

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания
к практическим занятиям по дисциплине
«Судовые электрические машины»
для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового
электрооборудования и средств автоматики»
и по дисциплине «Электрические машины» для бакалавров направления
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
(профиль подготовки «Электрооборудование и автоматика судов»)
очной и заочной форм обучения

Севастополь
СевГУ
2020

УДК 621.314 : 629.5 (0756)
ББК 39.45я73
С89

Р е ц е н з е н т:

Л.А. Краснодубец – главный научный сотрудник ФГБНУ
«Институт природно-технических систем», доктор техн. наук, профессор

Составитель: Высоцкий В.Е.

С89 Судовые электрические машины : метод. указания к практическим занятиям по дисциплине «Судовые электрические машины» для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» и по дисциплине «Электрические машины» для бакалавров направления 13.03.02 «Электроэнергетик и электротехника» (профиль подготовки «Электрооборудование и автоматика судов») очной и заочной формы обучения / Сост. В.Е. Высоцкий ; Министерство науки и высшего образования РФ, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». – Севастополь : СевГУ, 2020. – 46 с. – Текст : непосредственный.

Изложена методика решения контрольных заданий по разделам курсов «Судовые электрические машины» и «Электрические машины», приводятся таблицы исходных данных для выполнения контрольных работ.

Формируемая компетенция по Кодексу ПДНВ – «Знание электротехнологии и теории электрических машин». В соответствии с ней по выполнению контрольных заданий студенты должны: закрепить теоретические знания физических и энергетических процессов и явлений, происходящих в различных режимах работы электрических машин постоянного и переменного тока, а также трансформаторов, знать различные способы их представления на основе математических описаний, энергетических, векторных диаграмм и схем замещения; уметь составлять и решать уравнения электромеханических и электромагнитных преобразователей постоянного и переменного тока в установившихся режимах, исходя из основных законов электромеханики и методов математического анализа; овладеть способами количественного оценивания изменений электромагнитных и механических переменных, прогнозирования функционирования электрической машины или трансформатора при изменении этих переменных, а также управляющих и возмущающих воздействий.

УДК 621.314: 629.5 (0756)

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Судовое электрооборудование, протокол № 8 от 17 апреля 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Практическое занятие № 1.....	4
2. Практическое занятие № 2.....	11
3. Практическое занятие № 3.....	19
4. Практическое занятие № 4.....	24
5. Практическое занятие № 5.....	31
6. Практическое занятие № 6.....	38
Библиографический список.....	45

1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

Тема: Расчет магнитной цепи машины постоянного тока

Исходные данные: схема магнитной цепи машины постоянного тока (рисунок 1), МДС обмотки возбуждения, размеры и материалы участков (таблицы 2 и 3)

Цель занятия: рассчитать величину магнитного потока на пару полюсов машины, магнитную индукцию в воздушном зазоре и коэффициент насыщения магнитной цепи.

При выполнении задания необходимо привести:

- числовые данные задания;
- расчет магнитной цепи с необходимыми пояснениями.
- эскиз магнитной цепи машины постоянного тока, выполненный в масштабе.

Построить:

- кривые намагничивания заданных материалов отдельных участков магнитной цепи в удобном масштабе (по данным таблицы 3);
- кривую намагничивания магнитной цепи машины.

В исходных данных задана разветвленная симметричная магнитная цепь судовых машины постоянного тока (рисунок 1).

Станина МПТ представляет собой сплошную отливку из стали или чугуна, а сердечники полюсов 2 и сердечник якоря 4 набраны из отдельных листов специальной электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм. На наружной поверхности якоря имеются пазы, в которые укладывается обмотка 6 якоря. Магнитное поле создается обмоткой возбуждения 3, расположенной на сердечниках полюсов. Конфигурация полюсного наконечника 5 обеспечивает равномерное распределение магнитного поля в воздушном зазоре. В результате взаимодействия поля, создаваемого обмоткой возбуждения, и проводников якоря с током возникает вращающий момент, приводящий якорь во вращение в двигательном режиме работы МПТ. Учитывая симметрию магнитопровода МПТ относительно оси полюсов, можно всю разветвленную цепь представить состоящей из четырех одинаковых неразветвленных магнитных цепей и рассчитать одну из них по правилам расчета неоднородных магнитных цепей. На рисунке 1 средние линии магнитного потока показаны для каждого из четырех симметричных участков.

Как видно, эта магнитная цепь может быть разбита на четыре однородных участка¹: l_a - ярмо статора; $2h_n$ - две высоты сердечника полюса; 2δ — два воздушных зазора; l_a — сердечник якоря.

Длина средней магнитной линии для каждого однородного участка определяется по чертежу МПТ, выполненному в масштабе. Сечение каждого однородного участка равно произведению ширины участка (или его высоты) на длину L машины (на чертеже длина машины не показана).

Данные обмоток возбуждения и основные геометрические размеры МПТ приведены в таблице 2 применительно к реальным судовым МПТ серии «П». Цифры в условном обозначении серии машины определяют: первая - условную величину наружного

¹ Предполагается, что поверхность якоря гладкая, без пазов, а сечение полюсного наконечника 5 равно сечению полюса 2.

диаметра статора D_n , вторая — условную величину длины машины L . Каждая строка таблицы 2 соответствует определенному варианту задания студенту определенной группы. Номер варианта выбирается по номеру студента в классном журнале. Материалы различных частей магнитопровода и величина воздушного зазора заданы в таблице 3. Каждый столбец в таблице 3 определяет вариант задания для всей группы. Номер столбца для группы назначается преподавателем.

Расчет магнитной цепи. Основной задачей расчета магнитной цепи МПТ обычно является определение МДС обмотки возбуждения, необходимой для создания определенного магнитного потока в замкнутом контуре магнитной цепи или определенной величины магнитной индукции B_δ в воздушном зазоре. Это прямая задача.

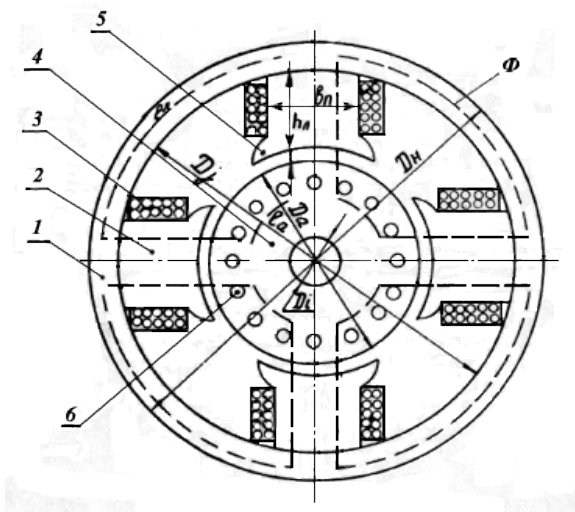


Рисунок 1 - Магнитная цепь машины постоянного тока

В данном случае необходимо решить обратную задачу, то есть по заданной МДС обмотки возбуждения определить величину магнитного потока в магнитной цепи МПТ и магнитную индукцию B_δ в воздушном зазоре. Расчет проводится для холостого хода МПТ, когда ток якоря равен нулю ($I_a = 0$).

Решение этой задачи необходимо проводить в соответствии с методикой расчета магнитной цепи в следующей последовательности.

1. Закон полного тока для рассматриваемой магнитной цепи записывается в виде

$$F_0 = 2I_b W_b = H_\delta \cdot 2\delta + H_y l_y + H_n 2h_n + H_a l_a, \quad (1)$$

где $F_0 = 2I_b W_b$ — МДС обмотки возбуждения двух полюсов;

$H_\delta 2\delta = F_\delta$ — МДС, необходимая для проведения потока через воздушный зазор;

$H_y l_y = F_y$ — то же, для ярма статора;

$H_n 2h_n = F_n$ — то же, для полюсов;

$H_a l_a = F_a$ — то же, для сердечника якоря.

2. Среднюю длину и поперечное сечение каждого однородного участка можно определить приближенно по формулам:

- для ярма статора

$$l_{\text{я}} = \frac{\pi(D_{\text{н}} - h_{\text{я}})}{2p}, \text{ м}, \quad (2)$$

$$S_{\text{я}} = h_{\text{я}}L, \quad \text{м}^2, \quad (3)$$

где $h_{\text{я}} = \frac{D_{\text{н}} - D_{\text{ж}}}{2} \text{ м}$ - высота ярма статора; (4)

$2p$ - число полюсов МПТ;

$D_{\text{н}}$ - внешний диаметр ярма статора, м;

$D_{\text{ж}}$ - внутренний диаметр ярма статора, м;

L - длина МПТ, м;

- для якоря

$$l_{\text{а}} = \frac{\pi(D_{\text{а}} - h_{\text{а}})}{2p}, \text{ м}, \quad (5)$$

$$S_{\text{а}} = h_{\text{а}}L, \quad \text{м}^2, \quad (6)$$

где $h_{\text{а}} = \frac{D_{\text{а}} - D_{\text{г}}}{2} \text{ м}$ - высота сердечника якоря, м; (7)

$D_{\text{а}}$ — внешний диаметр якоря, м;

$D_{\text{г}}$ — диаметр вала якоря, м;

- для полюса

$$2h_{\text{п}} = D_{\text{ж}} - D_{\text{а}} - 2\delta, \text{ м}, \quad (8)$$

$$S_{\text{п}} = b_{\text{п}}L, \quad \text{м}^2, \quad (9)$$

где $b_{\text{п}}$ - ширина полюса;

- для воздушного зазора длина магнитной силовой линии определяется величиной 2δ ;

- поперечное сечение воздушного зазора под полюсом равно

$$S_{\delta} = b_{\delta}L \text{ м}^2, \quad (10)$$

где $b_{\delta} = \alpha\tau$ - размер полюсной дуги

$$\tau = \frac{\pi D_{\text{а}}}{2p} \text{ - полюсное деление}; \quad (11)$$

здесь $\alpha = 0,62 - 0,72$ — коэффициент полюсной дуги.

3. Далее необходимо задаться первым предварительным значением магнитного потока Φ_1 , который можно определить из соотношения

$$\Phi_1 = B_{\delta 1}S_{\delta}, \quad (12)$$

где $B_{\delta 1} = 0,6 - 0,7 \text{ Тл}$.

4. Определение магнитной индукции в однородных участках магнитопровода необходимо произвести по этой величине магнитного потока Φ_1 по соотношениям

В воздушном зазоре $B_{\delta} = B_{\delta 1}, \quad (13)$

В якоре и ярме статора $B_{\text{а}} = \frac{\Phi_1}{2S_{\text{а}}}, \text{ Тл}, \quad (14)$

$$B_{\text{я}} = \frac{\Phi_1}{2S_{\text{я}}}, \text{ Тл}, \quad (15)$$

так как по этим участкам проходит половина магнитного потока полюса.

В сердечнике полюса

$$B_n = \frac{\Phi_1}{S_n}, \text{ Тл.} \quad (16)$$

5. Напряженность магнитного поля в однородных участках цепи определяется по кривым намагничивания заданных ферромагнитных материалов, а в воздушном зазоре - по формуле

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{B_\delta}{4\pi \cdot 10^{-7}}, \quad \text{А/м.} \quad (17)$$

6. Из решения уравнения (1) можно найти суммарную намагничивающую силу (н.с.), соответствующую принятому значению магнитного потока Φ_1 , сравнить найденную н.с. с заданной величиной $2I_a W_a$. Задаваясь другими значениями магнитного потока и стремясь приблизиться к значению н.с. $2I_a W_a$ повторить решение прямой задачи.

7. Результаты расчета магнитной цепи МПТ для каждого значения магнитного потока удобно представить в виде таблицы.

Таблица 1 - Результаты расчета магнитной цепи МПТ

Параметр Участок	Длина, м	Сечение, м ²	Поток, Вб	Индукция, Тл	Напря- женность, А/м	Н.с.
Зазор	2δ	S_δ	Φ	B_δ	H_δ	$H_\delta 2\delta$
Якорь	l_a	S_a	$\Phi/2$	B_a	H_a	$H_a l_a$
Ярмо	l_y	S_y	$\Phi/2$	B_y	H_y	$H_y l_y$
Полюс	$2h_n$	S_n	Φ	B_n	H_n	$H_n 2h_n$
						$\Sigma =$

8. По результатам серии расчетов магнитной цепи легко построить кривую намагничивания магнитопровода МПТ $\Phi = f(IW)$ и графически найти величину магнитного потока Φ_0 , соответствующего заданному значению н.с. $2I_a W_a$ (как показано на рисунке 2).

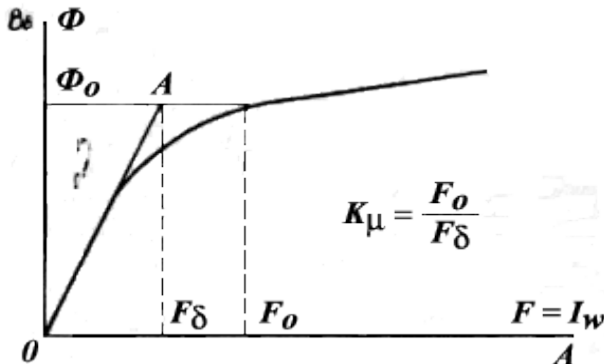


Рисунок 2 - Характеристика намагничивания МПТ

Таблица 2 – Варианты задания на расчет магнитной цепи

Тип МПТ	Мощность, кВт	МДС пары полусов $2I_p W_g A_B$	Размеры участков магнитной цепи					
			D_H , м	D_j , м	D_a , м	D_i , м	L , м	b_n , м
1 П71	14,5	4000	0.495	0.440	0.245	0.060	0.120	0.080
2 П92	30	5900	0.680	0.590	0.340	0.085	0.190	0.110
3 П71	8	3400	0.428	0.380	0.210	0.065	0.125	0.060
4 П71	19	5500	0.428	0.380	0.210	0.065	0.125	0.060
5 П71	32	4300	0.428	0.380	0.210	0.065	0.125	0.060
6 П72	10	6600	0.428	0.380	0.210	0.065	0.165	0.060
7 П72	12,5	5000	0.428	0.380	0.210	0.065	0.165	0.060
8 П72	10	3500	0.428	0.380	0.210	0.065	0.165	0.060
9 П81	14	3800	0.510	0.465	0.245	0.085	0.165	0.080
10 П82	19	6650	0.510	0.465	0.245	0.085	0.182	0.080
11 П82	25	5000	0.510	0.465	0.245	0.085	0.182	0.080
12 П82	25	6200	0.510	0.465	0.245	0.085	0.182	0.080
13 П91	32	5000	0.592	0.530	0.294	0.085	0.150	0.100
14 П91	25	5500	0.592	0.530	0.294	0.085	0.156	0.100
15 П91	32	6000	0.592	0.530	0.294	0.085	0.160	0.100
16 П91	50	4500	0.592	0.530	0.294	0.085	0.165	0.100
17 П91	25	6150	0.592	0.530	0.294	0.085	0.130	0.100
18 П91	30	5800	0.592	0.530	0.294	0.085	0.140	0.100
19 П92	13	5270	0.592	0.530	0.294	0.085	0.100	0.100
20 П92	75	5100	0.592	0.530	0.294	0.085	0.170	0.100
21 П101	32	4000	0.655	0.575	0.327	0.100	0.170	0.120
22 П101	70	7000	0.655	0.575	0.327	0.100	0.190	0.120
23 П101	55	6000	0.655	0.575	0.327	0.100	0.175	0.120
24 П101	90	8000	0.655	0.575	0.327	0.100	0.180	0.120
25 П101	90	6600	0.655	0.575	0.327	0.100	0.190	0.120
26 П101	125	5700	0.655	0.575	0.327	0.100	0.210	0.120
27 П111	55	5000	0.722	0.630	0.368	0.115	0.250	0.145
28 П111	36	5500	0.722	0.630	0.368	0.115	0.270	0.145
29 П111	85	6700	0.722	0.630	0.368	0.115	0.290	0.145
30 П111	190	7300	0.722	0.630	0.368	0.115	0.310	0.145

* Для всех машин принять число пар полюсов $2p=4$.

Таблица 3 – Варианты для материалов магнитной цепи МПТ

Группа Участок магнитной цепи Ярмо	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Полнос	Ст. 3 Поковка	Ст. 3 Поковка	Ст. 3 поковка	Ст. 3 Поковка	Ст. 3 поковка	Ст. 3 поковка	Ст. 3 поковка	Ст. 3 поковка	Ст. 3 поковка	Ст. 3 поковка	Ст. 3 поковка	Ст. 3 поковка
Якорь	1211	1212	1311	1411	Ст. 3 Лист 1 мм	Ст. 3 Лист 1 мм	121	Ст. 3 Лист 1 мм	1511	1411	Ст. 3 Лист 1 мм	1212
Воздушный зазор, мм	1,35	1,35	1,45	1,45	1,55	1,55	1,65	1,65	1,75	1,75	2,0	2,0

Для всех машин толщину листа электротехнической стали принять равной 0,5 мм.

9. По кривой намагничивания МПТ $\Phi = f(IW)$ можно сделать вывод о степени насыщения магнитной цепи МПТ. Для этого на графике кривой намагничивания магнитопровода необходимо провести дополнительное построение - продолжить начальную прямолинейную часть кривой намагничивания до пересечения с линией, соответствующей значению магнитного потока Φ_0 (рисунок 2). Точка А пересечения этих линий определяет величину н.с. F_δ , необходимой для проведения магнитного потока Φ_0 через воздушный зазор.

$$\text{Отношение} \quad K_\mu = \frac{F_0}{F_\delta} \quad (18)$$

называется коэффициентом насыщения магнитной цепи.

Коэффициент K_μ характеризует степень насыщения магнитопровода и существенным образом влияет на рабочие характеристики электрических машин.

Для МПТ величина K_μ находится в пределах 1,25 — 1,75.

Таблица 4 - Характеристики материалов магнитной цепи

Мар-ка стали	Магнитная индукция 10^{-2} , Тл, при напряженности магнитного поля, А/см						Удельные потери	
	B ₁₀	B ₅₀	B ₁₀₀	B ₅₀₀	B ₁₀₀₀	B ₃₀₀₀	При толщ. листа м	P _{1,0/50} Вт/кг
1. ГОРЯЧЕКАТАННАЯ ИЗОТРОПНАЯ СТАЛЬ								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
121	126	162	175	207	215	240	0,001	5,8
1							0,001	5,4
121							0,0005	2,5
2								
131								
1								
141	136	157	170	194	202	227	0,0005	2,0
1							0,0005	1,8
141							0,0005	1,55
2								
141								
3								
151	128	155	166	197	204	229	0,0005	1,55
1							0,0005	1,40
151							0,0005	1,25
2								
151								
3								
2. ХОЛОДНОКАТАННАЯ ИЗОТРОПНАЯ СТАЛЬ								
201	154	175	185	208	216	241	0,0005	2,5
3								
2211	140	166	174	205	214	240	-	-
2312								
2411	137	160	170	199	205	227	-	-
3. ХОЛОДНОКАТАННАЯ АНИЗОТРОПНАЯ СТАЛЬ								
3413	174	193	197	-	-	-	0,0005	0,8
4. ЛИСТ. СТАЛЬ (Ст.3) ТОЛЩИНОЙ 1-2 ММ ДЛЯ ПОЛЮСОВ								
Ст.3	128	164	177	210	215			
5. ЛИТАЯ СТАЛЬ (Ст.3) ПОКОВКИ								
	105	166	178	185				
6. ЧУГУН								
	25	75	105	147				

2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

Тема: Расчет режима работы трансформатора

Исходные данные: параметры трансформатора (таблица 5):

- полная мощность S , кВА;
- напряжение первичной обмотки $U_{1н}$, кВ;
- коэффициент трансформации k ;
- напряжение короткого замыкания $[u_k]$, %;
- ток холостого хода I_{10} , %;
- потери холостого хода P_0 , кВт;
- потери короткого замыкания P_k , кВт;
- угол нагрузки φ_2 .

Цель занятия: рассчитать

напряжение короткого замыкания (к.з.) и его составляющие при питании со стороны первичной обмотки; токи обмоток; параметры схемы замещения;

номинальный режим по полной схеме замещения символическим методом, определить $U_{2н}$ ($U'_{2н}$), ΔU , % и угол φ_1 при заданном угле нагрузки φ_2 ;

- номинальный режим графоаналитическим методом, определить $U_{2н}$ ($U'_{2н}$), ΔU , % и угол φ_1 при заданном угле нагрузки φ_2 ;
- определить погрешность графоаналитического метода расчета;
- амплитуду установившегося тока короткого замыкания $I_{ум}$ и ударный коэффициент

$$K_{уд} \text{ при } \Psi = 0 \text{ и } \varphi_k = \pm \frac{\pi}{2}.$$

Построить и изобразить:

- полную схему замещения приведенного трансформатора (рисунок 3);
- полную векторную диаграмму для номинального режима (рисунок 4);
- упрощенную схему замещения трансформатора (рисунок 5);
- упрощенную векторную диаграмму применительно к графоаналитическому методу расчета трансформатора (рисунок 6);
- упрощенную ВД для углов нагрузки $\varphi_2 = 0$ и $\varphi_2 = \pm 45^\circ$ (рисунок 7);
- зависимость падения напряжения $\Delta U = f(\beta)$ при разных углах φ_2 (рисунок 8).

Последовательность расчета режима работы трансформатора

1. *Расчет токов и напряжений для номинального режима и опытов холостого хода и короткого замыкания:*

- токи и напряжения

$$I_{1н} = \frac{S_n}{U_{1н}}, \quad I_{2н} = I_{1н} k;$$

$$U_{20} = \frac{U_{1н}}{k};$$

$$U_{1к} = \frac{U_{1н}}{100} [u_{1к}] \%, \quad [u_{кв}] \% = [u_{1к}] \% \cos \varphi_k; \quad [u_{кп}] \% = [u_{1к}] \% \sin \varphi_k$$

2. Параметры и полная T - образная схема замещения

- полная T-образная схема замещения

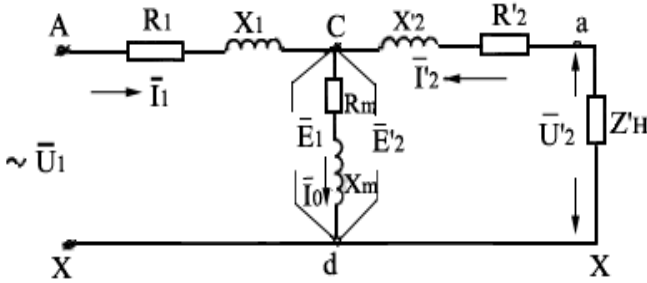


Рисунок 3 - Полная электрическая схема замещения приведенного трансформатора

- параметры схемы замещения

$$Z_m = \frac{U_{1н}}{I_0}; \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_0 U_{1н}}; \quad (19)$$

$$r_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}; \quad (20)$$

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1н}}; \quad r_k = \frac{P_k}{I_{1н}^2}; \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}; \quad (21)$$

$$r_1 \approx r_2' = \frac{r_k}{2}; \quad x_1 \approx x_2' = \frac{x_k}{2}; \quad (22)$$

$$r_2 = \frac{r_2'}{k^2}; \quad x_2 = \frac{x_2'}{k^2}; \quad (23)$$

3. Расчет номинального режима трансформатора по полной схеме замещения символическим методом при заданном угле нагрузки φ_2

- сопротивления нагрузки

$$\underline{Z}_н = Z_n e^{j\varphi_2}; \quad Z_n = \frac{U_{20}}{I_{2н}}; \quad r_n = Z_n \cos \varphi_2; \quad x_n = Z_n \sin \varphi_2; \quad (24)$$

$$r_n' = r_n k^2; \quad x_n' = x_n k^2; \quad (25)$$

- сопротивления вторичной цепи

$$Z'_{II} = \sqrt{(r'_2 + r'_H)^2 + (x'_2 + x'_H)^2}; \quad (26)$$

$$\underline{Z}'_{II} = Z'_{II} e^{j\psi_2}; \quad (27)$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_H}{r'_2 + r'_H}; \quad (28)$$

- общее сопротивление вторичной цепи и ветви намагничивания

$$\underline{Z}_{cd} = \frac{\underline{Z}_m \cdot \underline{Z}'_{II}}{\underline{Z}_m + \underline{Z}'_{II}}; \quad \underline{Z}_m = r_m + jx_m; \quad (29)$$

- общее сопротивление схемы замещения

$$\underline{Z}_{\Sigma} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{cd}; \quad \underline{Z}_1 = r_1 + jx_1; \quad (30)$$

- ток первичной обмотки

$$\underline{I}_{1n} = \frac{U_1}{\underline{Z}_{\Sigma}} = I_{1n} e^{j\varphi_1}; \quad (31)$$

- ЭДС в обмотках

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = U_{1n} - \dot{I}_{1n} \underline{Z}_1; \quad (32)$$

- приведенный ток вторичной обмотки

$$\dot{I}'_{2n} = \frac{\dot{E}_2}{\underline{Z}'_{II}}; \quad (33)$$

- приведенное и реальное напряжения на нагрузке

$$\dot{U}'_{2n} = \dot{I}'_{2n} \underline{Z}'_{II} = U'_{2n} e^{j\varphi_2}; \quad (34)$$

$$U_{2n} = \frac{U'_{2n}}{k}; \quad (35)$$

- падение напряжения при работе трансформатора в номинальном режиме

$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_{2n}}{U_{20}} 100\%. \quad (36)$$

4. Построение полной векторной диаграммы (рисунок 4)

4.1. В произвольном направлении, например, вправо от точки «0» откладывается вектор магнитного потока $\overline{\Phi}_0$.

4.2. С отставанием от вектора $\overline{\Phi}_0$ на 90° проводятся векторы $\overline{E}_2'$ и $\overline{E}_1$.

4.3. Вектор тока холостого хода $\overline{I}_0$ опережает вектор $\overline{\Phi}_0$ на угол потерь δ

$$\delta = \arctg \frac{r_m}{x_m}. \quad (37)$$

4.4. Ток во вторичной цепи I'_2 определяется из соотношения

$$I'_2 = \frac{E_2^1}{Z_{II}^1}, \quad (38)$$

$$\text{где} \quad Z'_{II} = \sqrt{(r'_2 + r'_H)^2 + (x'_2 + x'_H)^2} \quad (39)$$

и отстает от вектора ЭДС на угол ψ_2

5. Построение упрощенной векторной диаграммы трансформатора (рисунок 6)

Упрощенная векторная диаграмма является отражением упрощенной схемы замещения (рисунок 5) и графическим решением уравнения электрического равновесия

$$\overline{U}'_2 = \overline{U}_1 - \overline{I}'_2 r_k - \overline{I}'_2 x_k = \overline{U}_1 - \overline{I}'_2 Z_k. \quad (45)$$

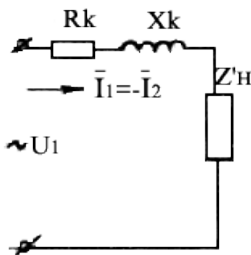


Рисунок 5 – Упрощенная схема замещения приведенного трансформатора

Порядок построения векторной диаграммы следующий

5.1. От исходной точки «0» в произвольном направлении (например, вверх) откладывается вектор $\overline{I}_1 = -\overline{I}'_2$.

5.2. Под углом φ_2 к вектору тока в сторону опережения (для активно-индуктивной нагрузки) проводится направление вектора напряжения $-\overline{U}'_2$.

5.3. В масштабе напряжения строится прямоугольный треугольник ABC со сторонами

$$AB = I_{1н} x_k, \quad BC = I_{1н} r_k, \quad AC = I_{1н} Z_k, \quad (46)$$

называемый треугольником короткого замыкания.

Треугольник ABC располагается на линии $-\overline{U}'_2$ таким образом, чтобы его вершина «С» была на линии $-\overline{U}'_2$, а сторона OA была равна в принятом масштабе первичному напряжению U_1 . В тоже время треугольник короткого замыкания должен быть ориентирован на векторной диаграмме так, чтобы сторона AB была перпендикулярна, а сторона BC – параллельна вектору $\overline{I}_1 = -\overline{I}'_2$, при этом вектор падения напряжения $\overline{I}_{1н} x_k$ должен опережать вектор $\overline{I}_1 = -\overline{I}'_2$ на угол 90° .

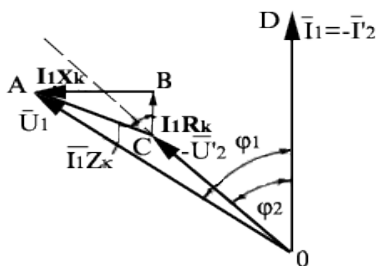


Рисунок 6 – Упрощенная векторная диаграмма приведенного трансформатора

5.4. Величина отрезка ОС при таком построении равна напряжению $U'_{2н}$, а угол АОД равен φ_1 .

Действительное напряжение на нагрузке равно

$$U_{2н} = \frac{U'_{2н}}{k}. \quad (47)$$

5.5. Сравнить значения напряжений $U_{2н}$, полученных из расчета полной схемы замещения и из построения упрощенной векторной диаграммы.

6. Построение упрощенных ВД для различных по характеру нагрузок

Повторить описанные выше построения ВД для других углов нагрузки из трех ($\varphi_2 = 0$, $\varphi_2 = \pm \frac{\pi}{2}$) как показано на рисунке 7. Оценить изменение напряжения $U_{2н}$ по соотношению

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_{2н}}{U_{20}} 100\% \quad (48)$$

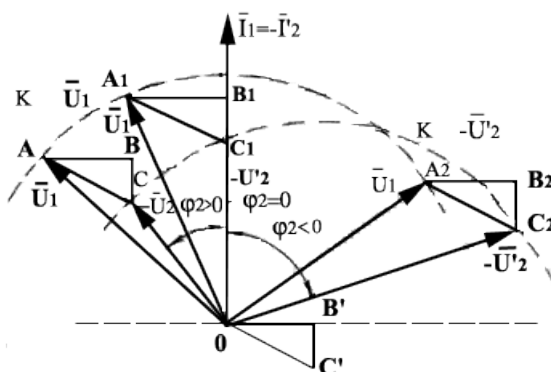


Рисунок 7 - Упрощенная диаграмма при различных значениях угла φ_2

Порядок построения:

- из точки «0», как из центра проводится дуга окружности радиусом, равным в принятом масштабе величине напряжения U_1 ;
 - под углом φ_2 проводится направление вектора вторичного напряжения $-U'_2$ ($\varphi_2 > 0$ - при активно-индуктивной нагрузке, $\varphi_2 = 0$ - при чисто активной нагрузке, $\varphi_2 < 0$ - при активно-ёмкостной нагрузке);
 - во всех случаях треугольник к.з. располагается таким образом, чтобы вершина А была на дуге U_1 , вершина С - на направлении вектора $-\overline{U'_2}$, а катет ВС совпадал по направлению с вектором $\overline{I'_2}$.
- Точки С, С₁ и С₂ определяют величину U'_2 при соответствующем φ_2 .

Если треугольник ABC поместить в положение ОВ'С', то дуга, проведенная из вершины С' радиусом U_1 , пройдет через точки С, С₁ и С₂ и является, таким образом геометрическим местом конца вектора $-\overline{U'_2}$.

Из рисунка 7 хорошо видно, что при активно-индуктивной нагрузке и чисто активной нагрузке $U'_2 < U_1$. При активно-ёмкостной нагрузке вторичное напряжение U'_2 может стать больше первичного U_1 .

7. Построение зависимости $\Delta U = f(\beta)$ (рисунок 8).

7.1. Проверить величину $\Delta U_2\%$ по соотношению

$$\Delta U_2\% = \beta [u_k]\% \cos(\varphi_2 - \varphi_k) \quad (49)$$

для указанных выше значений φ_2 , принимая коэффициент нагрузки $\beta = 1$.

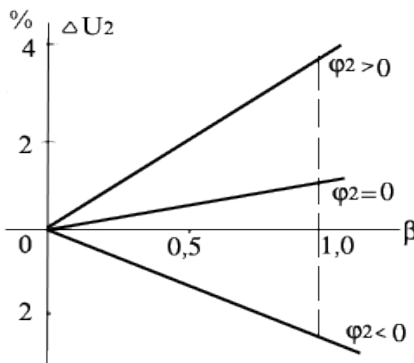


Рисунок 8 - Зависимости ΔU_2 от коэффициента нагрузки β при различных φ_2

8. Для ударного тока короткого замыкания

$$i_{k_{yo}} = I_{km} \left(1 + e^{\frac{r_k}{x_k} \pi} \right) = I_{km} K_{yo} \quad (50)$$

рассчитать амплитудное значение установившегося тока короткого замыкания

$$I_{km} = \frac{U_{1m}}{Z_k} \quad (51)$$

и ударный коэффициент

$$K_{yo} = \left(1 + e^{\frac{r_k}{x_k} \pi} \right). \quad (52)$$

Таблица 5 - Варианты задания

№ п/п	Ном. мощ- ность S, кВА	U _{1н} кВ	K	[u _{1к}] %	I ₀ %	P ₀ кВт	P _к кВт	Угол на- грузки φ ₂ ⁰
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-3	10500	110	17	8,0	3,3	29,5	81,5	45 ⁰ , -45 ⁰
4-6	-«-	220	34	9,0	2,8	-«-	-«-	-«-
7-9	-«-	330	52	10,0	2,5	-«-	-«-	-«-
10-12	-«-	110	11	8,0	3,3	-«-	-«-	-«-
13-15	-«-	220	22	9,0	2,8	-«-	-«-	-«-
16-18	-«-	230	33	10,0	2,5	-«-	-«-	-«-
19-21	20000	110	17	8,0	3,3	47,0	129	-«-
22-24	-«-	220	34	9,0	2,8	-«-	-«-	-«-
25-27	-«-	330	52	10,0	2,5	-«-	-«-	-«-
28-30	-«-	110	11	8,0	3,3	-«-	-«-	-«-
31-33	-«-	220	22	9,0	2,8	-«-	-«-	-«-
34-36	-«-	330	33	10,0	2,5	-«-	-«-	-«-
37-39	40000	110	17	8,0	3,3	84	216	-«-
40-42	-«-	220	34	9,0	2,8	-«-	-«-	-«-
43-45	-«-	330	52	10,0	2,5	-«-	-«-	-«-
46-48	-«-	110	11	8,0	3,3	-«-	-«-	-«-
49-51	-«-	220	22	9,0	2,8	-«-	-«-	-«-
52-54	-«-	330	33	10,0	2,5	-«-	-«-	-«-

Примечания:

1. Номер варианта соответствует номеру в журнале преподавателя.

2. В каждой строчке три варианта, каждому варианту соответствует определенный угол, например: 1. φ₂ = 45⁰; 2. φ₂ = 0⁰; 3. φ₂ = -45⁰.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

Тема: Расчет двухобмоточного трансформатора

Исходные данные: однофазный двухобмоточный трансформатор имеет данные, приведенные в таблице 6.

Цель занятия:

- произвести конструктивный расчет трансформатора, при этом:
- рассчитать и выбрать по таблице соответствующий типоразмер Ш—образного магнитопровода;
- определить числа витков обмоток;
- определить сечения и диаметры проводов обмоток;
- найти вес активных материалов, приходящийся на единицу мощности.
- вычертить электрическую схему и эскиз трансформатора;
- определить ток холостого хода;
- найти потери в стали и меди;
- найти активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания;
- определить активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания;
- определить сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора;
- определить сопротивления намагничивающего контура;
- вычертить схему замещения трансформатора;
- вычертить в масштабе векторную диаграмму трансформатора при активной нагрузке.

Примечания:

1. Во всех вариантах принять напряжение короткого замыкания $[u_k]\% = 12\%$;
2. При расчетах использовать таблицы 6,7,8,9.
3. При расчетах принять соотношения (23).

Методические указания

А. Конструктивный расчет трансформатора

Под конструктивным расчетом трансформатора понимается определение стандартного типоразмера сердечника, расчет числа витков обмоток и определение сечений и диаметров проводов обмоток. Приблизительный вид сердечника трансформатора представлен на рисунке 9.

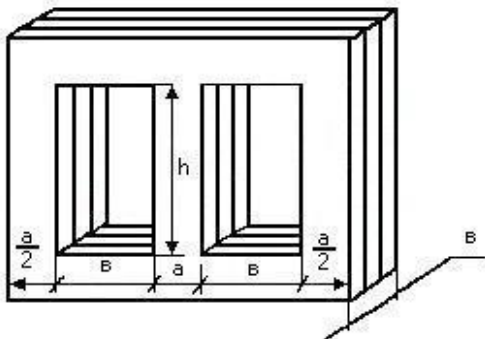


Рисунок 9 - Сердечник трансформатора

Здесь I_k – ток в k – ой обмотке: $I_k = \frac{S_k}{U_k}$, А ,

S_k - мощность k – ой обмотки, ВА.

Б. К определению параметров схемы замещения

Активное сопротивление первичной (R_1) и вторичной (R_2) обмоток следует находить по выражениям:

$$R_1 = \rho \frac{l_1 W_1}{q_1}, \text{ Ом}; \quad R_2 = \rho \frac{l_2 W_2}{q_2}, \quad (53)$$

где $\rho = 0.0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – удельное сопротивление меди;

l_1, l_2 – средние длины витков первичной и вторичной обмоток, м (находятся из эскиза трансформатора);

W_1, W_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток, мм².

Приведенное сопротивление вторичной обмотки R_2' , Ом

$$R_2' = R_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2. \quad (54)$$

Сопротивление рассеяния первичной обмотки (X_1) и вторичной (X_2) обмоток определяется по выражению:

$$X_1 = X_2 = \frac{\sqrt{Z_k^2 - (R_1 + R_2')^2}}{2}. \quad (55)$$

Сердечник выбирают по таблице 7, исходя из произведений сечений окна S_0 (см²) и стали S_c (см²). Можно сказать, что

$$S_0 S_c = \frac{10^4 (1 + \eta)}{2 B_m \delta K_m \eta} \sum S_2, \quad (56)$$

где η - КПД трансформатора;

ΣS_2 – мощность всех вторичных обмоток, ВА;

B_m – амплитудное значение индукции переменного магнитного поля, Тл;

K_m – коэффициент заполнения окна магнитопровода медью.

Входящие в это выражение величины можно найти по таблицам.

Число витков первичной обмотки находят по формуле:

$$W_1 = \frac{U_1 10^8}{4.44 B_m S_0 f}, \quad (57)$$

где W_1 – число витков первичной обмотки,

U_1 – напряжение на первичной обмотке, В.

Число витков k – ой обмотки находится по формуле:

$$W_k = \frac{U_k}{U_1} K_3, \quad (58)$$

где W_k – число витков k – ой обмотки;

U_k – напряжение на k – ой обмотке;

K_3 – коэффициент, учитывающий падение напряжения в обмотке. Обычно $K_3 = 1.05 \dots 1.08$.

$$\text{Сечение провода } k \text{ – ой обмотки } q_k = \frac{I_k}{j} \text{ мм}^2, \quad (59)$$

где j – допустимая плотность тока, А/мм².

Здесь X_k и Z_k – реактивное и полное сопротивление короткого замыкания, Ом.

Таблица 6 - Данные для расчета трансформатора

Исходные данные	ВАРИАНТЫ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мощность вторичной обмотки S_2 , ВА	50	100	30	150	200	50	100	30	150	200
Напряжение вторичной обмотки U_2 , В	220	110	220	110	220	110	220	110	220	110
Напряжение первичной обмотки U_1 , В	110	220	110	220	110	220	110	220	110	220
Частота тока f , Гц	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Таблица 7 – Размеры сердечника трансформатора

Тип сердечника	a, м	б, м	в, м	h, м	S_c , м ²	S_o , м ²	$S_o S_c$, м ⁴
Ш – 11	0.011	0.01	0.0115	0.034	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$
	0.011	0.02	0.0115	0.034	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$8.6 \cdot 10^{-4}$
Ш – 15	0.015	0.015	0.0135	0.024	$2.25 \cdot 10^{-4}$	$3.24 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{-4}$
	0.015	0.03	0.0135	0.024	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$3.24 \cdot 10^{-4}$	$14.6 \cdot 10^{-4}$
Ш – 19	0.019	0.02	0.017	0.046	$3.8 \cdot 10^{-4}$	$7.8 \cdot 10^{-4}$	$29.6 \cdot 10^{-4}$
	0.019	0.04	0.017	0.046	$7.6 \cdot 10^{-4}$	$7.8 \cdot 10^{-4}$	$59.2 \cdot 10^{-4}$
Ш – 20	0.02	0.02	0.01	0.03	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$12.0 \cdot 10^{-4}$
	0.02	0.04	0.01	0.03	$8.0 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$24.0 \cdot 10^{-4}$
Ш - 25	0.025	0.025	0.025	0.06	$6.25 \cdot 10^{-4}$	$15.0 \cdot 10^{-4}$	$93.8 \cdot 10^{-4}$
	0.025	0.05	0.025	0.06	$12.50 \cdot 10^{-4}$	$15.0 \cdot 10^{-4}$	$187.8 \cdot 10^{-4}$
Ш - 30	0.03	0.03	0.015	0.045	$9.0 \cdot 10^{-4}$	$6.75 \cdot 10^{-4}$	$61.0 \cdot 10^{-4}$
	0.03	0.06	0.015	0.045	$18.0 \cdot 10^{-4}$	$6.75 \cdot 10^{-4}$	$122.0 \cdot 10^{-4}$
Ш - 40	0.04	0.04	0.09	0.07	$16.0 \cdot 10^{-4}$	$21.0 \cdot 10^{-4}$	$336.0 \cdot 10^{-4}$
	0.04	0.08	0.09	0.07	$32.0 \cdot 10^{-4}$	$21.0 \cdot 10^{-4}$	$672.0 \cdot 10^{-4}$

Таблица 8 – Мощность, электромагнитные нагрузки и КПД трансформаторов

Мощность транс- форматора $P_{тр}$, ВА	Максимальн. магнит- ная индукция B_m , Тл	КПД трансфор- матора η , о.е.	Плотность тока j , А/ мм ²
До 10	6000	0.6 - 0.7	2.5 - 3
10 - 30	7000	0.7 - 0.8	2.5
50 - 100	10000	0.85 - 0.9	2 - 2.5
Больше 100	11000	0.9	2

Таблица 9 – Значение коэффициента заполнения окна медью K_m

Диаметр провода	Марка обмоточного провода			Примечания
	ПЭ	ПЭЩД	ПБД	
0.1 - 0.2	0.1 - 0.2			Рабочее напряжение до 1000 В
0.4 - 0.8	0.2 - 0.3	0.1 - 0.2		
0.4 - 0.8	0.3 - 0.35	0.2 - 0.3	0.1 - 0.2	
0.8 - 1.0	0.35 - 0.45	0.3 - 0.35	0.2 - 0.3	

Таблица 10 – Трансформаторная сталь. Удельные потери

Индукция	Потери в ста- ли Вт/кг		Индукция	Потери в ста- ли Вт/кг		Индукция	Потери в ста- ли Вт/кг	
	гс	толщина листа 0.35 мм толщина листа 0.5 мм		гс	толщина листа 0.35 мм толщина листа 0.5 мм		гс	толщина листа 0.35 мм толщина листа 0.5 мм
8000	0.87	1.10	10000	1.30	1.60	12000	1.91	2.30
8100	0.89	1.12	10100	1.33	1.64	12100	1.94	2.35
8200	0.91	1.14	10200	1.35	1.67	12200	1.98	2.39
8300	0.93	1.16	10300	1.38	1.70	12300	2.02	2.43
8400	0.95	1.18	10400	1.41	1.74	12400	2.06	2.47
8500	0.97	1.20	10500	1.44	1.77	12500	2.10	2.51
8600	0.99	1.22	10600	1.46	1.80	12600	2.14	2.56
8700	1.01	1.25	10700	1.49	1.83	12700	2.17	2.60
8800	1.03	1.27	10800	1.52	1.86	12800	2.22	2.64
8900	1.03	1.29	10900	1.55	1.89	12900	2.27	2.69
9000	1.07	1.32	11000	1.58	1.93	13000	2.31	2.73
9100	1.09	1.34	11100	1.61	1.96	13100	2.35	2.77
9200	1.11	1.36	11200	1.64	2.00	13200	2.40	2.82
9300	1.13	1.39	11300	1.67	2.04	13300	2.45	3.86
9400	1.16	1.42	11400	1.70	2.07	13400	2.50	2.90
9500	1.18	1.45	11500	1.73	2.10	13500	2.55	2.95
9600	1.20	1.48	11600	1.76	2.14	13600	2.60	3.00
9700	1.23	1.51	11700	1.80	2.18	13700	2.64	3.06
9800	1.25	1.54	11800	1.83	2.22	13800	2.69	3.12
9900	1.28	1.57	11900	1.87	2.26	13900	2.74	3.18
10000	1.30	1.60	12000	1.91	2.30	14000	2.80	3.25

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

Тема: Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Исходные данные: трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет номинальные данные и параметры, указанные в таблицах 11, 12.

Цель занятия. Рассчитать:

- номинальную частоту вращения ротора n_2 ;
- число пар полюсов p ;
- номинальный ток (линейный) $I_{1н}$;
- приведенный ток цепи ротора $I'_{2н}$;
- электромагнитную мощность $P_{эм}$;
- электромагнитный момент $M_{эм}$;
- номинальный момент на валу $M_{2н}$;
- критическое скольжение $s_{кр}$;
- максимальную электромагнитную мощность $P_{эмmax}$;
- максимальный момент $M_{эмmax}$;
- потери мощности в стали $P_{ст}$;
- потери в меди ротора $P_{м2}$;
- потери в меди статора $P_{м1}$;
- потери механические $P_{мх}$;
- потери добавочные $P_{д}$;
- перегрузочную способность электродвигателя K .

Кроме того, требуется:

1. Представить схему включения двигателя в сеть с переключением со “звезды” на “треугольник”;
2. Начертить энергетическую диаграмму асинхронного двигателя;
3. Рассчитать и построить зависимости $M_{эм} = f(s)$, $I_1 = f(s)$, $\cos\varphi = f(s)$.

ПРИМЕЧАНИЕ

Соединение фаз обмоток статора - "треугольник" - "звезда"; параметры схемы замещения в таблице 2 даны в относительных единицах.

Число полюсов указано в типоразмере двигателя после вторых букв, например, 4А80В8У3, $2p = 8$.

$r_{1(20)}$ – активное сопротивление обмотки фазы статора при 20°С.

Таблица 11 – Предварительные данные к расчету асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Тип электродвигателя	Статор $r_{1(20)}$, Ом	Скольже- ние s_H , %	
Синхронная частота вращения 1500 об/мин			
4AA50A4Y3	91,1	8,1	
4AA50B4Y3	59,1	8,6	
4AA56A4Y3	70,6	8,0	
4AA56B4Y3	46,6	8,7	
Синхронная частота вращения 1000 об/мин			
4AA63A6Y3	52,0	11,5	
4AA63B6Y3	30,0	10,8	
4AA71A6Y3	21,1	8,0	
4AA71B6Y3	14,4	8,0	
Синхронная частота вращения 750 об/мин			
4A71B8Y3	35,6	9,3	
4A80A8Y3	21,3	10,0	
4A80B8Y3	13,4	10,0	
4A90LA8Y3	8,32	6,0	
Синхронная частота вращения 600 об/мин			
4A250S10Y3	0,319	1,9	
4A280S10Y3	0,066	2,0	
4A280M10Y3	0,0634	2,0	
4A315S10Y3	0,0383	2,0	

Таблица 12 - Данные к расчету асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, степень защиты IP44, $U_1 = 220; 380$

Тип электродви- гателя	$P_{2н}$	Электромагнитные нагрузки				Энергетические показатели									
		кВт	B_{δ} , Тл	A , А/м * 10^{-2}	J , А/м ² * 10^{-6}	КПД, % при $P_2/P_{2ном}$, %					Cos φ при $P_2/P_{2ном}$, %				
						25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Синхронная частота вращения 1500 об/мин															
AA50A4Y3	0,06	0,64	136	4,5	25,0	40,0	50,0	50,0	49,0	0,31	0,41	0,51	0,6	0,68	
4AA50B4Y3	0,09	0,68	152	4,9	31,0	46,0	55,0	55,0	54,0	0,31	0,4	0,51	0,6	0,68	
AA56A4Y3	0,12	0,71	146	6,2	40,0	55,0	63,0	63,0	61,0	0,3	0,43	0,56	0,66	0,7	
4AA56B4Y3	0,18	0,75	167	6,9	43,5	58,0	64,0	64,0	61,0	0,26	0,4	0,53	0,64	0,71	
Синхронная частота вращения 1000 об/мин															
4AA63A6Y3	0,18	0,74	195	7,6	34,5	49,5	56,0	56,0	52,0	0,25	0,38	0,51	0,62	0,71	
4AA63B6Y3	0,25	0,71	196	6,4	39,5	54,0	59,0	59,0	55,0	0,24	0,38	0,51	0,62	0,7	
4AA71A6Y3	0,37	0,82	206	6,9	45,5	59,5	64,5	64,5	61,0	0,30	0,45	0,58	0,69	0,76	
4AA71B6Y3	0,55	0,80	213	7,5	52,5	65,5	68,5	67,5	62,5	0,30	0,47	0,60	0,71	0,77	
Синхронная частота вращения 750 об/мин															
4A71B8Y3	0,25	0,69	211	7,2	36,5	51,5	56,5	56,0	45,0	0,29	0,42	0,55	0,65	0,75	
4A80A8Y3	0,37	0,71	201	6,8	42,5	57,0	61,5	61,5	56,5	0,28	0,42	0,55	0,65	0,72	
4A80B8Y3	0,55	0,75	210	7,3	46,0	60,0	64,5	64,0	59,0	0,28	0,42	0,55	0,65	0,71	
4A90LA8Y3	0,75	0,81	209	7,0	49,0	63,0	68,0	68,0	65,5	0,26	0,40	0,52	0,62	0,68	
Синхронная частота вращения 600 об/мин															
A250S10Y3	30,0	0,82	407	6,7	84,5	98,5	88,0	88,0	86,0	0,43	0,66	0,76	0,81	0,82	
A280S10Y3	37,0	0,78	362	3,8	86,5	90,5	91,0	91,0	89,5	0,44	0,65	0,73	0,78	0,77	
A280M10Y3	45,0	0,78	411	4,6	84,0	92,0	92,0	91,5	89,5	0,47	0,68	0,74	0,78	0,77	
A315S10Y3	55,0	0,77	362	3,8	88,5	92,0	92,0	92,0	91,0	0,49	0,69	0,76	0,79	0,79	

Таблица 12 – Продолжение. Данные к расчету асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Тип электродвигателя	Параметры схемы замещения, о.е.							
	χ_{Σ}	В номинальном режиме				При коротком замыкании		
		R'_1	X'_1	R'_2	X'_2	$R'_{2п}$	$r_{кп}$	$x_{кп}$
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
AA50A4Y3	1,2	0,16	0,17	0,22	0,17	0,22	0,38	0,34
4AA50B4Y3	1,2	0,13	0,16	0,21	0,17	0,21	0,35	0,33
AA56A4Y3	1,2	0,18	0,087	0,15	0,15	0,15	0,32	0,23
4AA56B4Y3	1,3	0,18	0,09	0,16	0,17	0,16	0,33	0,24
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
4AA63A6Y3	1,3	0,24	0,15	0,22	0,18	0,22	0,46	0,30
4AA63B6Y3	1,4	0,18	0,13	0,21	0,19	0,21	0,40	0,28
4AA71A6Y3	1,3	0,17	0,12	0,15	0,16	0,15	0,32	0,24
4AA71B6Y3	1,4	0,16	0,11	0,15	0,17	0,15	0,31	0,24
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
4A71B8Y3	1,2	0,22	0,18	0,23	0,28	0,23	0,45	0,43
4A80A8Y3	1,3	0,19	0,16	0,16	0,29	0,16	0,35	0,40
4A80B8Y3	1,3	0,17	0,16	0,15	0,29	0,16	0,33	0,38
4A90LA8Y3	1,3	0,14	0,15	0,11	0,29	0,12	0,26	0,35
Синхронная частота вращения 600 об/мин								
A250S10Y3	2,3	0,056	0,11	0,023	0,17	0,053	0,11	0,22
A280S10Y3	2,0	0,031	0,11	0,027	0,15	0,051	0,082	0,20
A280M10Y3	2,2	0,037	0,12	0,031	0,16	0,057	0,093	0,22
A315S10Y3	2,0	0,028	0,10	0,026	0,14	0,048	0,076	0,19

Методические указания

Вращающееся магнитное поле, создаваемое, протекающими по обмотке статора токами, пересекает обмотку ротора и наводит в ней ЭДС. Поскольку цепь ротора замкнута, то по ней проходит ток, взаимодействие которого с полем статора приводит к возникновению вращающего электромагнитного момента. Если этот момент больше момента сопротивления исполнительного механизма, то ротор двигателя приходит во вращение. Скорость вращения ротора всегда меньше частоты вращения поля, т.к. при равенстве скоростей Э.Д.С. в роторе не наводится, а, следовательно, ток и электромагнитный момент равны нулю.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя зависит от нагрузки на валу, поэтому Э.Д.С. и индуктивное сопротивление ротора — переменные величины. Это оказывает влияние на характер изменения всех характеристик двигателя, главными из которых являются зависимости $M_{\text{эм}} = f(s)$, $I_1 = f(s)$, $\cos\varphi = f(s)$ и др.

Расчет названных выше параметров и характеристик необходимо проводить в соответствии с приведенными ниже соотношениями.

1. Номинальная частота вращения ротора

$$n_{2\text{н}} = n_1(1 - s_{\text{н}}), \text{ об/мин} \quad (60)$$

2. Число пар полюсов машины

$$p = 60f_1/n_1, \quad (61)$$

где f_1 — частота напряжения сети, $f_1 = 50$ Гц,

n_1 — частота вращения поля статора, об/мин.

3. Номинальный первичный фазный ток

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\sqrt{3}U_{1\text{ф}} \cos\varphi_{\text{н}} \eta_{\text{н}}}, \text{ А} \quad (62)$$

где $P_{2\text{н}}$ — номинальная мощность на валу,

$U_{1\text{ф}}$ — фазное напряжение статорной обмотки, В,

$\cos\varphi_{\text{н}}$ — номинальный коэффициент мощности,

$\eta_{\text{н}}$ — номинальный коэффициент полезного действия.

4. Номинальный ток ротора

$$I'_{2H} \approx \frac{U_{1\Phi}}{\left(\sqrt{\left(r_1 + \frac{R'_2}{s_H} \right)^2 + (x_1 + X'_2)^2} \right)}, \text{ А}, \quad (63)$$

где $r = R' \frac{U_{1\Phi}}{I_{1H}}$, $x = X' \frac{U_{1\Phi}}{I_{1H}}$.

5. Номинальная электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = m_1 (I'_{2H})^2 \frac{R'_2}{s_H}, \text{ Вт} \quad (64)$$

где m_1 – число фаз статора двигателя, $m_1 = 3$.

6. Номинальный электромагнитный момент

$$M_{\text{эмн}} = \frac{pm_1 U_{1\Phi}^2 \frac{R'_2}{s_H}}{2\pi f_1 \left(\left(r_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + X'_2)^2 \right)}, \text{ Н·м} \quad (65)$$

7. Номинальный момент на валу электродвигателя

$$M_{2H} = \frac{P_{2H}}{\Omega_{2H}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2H}}{n_{2H}}, \text{ Н·м} \quad (66)$$

$$M_{2H} = 0,975 \cdot \frac{P_{2H}}{n_{2H}}, \text{ кГм},$$

где n_{2H} – номинальная частота вращения ротора, об/мин,
 $\Omega_2 = (\pi n_{2H})/30$ – угловая частота вращения ротора, рад/с.

8. Максимальная электромагнитная мощность

$$P_{\text{эммакс}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi}^2}{2 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + X'_2)^2} \right]}, \text{ Вт} \quad (67)$$

9. Критическое скольжение, о.е.

$$s_{\text{кр}} = \frac{R'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + X'_2)^2}} \quad (68)$$

10. Максимальный электромагнитный момент

$$M_{\text{эммакс}} = \frac{P_{\text{эммакс}}}{\Omega} = \frac{m_1 p U_{1\phi}^2}{4\pi f_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + X'_2)^2} \right]}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (69)$$

11. Потери мощности, Вт

- в обмотке статора

$$P_{\text{м1}} = m_1 (I_{1\text{н}})^2 r_1 \quad (70)$$

- в стали

$$P_{\text{ст}} = [P_1 - (P_{\text{эм}} + P_{\text{м1}})]; \quad (71)$$

- в меди ротора,

$$P_{\text{м2}} = m_1 (I'_{2\text{н}})^2 R'_2, \quad (72)$$

- механические и добавочные

$$P_{\text{мх}} + P_{\text{д}} = P_{\text{эм}} - (P_{2\text{н}} + P_{\text{м1}} + P_{\text{м2}}), \quad (73)$$

где добавочные потери

$$P_{\text{д}} = 0.005 P_1 \quad (74)$$

где P_1 – полная мощность двигателя.

13. Перегрузочная способность двигателя

$$K = \frac{M_{\text{эммакс}}}{M_{\text{эмн}}} \quad (75)$$

5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

Тема: Расчет асинхронного двигателя с фазным ротором

Исходные данные: трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет номинальные данные, указанные в таблицах 13 и 14.

Цель занятия. Рассчитать:

- номинальную частоту вращения ротора n_2 ;
- число пар полюсов p ;
- номинальный ток (линейный) $I_{1н}$;
- электромагнитную мощность $P_{эм}$;
- электромагнитный момент $M_{эм}$;
- номинальный момент на валу $M_{2н}$;
- максимальную электромагнитную мощность $P_{эмmax}$;
- максимальный момент $M_{эмmax}$;
- потери мощности в стали $P_{ст}$;
- потери в меди ротора $P_{м2}$;
- потери в меди статора $P_{м1}$;
- потери механические $P_{мх}$;
- потери добавочные $P_{д}$;
- добавочное сопротивление в цепи ротора для получения пускового момента равного номинальному r_d ;
- перегрузочную способность электродвигателя K .

Дополнительно требуется представить принципиальную схему включения двигателя в сеть.

Таблица 13 - Данные к расчету асинхронного двигателя
с фазным ротором, степень защиты IP44

№/№ п.п	Тип электродви- гателя	$P_{2н}$,	Электромагнитные нагрузки			Энергетические показатели	
		Вт	B_{δ} , Тл	A , А/м $\cdot 10^{-2}$	J , А/м ² , $\cdot 10^{-6}$	КПД, %	cosφ
Синхронная частота вращения 1500 об/мин							
1	4AK160S4Y3	11,0	0.72	238	4.4	86.5	0.86
2	4AK160M4Y3	14,0	0.72	233	4.4	88.5	0.87
3	4AK180M4Y3	18,5	0.79	223	3.7	89.0	0.88
4	4AK200M4Y3	22,0	0.76	229	3.6	90.0	0.87
5	4AK200L4Y3	30,0	0.73	266	4.2	90.5	0.87
Синхронная частота вращения 1000 об/мин							
6	4AK160S6Y3	7,5	0.79	214	5.1	82.5	0.77
7	4AK160M6Y3	10,0	0.78	208	4.8	84.5	0.76
8	4AK180M6Y3	13,0	0.82	250	4.3	85.5	0.80
9	4AK200M6Y3	18,5	0.74	247	3.9	88.0	0.81
10	4AK200L6Y3	22,0	0.74	282	5.1	88.0	0.80
Синхронная частота вращения 750 об/мин							
11	4AK160S8Y3	5,5	0.78	230	5.20	80.0	0.70
12	4AK160M8Y3	7,1	0.74	222	5.1	82.0	0.70
13	4AK180M8Y3	11,0	0.75	257	4.2	85.5	0.72
14	4AK200M8Y3	15,0	0.79	285	4.6	86.0	0.70
15	4AK200L8Y3	18,5	0.76	296	4.5	86.0	0.73

Таблица 13 – Продолжение. Данные к расчету асинхронного двигателя с фазным ротором, степень защиты IP44

№/№ п.п.	$I'_{2н}$	U_2	Механическая характеристика			Параметры схемы замещения, о.е.				
	A	B	m_K	$s_{н\%}$	$s_{K\%}$	X_{μ}	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2
	Синхронная частота вращения 1500 об/мин									
1	22	305	3.0	4.4	33.0	2.8	0.038	0.068	0.051	0.086
2	29	300	3.5	3.7	32.1	2.6	0.032	0.060	0.042	0.078
3	38	295	4.0	2.9	31.1	2.1	0.022	0.042	0.034	0.063
4	45	340	4.0	2.5	22.0	2.5	0.024	0.050	0.026	0.075
5	55	350	4.0	2.5	22.0	3.0	0.026	0.057	0.030	0.087
	Синхронная частота вращения 1000 об/мин									
6	18	300	3.5	5.1	30.1	1.9	0.054	0.079	0.068	0.12
7	20	310	3.8	4.3	27.1	1.8	0.043	0.071	0.058	0.13
8	25	325	4.0	4.4	29.1	1.9	0.035	0.065	0.057	0.11
9	35	360	3.5	3.5	27.5	2.2	0.030	0.060	0.038	0.078
10	45	330	3.5	3.5	21.0	2.2	0.032	0.066	0.041	0.089
	Синхронная частота вращения 750 об/мин									
11	14	300	2.5	6.4	29.0	1.6	0.60	0.112	0.094	0.175
12	16	290	3.0	5.5	23.2	1.6	0.053	0.11	0.079	0.208
13	25	270	3.5	4.4	22.7	1.7	0.041	0.086	0.062	0.167
14	28	360	3.0	3.5	23.0	1.8	0.040	0.081	0.048	0.12
15	40	300	3.0	3.5	21.5	2.2	0.038	0.089	0.046	0.12

Таблица 14 – Дополнительные данные к расчету асинхронного двигателя с фазным ротором

Тип электродвигателя	Статор $r_{1(20)}$, Ом	Ротор $r_{2(20)}$, Ом
Синхронная частота вращения 1500 об/мин		
4AK160S4Y3	0,270	0,232
4AK160M4Y3	0,188	0,147
4AK180M4Y3	0,0989	0,106
4AK200M4Y3	0,0900	0,0734
4AK200L4Y3	0,0743	0,0634
Синхронная частота вращения 1000 об/мин		
4AK160S6Y3	0,481	0,353
4AK160M6Y3	0,290	0,259
4AK180M6Y3	0,194	0,211
4AK200M6Y3	0,141	0,147
4AK200L6Y3	0,121	0,101
Синхронная частота вращения 750 об/мин		
4AK160S8Y3	0,652	0,732
4AK160M8Y3	0,456	0,403
4AK180M8Y3	0,243	0,167
4AK200M8Y3	0,194	0,203
4AK200L8Y3	0,121	0,101

ПРИМЕЧАНИЕ:

Соединение фаз обмоток статора – “треугольник”-“звезда”.

1. Начертить энергетическую диаграмму асинхронного двигателя
2. Рассчитать и построить зависимости $I_1 = f(s)$, $M = f(s)$, $\cos\varphi(s)$ при $R'_2 = \text{var}$.

Методические указания

Наряду с асинхронными двигателями переменного тока с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) большое распространение получили двигатели с фазной обмоткой на роторе (иначе двигатели с контактными кольцами). У этих машин переменное питающее напряжение подается в трехфазную статорную обмотку. Выводные концы трехфазной обмотки ротора соединяются обычно в звезду и припаиваются к трем контактными кольцам. С помощью щеток, соприкасающихся с кольцами, в цепь обмотки ротора можно вводить добавочное сопротивление для изменения пусковых или рабочих свойств машины, щетки позволяют также замкнуть обмотку накоротко.

В большинстве случаев добавочное сопротивление вводится в обмотку ротора только при пуске двигателя, что приводит к увеличению пускового момента и уменьшению пусковых токов, что, в свою очередь, облегчает пуск.

По сравнению с АДКЗ двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию ротора, что приводит к их заметному удорожанию. Поэтому двигатели с контактными кольцами на роторе находят применение лишь при тяжелых условиях пуска, а также при необходимости плавного регулирования частоты вращения.

Расчет требуемых параметров необходимо проводить в соответствии с приведенной далее методикой расчета. Представленные формулы позволяют определить параметры асинхронного электродвигателя с фазным ротором и пусковых сопротивлений.

1. Номинальная частота вращения ротора, об/мин

$$n_{2н} = n_1(1 - s_n). \quad (76)$$

2. Число пар полюсов машины

$$p = 60f_1/n_1, \quad (77)$$

где f_1 – частота напряжения сети, $f_1 = 50$ Гц,

n_1 – частота вращения поля статора, об/мин.

3. Номинальный первичный фазный ток

$$I_{1н} = \frac{P_{2н}}{(3U_{1ф} \cos \varphi_n \eta_n)}, \text{ A} \quad (78)$$

где $U_{1ф}$ – фазное напряжение, В,

$\cos\varphi_n$ - номинальный коэффициент мощности,

η_n – номинальный коэффициент полезного действия.

4. Номинальная электромагнитная мощность, Вт

$$P_{\text{эм}} = m_1 (I'_{2n})^2 \frac{R'_2}{s_n}, \quad (79)$$

5. Номинальный электромагнитный момент, Н·м

$$M_{\text{эм}} = \frac{pm_1 U_{1\phi}^2 \frac{R'_2}{s_n}}{2\pi f_1 \left(\left(r_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + X'_2)^2 \right)}. \quad (80)$$

6. Номинальный момент на валу электродвигателя, Н·м

$$M_{2n} = \frac{P_{2n}}{\Omega_{2n}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2n}}{n_{2n}}, \quad (81)$$

где n_{2n} – номинальная частота вращения ротора, об/мин,

$\Omega_2 = (\pi n_{2n})/30$.

7. Максимальная электромагнитная мощность, Вт

$$P_{\text{эммакс}} = \frac{m_1 U_{1\phi}^2}{2 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + X'_2)^2} \right]}, \quad (82)$$

8. Максимальный электромагнитный момент, Н·м

$$M_{\text{эм.макс}} = \frac{P_{\text{эм.макс}}}{\Omega} = \frac{m_1 p U_{1\phi}^2}{4\pi f_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + X'_2)^2} \right]} \quad (83)$$

9. Потери мощности, Вт

- в обмотке статора

$$P_{m1} = m_1 I_{1n}^2 r_1; \quad (84)$$

- в стали

$$P_{\text{ст}} = [P_1 - (P_{\text{эм}} + P_{\text{м1}})]; \quad (85)$$

- в меди ротора,

$$P_{\text{м2}} = m_1 \cdot (I'_{2\text{н}})^2 \cdot R'_2, \quad (86)$$

- механические и добавочные

$$P_{\text{мх}} + P_{\text{д}} = P_{\text{эм}} - (P_{2\text{н}} + P_{\text{м1}} + P_{\text{м2}}) \quad (87)$$

- добавочные потери

$$P_{\text{д}} = 0.005 \cdot P_1 \quad (88)$$

где P_1 – полная мощность двигателя.

13. Добавочное сопротивление в цепи ротора, при котором пусковой момент равен номинальному, Ом:

$$r_{\text{д}} = \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + X'_2)^2} - R'_2}{K_E^2} \quad (89)$$

14. Перегрузочная способность двигателя

$$K_E = M_{\text{эм.макс}} / M_{\text{эмн}} \quad (90)$$

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

Тема: Расчет трехфазного синхронного генератора

Исходные данные: трехфазный судовый синхронный генератор (СГ), который имеет данные, приведенные в таблице 5 при этом частота тока 50 Гц, обмотка статора соединена в "звезду"(Y), значения сопротивлений приведены для одной фазы статора.

Цель занятия:

1. Построить практическую векторную диаграмму и определить по ней процентное изменение (повышение) напряжения на выходе СГ при сбросе нагрузки.

2. Построить регулировочную характеристику для $I_b = f(I_a)$ при $U = U_n = \text{const}$ и $\cos\varphi = 0,8 = \text{const}$.

3. Построить внешнюю характеристику $U = f(I_a)$ при $\cos\varphi = 0,8 = \text{const}$, $I_b = I_{bн} = \text{const}$.

Таблица 15 – Данные для трехфазных синхронных генераторов

Наименование данных	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ном. мощность, P_n , кВт	60	15	25	35	45	60	15	25	35	45
Номинальное линейное напряжение U_n , В	400	400	400	400	230	230	230	230	230	400
Частота вращения, n , об/мин	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Коэфф. мощности	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Активное сопр. обмотки статора, r_a , Ом	0,06	0,07	0,018	0,011	0,08	0,017	0,012	0,032	0,02	0,04
Индуктивное сопрот. статора, x_p , Ом	0,24	1,06	0,63	0,3	0,11	0,08	0,35	0,21	0,15	0,32
Индуктивное сопротивление по продольн. оси, x_d , Ом	6,1	23,4	13,9	9,6	2,7	2,1	7,8	4,7	3,3	8,1

Методические указания

1. Общий порядок построения практической векторной диаграммы (рисунок 10)

- по данным таблицы 16 строится нормальная характеристика холостого хода (X.X.X.), которая является общей для всех явнополусных СГ;

Таблица 16 – Характеристика холостого хода синхронных генераторов

Напряжение на зажимах генератора при холост. ходе, о.е.	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51
Ток возбуждения, о.е.	0,5	1,0	1,5	2	2,5	3	3,5

- в принятых масштабах откладываются векторы напряжения $\bar{U}_H$ и тока $\bar{I}_{ан}$. Угол φ определяется по заданному значению $\cos\varphi_H$ (для $\cos\varphi_H = 0.8$, $\varphi = 36.8^\circ$).
- определяется значение $F_{в0}$ (или $I_{в0}$), соответствующее величине U_H ;
- рассчитываются падения напряжения на активном r_a и индуктивном x_p сопротивлениях фазы статора, решая уравнение электрического равновесия

$$\bar{E}_\delta = \bar{U}_H + \bar{I}_{ан} r_a + \bar{I}_{ан} x_p, \quad (91)$$

где E_δ - внутренняя ЭДС СГ,

x_p – индуктивное сопротивление Потье ($x_p \approx 1,1x_s$),

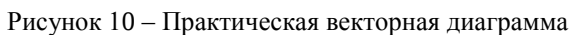
x_s – индуктивное сопротивление рассеяния,

определяется величина $E_{\delta H}$,

- по величине E_δ определяется соответствующее ей значение МДС $F_{\delta H}$. Вектор $\bar{F}_{\delta H}$ строится со сдвигом на 90° с опережением по отношению к вектору $\bar{E}_\delta$,
- к вектору $\bar{F}_{\delta H}$ пристраивается вектор МДС реакции якоря $\bar{F}_{ан}$, который рассчитывается по соотношению

$$F_{ан} = 1.35 \frac{W_1 K_{об} S_1}{p} I_H, \quad (92)$$

а по направлению совпадает с направлением вектора тока $\bar{I}_H$.


$$\overline{F}_{\text{BH}} = \overline{F}_{\delta\text{H}} + \overline{F}_{\text{aH}} \quad (93)$$

- по величине $F_{\text{вн}}$ определяется значение ЭДС E_0 , которая индуцируется в фазе обмотки статора при сбросе нагрузки. Для этого значение $F_{\text{вн}}$ откладывается по горизонтальной оси. На х.х.х. находится точка пересечения перпендикуляра от конца $F_{\text{вн}}$ ($I_{\text{вн}}$) и самой Х.Х.Х. (точка С), далее находится соответствующая ей величина E_0 . Вектор $\vec{E}_0$ необходимо построить со сдвигом 90° по отношению к вектору $\vec{F}_{\text{вн}}$,

- определяется процентное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100 \%. \quad (94)$$

Для практических расчетов изменение напряжения при сбросе нагрузки ΔU удобнее определить, воспользовавшись упрощенной векторной диаграммой, которая построена на рисунке 2 совместно с Х.Х.Х. и характеристикой короткого замыкания (х.к.з.).

Для построения диаграммы МДС необходимо построить характеристики холостого хода (по таблице 16), короткого замыкания, а также векторную диаграмму напряжений.

Построение следует производить в относительных единицах.

Относительное значение сопротивления рассеяния

$$X'_s = \frac{X_s \cdot I_{\text{н}}}{U_{\text{н}}}, \text{ о.е.} \quad (95)$$

Относительное значение сопротивления по продольной оси

$$X'_d = \frac{X_d \cdot I_{\text{н}}}{U_{\text{н}}}, \text{ о.е.} \quad (96)$$

Относительное значение активного сопротивления

$$r' = \frac{r \cdot I_{\text{н}}}{U_{\text{н}}}, \text{ о.е.} \quad (97)$$

Относительное значение напряжения

$$U' = \frac{U}{U_{\text{н}}}, \text{ о.е.} \quad (98)$$

Относительное значение тока

$$i' = \frac{I}{I_{\text{н}}}, \text{ о.е.} \quad (99)$$

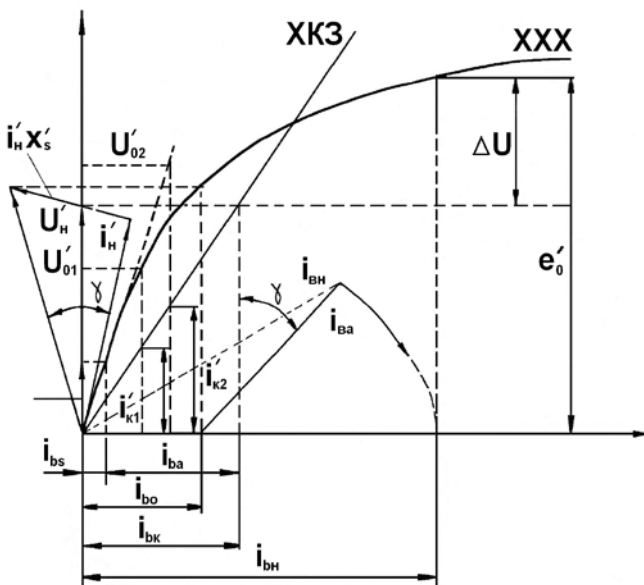


Рисунок 11 – Упрощенная векторная диаграмма синхронной машины совместно с х.х.х. и х.к.з.

Для построения характеристики короткого замыкания необходимо вычислить два значения тока короткого замыкания

$$i'_{k1} = \frac{U'_{01}}{X'_d}, \text{ о.е.}, \quad i'_{k2} = \frac{U'_{02}}{X'_d},$$

где U'_{01} и U'_{02} — произвольно взятые значения напряжения по спрямленной характеристике холостого хода (рисунок 11).

Прямая, проходящая через точки i'_{k1} и i'_{k2} и начало координат и есть характеристика короткого замыкания.

Далее необходимо построить векторную диаграмму по уравнению ЭДС $\bar{E}_\delta = \bar{U}_H + \bar{I}_H Z_H$, но в относительных единицах. При этом вектор напряжения $\bar{U}$ совмещается с осью ординат, а вектор тока $\bar{I}_a$ отстает от напряжения на угол φ .

Затем находят МДС возбуждения (или ток возбуждения), исходя из следующих соображений:

а) для создания $\bar{E}_\delta$ при номинальном токе необходим ток возбуждения $\bar{I}_{b0}$, который определяется по характеристике холостого хода;

б) МДС реакции якоря совпадает по фазе с током, а величина этой МДС может быть найдена по величине тока и характеристике короткого замыкания:

$$i_{ba} = i_{bk} - i_{bs},$$

где i_{bk} - ток возбуждения, необходимый для получения номинального тока при трехфазном коротком замыкании, о.е.;

i_{bs} - ток возбуждения, необходимый для создания ЭДС, компенсирующей ЭДС рассеяния, о.е.;

i_{ba} - ток возбуждения, необходимый для компенсации намагничивающего действия реакции якоря, о.е.;

в) результирующий ток возбуждения равен геометрической сумме тока возбуждения, необходимого для создания ЭДС и тока возбуждения, необходимого для компенсации реакции якоря:

$$\bar{I}_{bH} = \bar{I}_{b0} + \bar{I}_{ba}.$$

Вектор $\bar{I}_{ba}$ откладывают под углом γ к оси ординат. Если ток нагрузки уменьшится до нуля, то напряжение на зажимах генератора увеличится до значения e'_0 .

Изменение напряжения

$$\Delta U \% = \frac{e'_0 - U_n}{U_n} \cdot 100$$

2. К построению регулировочных характеристик.

Регулировочная характеристика $i_b = f(i)$ показывает, как должен изменяться ток возбуждения, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным при изменении тока нагрузки от нуля до номинального. При этом $n = \text{const}$.

В данной задаче необходимо построить регулировочную характеристику при $U = U_n = \text{const}$ и $\cos \varphi_n = 0.8 = \text{const}$.

Построение регулировочной характеристики при $U = U_n = \text{const}$ производится следующим образом (рисунок 12):

- а) первая точка характеристики для $i = 0$ - находится по характеристике холостого хода и номинальному напряжению U_H ;
 необходимый ток возбуждения равен $i_{в1}$.
 б) при токе нагрузки $i = 0.5i_H$ необходимый ток возбуждения равен $i_{в2}$.
 в) при токе нагрузки $i = i_H$ необходимый ток возбуждения равен $i_{в3}$.

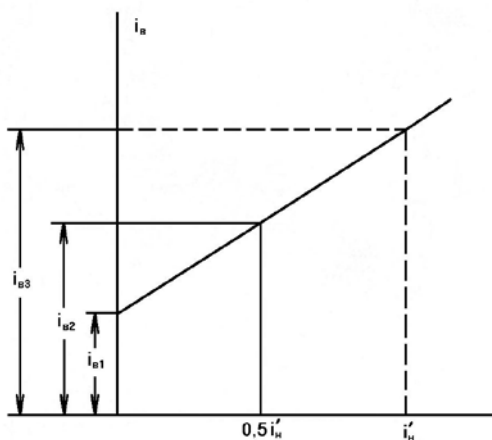


Рисунок 12 - Регулировочная характеристика синхронного генератора

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учеб. для вузов по спец. «Электромеханика»/О.Д. Гольдберг. – М.: Высш. шк., 1990. – 255 с.
2. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин/О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко; Под ред. Гольдберга О.Д. – М.: Высш. шк., 2001. – 431 с.
3. Иванов - Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов/ А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 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: Учебник 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. – 327 с.
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. Гольдберг, О. Б. Буль, И.С. Свириденко, С.П. Хелемская; Под ред. Гольдберга О.Д. – М.: Высш. шк., 2001. – 512 с.
9. Постников И. М. Проектирование электрических машин/И.М.Постников.– К.: Государственное издательство технической литературы УССР, 1960.- 910 с.
10. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов/ И.П. Копылов, Ф.А.Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П.Копылова. - М.: Энергия, 1980. - 496 с.

Формирование компетенции по ПДНВ и критерии оценки

Функция: Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления на уровне эксплуатации			
Сфера компетентности	Соответствие кодексу ПДНВ	Методы демонстрации компетентности	Критерии для оценки компетентности
Знание электротехнологии и теории электрических машин	Оценка результатов подготовки, полученная в форме одобренного опыта работы	Защита отчета по расчетно-графическому заданию и оценка результатов подготовки, полученной в одной или нескольких из следующих форм: 1) одобренный опыт работы 2) одобренная подготовка на тренажере, где это применимо	Режимы и рабочие характеристики электрических машин соответствуют техническим спецификациям

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания

к практическим занятиям по дисциплине

«Судовые электрические машины»

для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового

электрооборудования и средств автоматики»

и по дисциплине «Электрические машины» для бакалавров направления

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

(профиль подготовки «Электрооборудование и автоматика судов»)

очной и заочной форм обучения

Составитель: **Высоцкий** Виталий Евгеньевич

В авторской редакции

Изд. № 31/2020. Объем 3 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»