотку низшего напряжения изолируют от сердечника прослойкой из изоляционного материала, такая же изолирующая прокладка имеется и между обмотками.

Для лучшего охлаждения в магнитопроводах мощных трансформаторов устраиваются охлаждающие (вентиляционные) каналы в плоскостях, параллельных и перпендикулярных плоскости стальных листов. Такие каналы устраивают и в обмотках.

Изменение величины (трансформация) напряжения характеризуется величиной коэффициента трансформации, равного отношению числа витков обмотки ВН к числу витков обмотки НН:



$$K = \frac{U_{вн}}{U_{нн}} = \frac{W_{вн}}{W_{нн}}. \quad (8.1)$$

Коэффициент трансформации определяется при холостом ходе по схеме рисунка 8.1.

Трансформатор с разомкнутой вторичной обмоткой присоединяется к источнику переменного напряжения, с помощью ЛАТР устанавливают $U_H \approx 220В$ и вольтметрами измеряются первичное и вторичное напряжения в обмотках трансформатора. Чтобы избежать ошибок, связанных с возможными колебаниями напряжения сети, отсчет по вольтметрам, включенным на первичной и вторичной обмотке, следует производить одновременно (по одному сигналу).

Коэффициент трансформации может определяться как при номинальном напряжении, так и при напряжении, пониженном номинального.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема стенда используемого в лабораторной работе приведена на рисунке 8.1, расположение оборудования на лабораторном стенде показано на рисунке 8.6.

В работе исследуется трехфазный трансформатор. Для проведения опытов имеется возможность измерять напряжение и ток в первичной и вторичной обмотках трансформатора, а также мощность первичной цепи. Для этого используются амперметры pA1-pA3, вольтметры pV1-pV6, pW1.

В схеме предусмотрено снятие показаний при работе трансформатора на холостом ходу и при коротком замыкании вторичной обмотки.

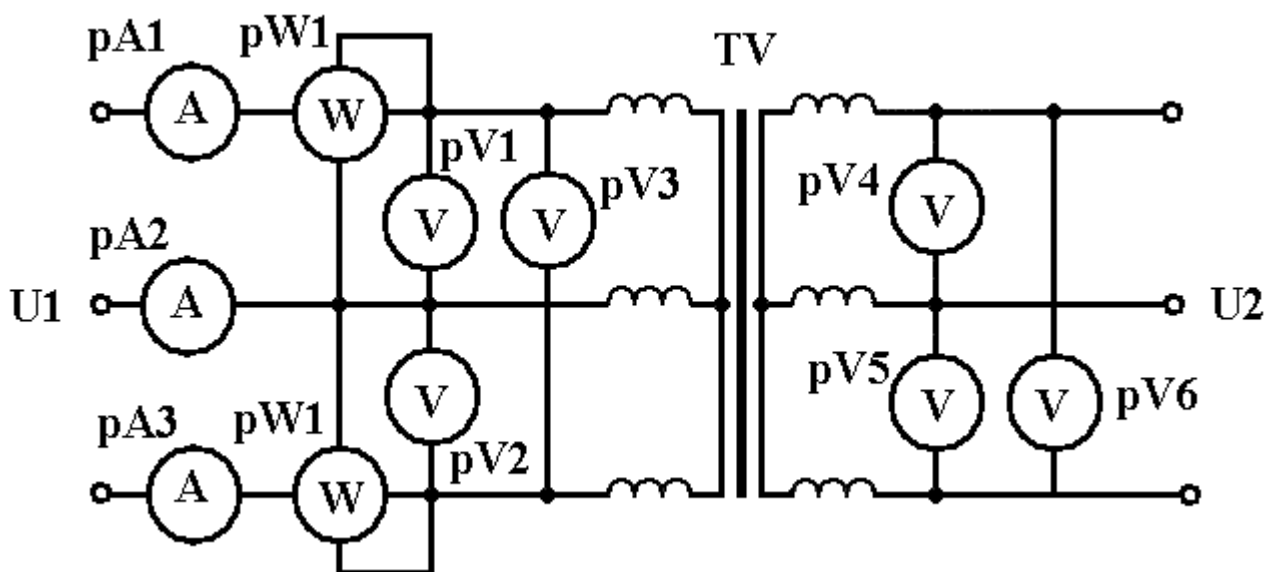


Рисунок 8.1 - Схема для проведения опыта холостого хода

Элементы схемы:

pA1-pA3 – амперметры,

pV1-pV6 – вольтметры,

pW1 – ваттметр,

TV – трансформатор напряжения,

U1, U2 – первичное и вторичное напряжения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить конструкции и принцип действия трансформаторов.

2. Исследовать работу трансформатора в режиме холостого хода.

Опыт холостого хода проводится с целью определения тока и потерь холостого хода трансформатора. Током холостого хода называется ток, который при номинальном значении напряжения и номинальной частоте устанавливается в одной из обмоток трансформатора (первичной) при разомкнутой другой (вторичной).

Потери, возникающие в трансформаторе при этом режиме, называются потерями холостого хода. Ток холостого хода принято выражать в процентах от номинального тока первичной обмотки.

2.1 Сначала необходимо проверить, чтобы стенд находился в исходном состоянии: автоматические выключатели QF1, QF2 должны находиться в положении «откл.», переключатели S1, S2 – в положении «0», движок автотрансформатора ЛАТР должен быть повернут против часовой стрелки до отказа. Перед проведением опыта следует определить цену деления ваттметра.

2.2 Для проведения опыта холостого хода необходимо поставить S2 в положение «Х.Х.», S1 – в положение «ОТ», включить QF1. Далее изменяя ЛАТРом напряжение на первичной обмотке U_{01} от 0 до 1,1 номинального ($U_n \approx 250B$), записывать показания вольтметров первичной и вторичной обмоток (U_{01} и U_{02}), амперметра и ваттметра, включенных в цепь первичной обмотки ($I_{01}; P_{01}$) в таблицу 8.1. После окончания измерений отключить повернуть ЛАТР против часовой стрелки до упора, поставить S1 и S2 в положение «0», отключить QF1.

Таблица 8.1

№ п/п	Измерения			Вычисления		
	U_{01}	I_{01}	P_{01}	$\cos \varphi_0$	I_a	I_p
	В	А	Вт		А	В

2.3 Далее необходимо определить коэффициент мощности при холостом ходе по формуле 8.2, активную и реактивную составляющие тока холостого хода (выражения 8.3) и записать результаты в таблицу 8.1.

Коэффициент мощности при холостом ходе можно подсчитать по следующей формуле:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{01}}{U_{01} I_{01}}. \quad (8.2)$$

По опытным данным можно определить активную и реактивную составляющие тока холостого хода:

$$I_a = I_{01} \cdot \cos \varphi_0; \quad I_p = I_{01} \cdot \sin \varphi_0, \quad (8.3)$$

обычно $I_a < I_p$.

Найденные значения I_{01} , I_a , I_p выражают в процентах от номинального тока I_n . Ток холостого хода при номинальном напряжении обычно составляет от (3-4)% до (10-12)% от номинального тока. Большие значения соответствуют трансформаторам мощностью до 11 кВА. С ростом мощности трансформатора относительные значения тока холостого хода уменьшаются.

2.4 По данным таблицы 8.1 следует построить характеристики холостого хода трансформатора: $I_{01} = f(U_{01}); P_{01} = f(U_{01}); \cos \varphi_0 = f(U_{01})$.

По характеристикам холостого хода определяют значение I_{01} , P_{01} , $\cos \varphi_0$ для номинального напряжения U_n .

На рисунке 8.2 приведена схема замещения трансформатора для режима холостого хода. Согласно этой схеме, по данным опыта холостого хода определяются значения:

$$Z_0 = |Z_\mu + Z_1| = \frac{U_{01}}{I_{01}}; \quad (8.4)$$

$$r_0 = r_\mu + r_1 = \frac{P_{01}}{I_{01}^2}; \quad X_0 = X_\mu + X_1 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \quad (8.5)$$

Вследствие нелинейной зависимости между напряжением U_1 и током при холостом ходе I_{01} значение Z_μ , r_μ , x_μ не являются постоянными для данного трансформатора и изменяются с изменением напряжения U_1 . На практике принято рассчитывать эти величины для номинального значения напряжения трансформатора U_{1n} .

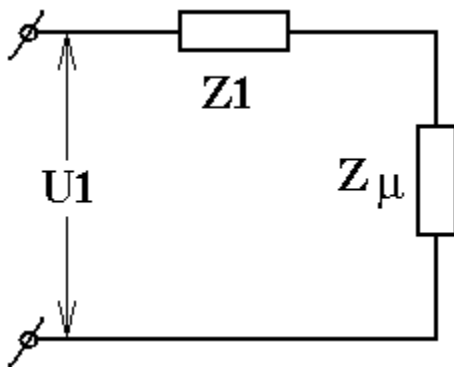


Рисунок 8.2

Электрические потери в обмотках и добавочные потери, обусловленные вихревыми токами, наведенные полем рассеяния в обмотках и конструктивных деталях трансформатора, пропорциональны квадрату тока. Поскольку первичная обмотка трансформатора при холостом ходе обтекается очень малым током ($I_{01} = (0,03 - 0,1)I_H$), а ток вторичной обмотки равен нулю, можно, не сделав заметной ошибки, пренебречь этими потерями и считать, что при холостом ходе трансформатора все измеренные потери являются магнитными потерями в сердечнике. Вследствие этого можно принять:

$$r_0 = r_1 + r_\mu \approx r_\mu \quad \text{и} \quad r_\mu \approx \frac{P_{01}}{I_{01}^2}. \quad (8.6)$$

Индуктивное падение напряжения и первичной обмотки при холостом ходе $I_{01} \cdot x_\mu$ и им можно пренебречь. На этом основании можно считать:

$$X_0 = X_1 + X_\mu \approx X_\mu. \quad (8.7)$$

Приведенные выше соображения позволяют с достаточной степенью точности считать:

$$Z_\mu = \frac{U_{01}}{I_{01}}. \quad (8.8)$$

Магнитные потери в сердечнике примерно пропорциональны квадрату индукции, которая, в свою очередь, пропорциональна обусловленной ею Э.Д.С. Последняя же при работе в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки мало отличается от напряжения на зажимах трансформатора. Таким образом, магнитные потери практически пропорциональны квадрату напряжения. Потому при холостом ходе $U_1 = U_H$ и потери трансформатора практически не отличаются от магнитных потерь в сердечнике трансформатора на нагрузке.

Индукция в стержне сердечника B_0 может быть найдена из выражения:

$$E = 4,44 f W B_c S_c, \quad (8.9)$$

где f – частота, Гц; W – число витков обмотки; S_c – сечение стержня, m^2 .

Учитывая, что $E \approx U_1$, получим

$$B_c = \frac{U}{4,44 f W S_c}, \quad [Тл]. \quad (8.10)$$

3. Исследовать работу трансформатора в режиме короткого замыкания (рисунок 8.3).

Опыт короткого замыкания проводится с целью определения напряжения и потерь короткого замыкания трансформатора. Напряжением короткого замыкания однофазного трансформатора называется напряжение, которое при номинальной частоте следует подвести к первичной обмотке при замкнутой накоротко вторичной, чтобы в них установились номинальные токи.

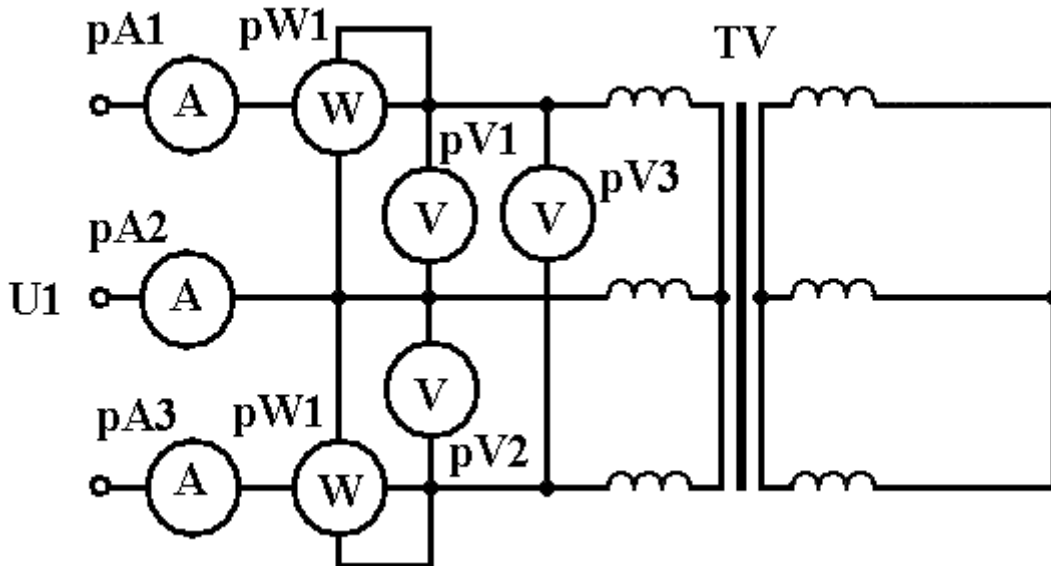


Рисунок 8.3 – Схема для проведения опыта короткого замыкания

Элементы схемы:

pA1-pA3 – амперметры,

pV1-pV3 – вольтметры,

pW1 – ваттметр,

TV – трансформатор напряжения,

U1 – первичное напряжение.

Обычно напряжение короткого замыкания выражается в процентах от номинального напряжения. Потери, возникающие в трансформаторе при этом режиме, называются потерями короткого замыкания. Напряжение U_k и потери P_k короткого замыкания определяются для номинальной рабочей температуры трансформатора 75°C .

Процентное значение напряжения короткого замыкания при номинальном токе определяется соотношением

$$U_k = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100\% . \quad (8.11)$$

Оно обычно находится в пределах 3-8% от номинального напряжения у трансформаторов малых и средних мощностей и в пределах 8-15% у

высоковольтных и мощных трансформаторов. Поэтому для получения номинального тока в обмотках короткозамкнутого трансформатора напряжение на его зажимах должно быть значительно снижено по сравнению с номинальным напряжением. Питание к трансформатору подводится через автотрансформатор ЛАТР.

Во время опыта следует стремиться к тому, чтобы изменение активного сопротивления обмоток, обусловленное их нагревом, было минимальным. Поэтому в опыте не следует допускать увеличение тока короткого замыкания сверх значения $I_k = I_n$ и трансформатор должен находиться под напряжением лишь минимально необходимые для опыта время.

В замкнутой накоротко вторичной обмотке устанавливается ток, определяемый равенством:

$$\frac{I_{2к}}{I_{1к}} \approx \frac{W_1}{W_2} \quad (8.12)$$

Если ток в первичной обмотке равен номинальному, то и во вторичной обмотке ток будет практически равен номинальному току $I_{2к} = I_{2н}$.

При проведении опыта может быть изменена температура обмоток, равная в холодном трансформаторе температуре окружающей среды. Её необходимо знать для приведения параметров трансформатора к температуре 75^0C , которая считается средней температурой обмоток в эксплуатации и называется номинальной рабочей температурой обмоток.

По результатам опыта короткого замыкания могут быть найдены параметры схемы замещения и некоторые характеристики трансформатора.

3.1 Для проведения опыта короткого замыкания необходимо: поставить переключатель S2 – в положение «КЗ», S1 – в положение «ОТ», включить QF1 и повышать напряжение UI ; далее поворачивать движок ЛАТР по часовой стрелке и заносить показания вольтметра pV_k , амперметра pA_k и ваттметра $pW1$ в таблицу 8.2 (5-6 точек). При проведении опыта следует, не ограничиваться точкой номинального значения тока. После окончания измерений схему привести в исходное состояние.

Таблица 8.2

№ п/п	Измерения		Вычисления	
	U_K	I_K	P_K	$\cos \varphi_K$
	В	А	Вт	

3.2 Рассчитать коэффициент мощности при коротком замыкании по формуле $\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_{1к} \cdot I_k}$ и результаты подсчетов занести в таблицу 8.2.

3.3 По данным таблицы 8.2 следует построить характеристики короткого замыкания трансформатора: $U_k = f(I_k); P_k = f(I_k);$

$\cos \varphi_k = f(I_k)$ для 4 – 5 значений тока короткого замыкания в пределах $I_k = (0,5 \div 1,25)I_n$ для температуры обмоток θ .

По характеристикам короткого замыкания определяется значение U_k и I_k для номинального тока при температуре обмоток, равной $\theta_{окр}$. Эти значения следует привести к номинальной рабочей температуре обмоток 75^0C .

Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания показана на рисунке 8.4.

Так как $Z_1 \approx Z_2 \ll Z_\mu$, то схема на рисунке 8.4 с большей степенью точности может быть заменена схемой на рисунке 8.5.

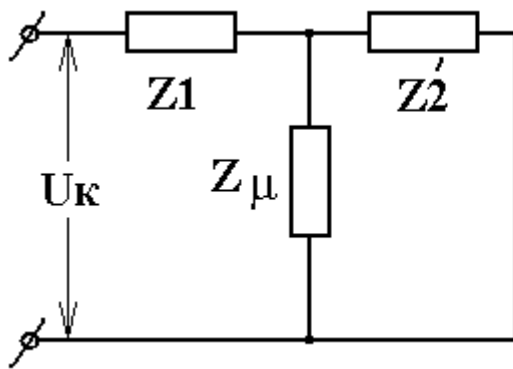


Рисунок 8.4

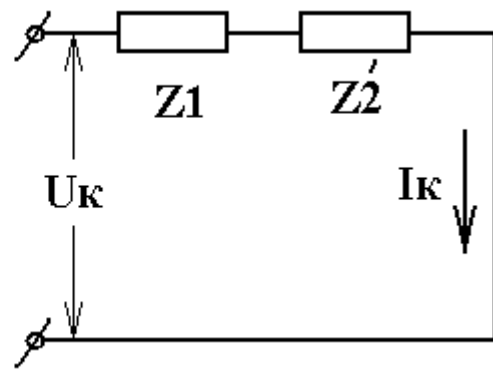


Рисунок 8.5

Параметры этой схемы могут быть подсчитаны по найденным значениям U_k и P_k :

$$\begin{aligned} (Z_1 + Z_2') &\approx Z_k = \frac{U_k}{I_n}, \\ r_1 + r_2' &\approx r_k = \frac{P_k}{I_n^2}, \\ x_1 + x_2' &\approx \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}. \end{aligned} \quad (8.13)$$

Эти же значения при температуре обмоток 75^0C :

$$r_{k75} = r_k \cdot [1 + \alpha \cdot (75 - \theta)], \quad Z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2},$$

где $\alpha = \frac{1}{234,5 + \theta}$. (8.14)

Напряжение короткого замыкания U_k и его активная $U_{ак}$ и реактивная $U_{рк}$ составляющие находим из следующих выражений:

$$U_K = \frac{I_n \cdot Z_{H75}}{U_n} 100\%, \quad U_{ак} = \frac{I_n \cdot Z_{H75}}{U_n} 100\%,$$

$$U_{рк} = \frac{I_n \cdot Z_{H75}}{U_n} \cdot 100\% \quad (8.15)$$

$$\text{Потери короткого замыкания } P_K = I_n^2 \cdot r_{K75}. \quad (8.16)$$

$$\text{Коэффициент мощности } \cos \varphi_K = \frac{r_{K75}}{Z_{K75}}. \quad (8.17)$$

Во время опыта короткого замыкания напряжение, а, следовательно, и магнитная индукция в сердечнике очень малы. Вследствие этого исчезающе малы и магнитные потери в сердечнике, которыми в этом случае можно пренебречь. Если обмотки трансформатора при опыте короткого замыкания обтекаются номинальным током, то возникающие в них электрические потери не отличаются от электрических потерь при номинальной нагрузке трансформатора (с номинальным током при номинальном напряжении обмоток). Помимо электрических потерь в обмотках и отводах трансформатора, в его конструктивных деталях, а также и самих обмотках и отводах возникают добавочные потери, обусловленные вихревыми токами, наведенными полями рассеяния обмоток и отводов. Эти потери, пропорциональные квадрату тока обмоток, также будут одинаковы, как для опыта короткого замыкания, так и для номинальной нагрузки.

Таким образом, потери короткого замыкания P_K с достаточной точностью могут быть приняты равными сумме электрических потерь и всех добавочных потерь трансформатора, вызванных полями рассеяния, при номинальной нагрузке трансформатора.

4 Определить процентное изменение напряжения при нагрузке ΔU и коэффициент полезного действия η .

Изменением напряжения однофазного трансформатора называется арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением при холостом ходе и напряжения на зажимах вторичной обмотки при номинальном вторичном токе, номинальной частоте и номинальном напряжении на зажимах первичной обмотки. Изменение напряжения ΔU выражается в процентах от номинального вторичного напряжения.

Процентное изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке определяется по выражению

$$\Delta U = \beta \cdot (U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2 \cdot (U_p^2 \cdot \cos \varphi_2 + U_a^2 \cdot \sin \varphi_2)}{200}, \quad (8.18)$$

где $\beta = \frac{I^2}{I_{2H}^2}$; $\cos \varphi_2$ - коэффициент мощности вторичной цепи.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки:

$$U_2 = U_{2H} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right), \quad (8.19)$$

Коэффициент полезного действия трансформатора равен

$$\eta = 1 - \frac{P_0 - \beta^2 \cdot P_K}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K}, \quad (8.20)$$

где P_0 - потери холостого хода при номинальном напряжении;

P_K - потери короткого замыкания при номинальном токе нагрузки;

S_H - номинальная мощность трансформатора в кВА или ВА.

Данные расчета зависимости $\eta = f(\beta)$ сводятся в таблицу 8.3.

Таблица 8.3

№	Коэф. затр. К.П.Д.	при $\cos \varphi = 1$			при $\cos \varphi = 0.5$		
	$\eta = 1 - \frac{P_0 - \beta^2 \cdot P_{KH}}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_{0H} + \beta^2 \cdot P_{KH}}$						

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему установки с перечнем оборудования и приборов, использованных в работе.
3. Таблицы экспериментальных данных, расчеты и соответствующие им графики.
4. Выводы о работе.

Контрольные вопросы

1. Что за устройство трансформатор и для чего он нужен?
2. Расскажите, как устроен трансформатор.
3. Какие по конструктивному исполнению магнитопровода трансформаторы существуют?
4. Что используется в качестве изоляции в трансформаторах?
5. Силовые и измерительные трансформаторы, в чем разница?
6. Объясните принцип действия трансформатора.
7. Что такое коэффициент трансформации и как его определить?
8. Как осуществляется передача мощности в трансформаторе?

9. Объясните, для чего и как проводится опыт холостого хода.
10. Объясните, для чего и как проводится опыт короткого замыкания.

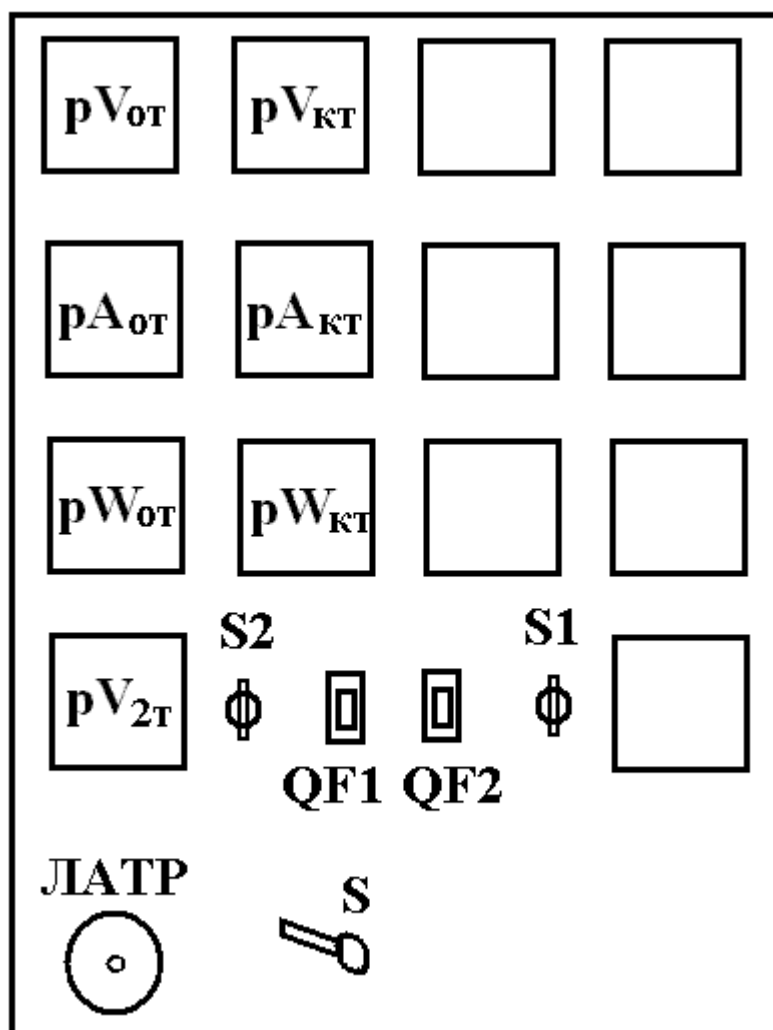


Рисунок 8.6 - Расположение оборудования на стенде

Элементы схемы:

QF1, QF2 – автоматические выключатели;

S1, S2 – переключатели; S – тумблер;

$pV_{от}$, $pV_{2т}$, $pV_{кт}$ – вольтметры;

$pA_{от}$, $pA_{кт}$ – амперметры;

$pW_{от}$, $pW_{кт}$ – ваттметры.

* - часть приборов на схеме стенда не обозначена, потому что они принадлежат другой лабораторной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольденберг О.Д. Испытание электрических машин: учеб. для вузов по спец «Электромеханика»/ О.Д. Гольденберг. – М.: Высш.шк., 1990. – 255 с.
2. Гольденберг О.Д. Проектирование электрических машин/ О.Д.Гольденберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко; под ред. О.Д.Гольденберга. – М.: Высш.шк., 2001. – 431 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учеб. для вузов/ А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 320 с.
4. Коварский Е.М. Испытания электрических машин/ Е.М Коварский, Ю.И. Янко. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов/ И.П.Копылов. - М.: Энергоатомиздат, 1986.–360 с.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов/ И.П. Копылов. - М.: Высш. шк., 2001. – 327с.
7. Мезин Е.К. Судовые электрические машины: учебник/ Е.К. Мезин. – Л.: Судостроение, 1985. – 320 с.
8. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: учеб. пособие для вузов/ О.Д.Гольденберг. – М.: Высш.шк., 2001. – 512 с.
9. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов/ И.П.Копылов, Ф.А. Горяйнов, Б.К. Клоков, Б.К. Клоков; под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

Заказ № _____ от « _____ » _____ 20__ г. Тираж _____ экз.

Изд-во СевНТУ