

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра автоматизированного электропривода и электромеханики

А.С. Падеев, С.В. Митрофанов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

УДК 621.313(076.5)

ББК 31.261я7

П 12

Рецензент – доцент, кандидат технических наук Э.Л. Греков

П 12 **Падеев, А.С.**
Электрические машины: методические указания/ А.С. Падеев, С.В. Митрофанов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 41 с.

Методические указания предназначены для выполнения контрольной работы по курсу “Электрические машины” студентами по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника заочной формы обучения.

УДК 621.313(076.5)

ББК 31.261я7

© Падеев А.С.,
Митрофанов С.В., 2015
© ОГУ, 2015

Содержание

	Введение.....	4
1	Трёхфазные трансформаторы.....	5
1.1	Задание № 1.....	5
1.2	Методические указания к выполнению задания № 1.....	5
2	Трёхфазные асинхронные двигатели.....	15
2.1	Задание № 2.....	15
2.2	Методические указания к выполнению задания № 2.....	15
2.3	Задание № 3.....	19
2.4	Методические указания к выполнению задания № 3.....	21
3	Машины постоянного тока.....	25
3.1	Задание № 4.....	25
3.2	Методические указания к выполнению задания № 4.....	29
	Список использованных источников.....	41

Введение

Контрольная работа имеет цель оказать помощь студентам в изучении и закреплении учебного материала по курсу “Электрические машины”. Работа содержит одну задачу по трансформаторам, две задачи по асинхронным машинам и одну задачу по машинам постоянного тока.

К выполнению контрольной работы следует приступать после проработки соответствующего раздела курса по рекомендованным учебникам и лекционному материалу.

При выполнении контрольной работы необходимо применять стандартные условные обозначения электрических величин и единиц их измерения.

Пояснительная записка должна соответствовать требованиям СТО 02069024.101 – 2014 и является основой для защиты контрольной работы. Она должна отражать все основные этапы работы и все существенные результаты, полученные при выполнении задания. Ориентировочный объем пояснительной записки: 20 – 25 страниц текста, написанного от руки или набранного на компьютере на одной стороне листа формата А4. Листы должны иметь рамку, согласно стандарту, быть пронумерованы. Пояснительная записка должна быть сброшюрована.

Пояснительная записка должна содержать:

- а) титульный лист по принятому стандарту;
- б) оглавление с разметкой по страницам;
- в) задание с исходными данными;
- г) текстовую часть, состоящую из теоретического решения заданного варианта задания;
- д) список использованных источников.

Характеристики строятся исключительно на миллиметровой бумаге. На графиках оси абсцисс и ординат должны быть в соответствии со стандартом. Чертежи и рисунки должны иметь сквозную нумерацию и приводятся на листах формата А4.

1 Трехфазные трансформаторы

1.1 Задание № 1

Для трехфазного трансформатора необходимо:

1.1.1 Определить номинальные линейные, фазные токи и напряжения обмоток высокого и низкого напряжения.

1.1.2 Определить параметры электрической схемы замещения. Изобразить T – образную электрическую схему замещения в режиме нагрузки и указать величину параметров.

1.1.3 Рассчитать и построить зависимость КПД от нагрузки. Определить величину максимального КПД.

1.1.4 Определить изменение вторичного напряжения при нагрузке аналитическим методом. Построить внешнюю характеристику трансформатора.

Исходные данные приведены в таблице 1.

1.2 Методические указания к заданию 1

1.2.1 Расчет основных электрических величин трансформатора

Номинальные линейные токи обмоток ВН ($I_{1л}$) и НН ($I_{2л}$) трехфазного трансформатора определяются выражением:

$$I_{1,2л} = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1,2н}},$$

где S_n – номинальная полная мощность трансформатора, кВ·А;

$U_{1,2н}$ – номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки, В.

Таблица 1 – Исходные данные к заданию № 1

Наименование величины	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Номинальная мощность S_n , кВ·А	25	25	25	25	40	40	40	40
Номинальное напряжение обмотки ВН U_{1n} , кВ	6	6	10	10	6	6	10	10
Номинальное напряжение обмотки НН U_{2n} , кВ	0,23	0,23	0,4	0,4	0,4	0,4	0,69	0,69
Напряжение короткого замыкания, u_k , %	4,5	4,5	4,7	4,7	4,5	4,5	4,7	4,7
Ток холостого хода i_0 , %	3,2	3,2	3,2	3,2	3,0	3,0	3,0	3,0
Мощность короткого замыкания P_k , кВт	0,6	0,6	0,65	0,65	0,88	0,88	1,0	1,0
Мощность холостого хода P_0 , кВт	0,12	0,12	0,13	0,13	0,15	0,15	0,18	0,18
Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,83	0,83	0,82	0,82
Схема и группа соединения	Y-Δ -11	Y/Y -0	Y-Δ -11	Y/Y -0	Y-Δ -11	Y/Y -0	Y-Δ -11	Y/Y -0

Продолжение таблицы 1

Наименование величины	Номер варианта							
	9	10	11	12	13	14	15	16
Номинальная мощность S_n , кВ·А	63	63	63	63	100	100	100	100
Номинальное напряжение обмотки ВН U_{1n} , кВ	6	6	10	10	6	6	10	10
Номинальное напряжение обмотки НН U_{2n} , кВ	0,4	0,4	0,69	0,69	0,4	0,4	0,69	0,69
Напряжение короткого замыкания, u_k , %	4,5	4,5	4,7	4,7	4,5	4,5	4,7	4,7
Ток холостого хода i_0 , %	2,8	2,8	2,8	2,8	2,6	2,6	2,6	2,6
Мощность короткого замыкания P_k , кВт	1,25	1,25	1,47	1,47	1,9	1,9	2,3	2,3
Мощность холостого хода P_0 , кВт	0,24	0,24	0,24	0,24	0,33	0,33	0,33	0,33
Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,83	0,83	0,82	0,82
Схема и группа соединения	Y-Δ -11	Y/Y -0	Y-Δ -11	Y/Y -0	Y-Δ -11	Y/Y -0	Y-Δ -11	Y/Y -0

Продолжение таблицы 1

Наименование величины	Номер варианта							
	17	18	19	20	21	22	23	24
Номинальная мощность S_n , кВ·А	100	100	160	160	160	160	160	160
Номинальное напряжение обмотки ВН U_{1n} , кВ	35	35	6	6	10	10	35	35
Номинальное напряжение обмотки НН U_{2n} , кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,69	0,69	0,69	0,69
Напряжение короткого замыкания, u_k , %	6,5	6,5	4,5	4,5	4,7	4,7	6,5	6,5
Ток холостого хода i_0 , %	2,6	2,6	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Мощность короткого замыкания P_k , кВт	1,97	1,97	2,65	2,65	3,1	3,1	2,8	2,8
Мощность холостого хода P_0 , кВт	0,42	0,42	0,51	0,51	0,62	0,62	0,62	0,62
Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$	0,81	0,81	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83
Схема и группа соединения	Y-Δ -11	Y/Y -0	Y-Δ -11	Y/Y -0	Y-Δ -11	Y/Y -0	Y-Δ -11	Y/Y -0

Соотношение фазных и линейных токов и напряжений зависит от схемы соединения обмотки.

Схемы соединения обмоток приведены в задании в виде дроби: в числителе – схема соединения обмотки ВН, а в знаменателе – НН.

При определении фазных величин обмоток ВН и НН следует выбирать соотношения, соответствующие схемам соединения обмоток в задании.

Фазное напряжение обмотки трехфазного трансформатора:

а) при соединении в звезду:

$$U_{1,2\phi} = \frac{U_{1,2H}}{\sqrt{3}};$$

б) при соединении в треугольник:

$$U_{1,2\phi} = U_{1,2H},$$

Фазный ток обмотки трехфазного трансформатора:

а) при соединении в звезду:

$$I_{1,2\phi} = I_{1,2л};$$

б) при соединении в треугольник:

$$I_{1,2\phi} = \frac{I_{1,2л}}{\sqrt{3}},$$

1.2.2 Расчет параметров электрической схемы замещения

Параметры намагничивающей ветви электрической схемы замещения рассчитываются по данным холостого хода:

$$Z_m \approx Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{10}};$$

$$R_m \approx R_0 = \frac{P_0}{m \cdot I_{10}^2};$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2},$$

где $U_{1\phi}$ – номинальное фазное напряжение обмотки ВН, В;

I_{10} – ток холостого хода обмотки ВН, А;

P_0 – мощность холостого хода, Вт;

m – число фаз.

Величина тока холостого хода I_{10} определяется выражением:

$$I_{10} = 0,01 \cdot I_{1\phi} \cdot i_0 \%,$$

где $I_{1\phi}$ – номинальный фазный ток обмотки ВН, А;

$i_0\%$ – ток холостого хода, % (см. задание).

По данным короткого замыкания трансформатора рассчитываются параметры короткого замыкания, Ом:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1H}},$$

$$R_k = \frac{P_k}{m \cdot I_{1H}^2},$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$$

где U_k – фазное напряжение обмотки ВН в опыте короткого замыкания при номинальном токе, В;

$I_{1н}$ – фазный номинальный ток обмотки ВН, А;

P_k – мощность короткого замыкания, Вт.

Фазное напряжение короткого замыкания при номинальном токе:

$$U_k = 0,01 \cdot U_{1н} \cdot u_k \text{ \%}.$$

Параметры обмоток для приведенного трансформатора можно принять равными:

$$R_1 \approx R_2' \approx \frac{R_k}{2};$$

$$X_1 \approx X_2' \approx \frac{X_k}{2}.$$

Сопротивления реальных (не приведенных) вторичных обмоток:

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2};$$

$$X_2 = \frac{X_2'}{k^2},$$

где k – коэффициент трансформации.

Величина коэффициента трансформации определяется соотношением номинальных фазных напряжений обмоток ВН и НН:

$$k = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}.$$

1.2.3 Расчет коэффициента полезного действия

Рассчитать и построить зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(k_{нз})$:

$$\eta\% = \left(\frac{k_{i\bar{a}} \cdot S_i \cdot \cos \varphi_2}{k_{i\bar{a}} \cdot S_i \cdot \cos \varphi_2 + \Delta P_{i\bar{a}\bar{a}} + \Delta P_{y\bar{e}}} \right) \cdot 100\%,$$

где S_n – номинальная полная мощность трансформатора, кВ·А;

$k_{нз}$ – коэффициент нагрузки трансформатора, при расчете принять равным: 0; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0; 1,2;

$\Delta P_{маг}$ – потери в стали магнитопровода трансформатора, кВт;

$\Delta P_{эл}$ – электрические потери в обмотках трансформатора, кВт.

Потери в стали магнитопровода трансформатора является постоянными и не зависят от нагрузки. Можно принять, что их величина равна мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе и номинальном первичном напряжении, т.е.:

$$\Delta P_{маг} \approx P_0.$$

Электрические потери в обмотках являются переменными потерями и зависят от коэффициента нагрузки. Величину электрических потерь в обмотках при различных нагрузках определяют по формуле:

$$\Delta P_{эл} = k_{нз}^2 \cdot P_k.$$

Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному КПД:

$$k_{нзкр} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}},$$

По величине $k_{нзкр}$ по приведенной выше формуле находят величину максимального КПД.

1.2.4 Определение изменения напряжения вторичной обмотки при нагрузке трансформатора

Величина изменения вторичной обмотки трансформатора при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки определяется выражением:

$$\Delta U \% \approx k_{i\bar{a}} \cdot (u_{ka} \% \cdot \cos \varphi_2 + u_{kp} \% \cdot \sin \varphi_2),$$

где u_{ka} – активная составляющая напряжения короткого замыкания, %;

u_{kp} – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %;

$$u_{ka} \% = \frac{I_{1\phi} \cdot R_k}{U_{1\phi}} \cdot 100\% ;$$

$$u_{kp} \% = \frac{I_{1\phi} \cdot X_k}{U_{1\phi}} \cdot 100\% ,$$

где $U_{1\phi}$ – фазное номинальное напряжение обмотки ВН, В.

$I_{1\phi}$ – фазный номинальный ток обмотки ВН, А;

R_k – активная составляющая сопротивления короткого замыкания, Ом;

X_k – реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания, Ом.

Для контроля правильности расчета вычислить напряжение короткого замыкания по формуле:

$$u_k \% = \sqrt{(u_{ka} \%)^2 + (u_{kp} \%)^2}.$$

Полученное значение $u_k\%$ сравнить с величиной напряжения короткого замыкания, данной в задании.

Используя полученную величину $\Delta U\%$ для режима номинальной нагрузки, рассчитать и построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(k_{н2})$, где:

$$U_2 = U_{2н} \cdot (1 - 0,01 \cdot \Delta U\%).$$

Значениями $k_{н2}$ задаваться такими же, что и для построения характеристики $\eta = f(k_{н2})$.

2 Трехфазные асинхронные двигатели

2.1 Задание № 2

По исходным данным трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора с укороченным шагом необходимо:

2.1.1 Вычислить параметры обмотки;

2.1.2 Начертить развернутую схему, указать расположение полюсов;

2.1.3 Начертить условную схему соединения параллельных ветвей обмотки.

Исходные данные приведены в таблице 2.

2.2 Методические указания к выполнению задания № 2

Двухслойные петлевые обмотки применяются практически во всех машинах переменного тока, начиная с машин мощностью 15 – 16 кВт и выше. Основным достоинством двухслойных обмоток является возможность использовать укорочение шага для подавления высших гармоник в кривой ЭДС, при одновременной экономии медного провода, за счет уменьшения длины лобовых частей катушек.

При укладке обмотки в пазы сердечника статора необходимо определить ряд параметров. Диаметральный шаг обмотки:

$$y_d = \frac{Z_1}{2p}.$$

Таблица 2 – Данные для двухслойной обмотки статора

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число пазов статора, Z_1	30	30	36	36	36	36	36	36	36	36	36	42
Число полюсов, $2p$	2	4	2	2	4	4	4	6	6	6	6	2
Число параллельных ветвей, a_1	1	2	1	2	1	2	4	1	2	3	6	1

Продолжение таблицы 2

Номер варианта	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Число пазов статора, Z_1	42	48	48	48	48	48	54	54	54	54	48	48
Число полюсов, $2p$	2	2	2	4	4	4	6	6	6	6	8	8
Число параллельных ветвей, a_1	2	1	2	1	2	4	1	2	3	6	1	2

Двухслойные обмотки статора выполняют с укороченным шагом. Шаг обмотки по пазам:

$$y_1 = y_d \beta,$$

где β – относительный шаг обмотки.

В асинхронных двигателях с $2p = 2$ $\beta = 0.58 - 0.63$, в остальных случаях $\beta = 0.8 - 0.86$.

Полюсное деление обмотки:

$$\tau = \frac{Z_1}{2p}.$$

Число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm}.$$

В качестве примера рассмотрим построение схемы обмотки статора трехфазной машины при $Z_1 = 24$, $2p = 4$, $a_1 = 2$, $y_d = \tau = 6$, $y_1 = 5$, $q_1 = 2$. На рисунке 1 изображены 24 пары линий (сплошные и пунктирные), обозначающие верхние и нижние стороны катушек, лежащие в пазах, разделенные на четыре полюсных деления.

На полюсном делении на каждую фазу приходится по два паза, т.к. $q_1 = 2$. Лобовые части соединяют стороны катушек, лежащие на расстоянии шага обмотки $y_1 = 5$. На рисунке 2.1 показано построение фазы А обмотки статора. Построение для удобства рекомендуется начинать с первого паза. Каждой фазе будет принадлежать $2p$ катушечных групп. Каждая новая катушечная группа начинается на расстоянии τ от начала предыдущей.

Обмотка остальных фаз строится аналогично. Начала С2 и С3 берутся последовательно через $2q_1$ пазовых деления по отношению к началу фазы С1, т.е. через число пазов, соответствующих 120° .

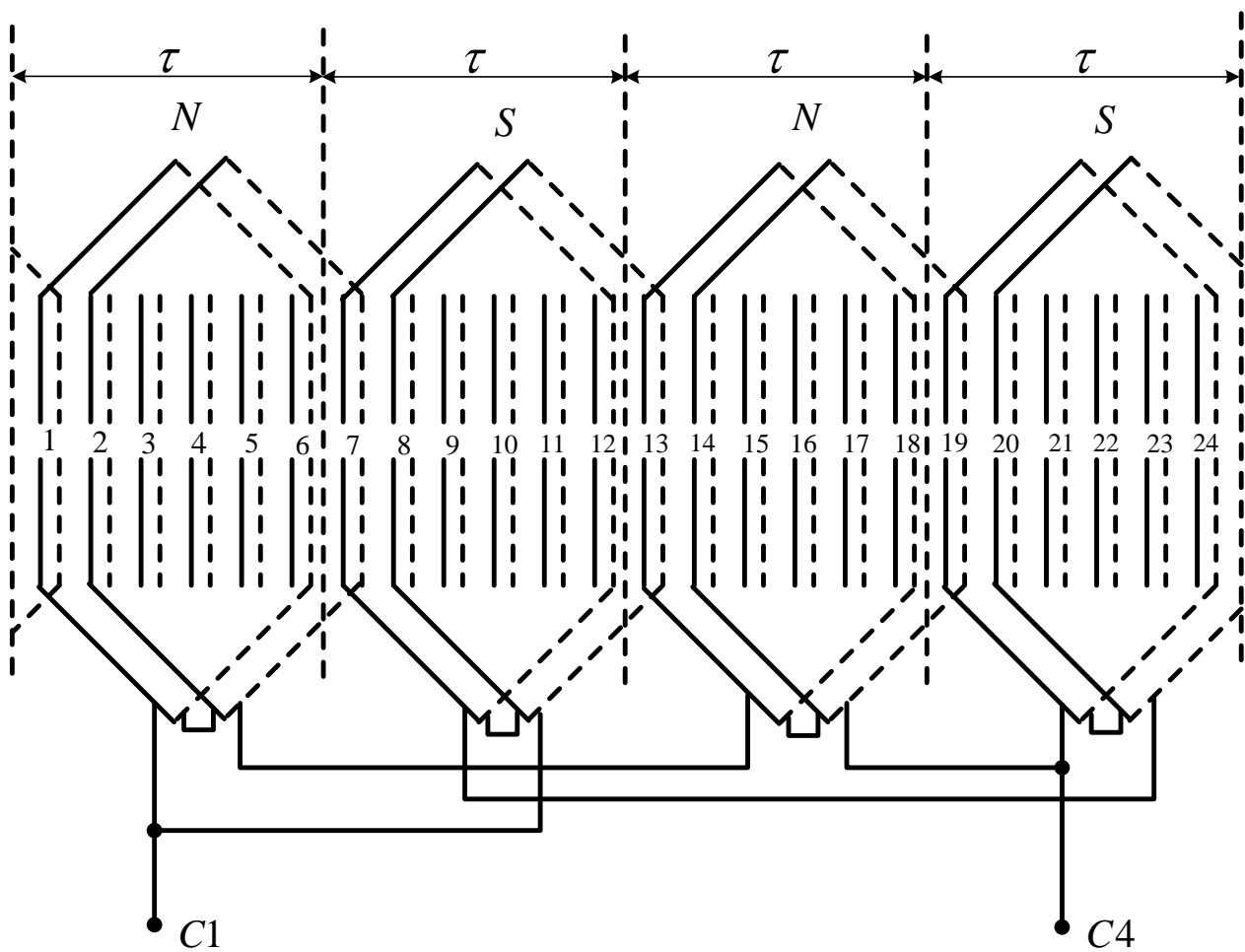


Рисунок 2.1 – Построение фазы А двухслойной обмотки

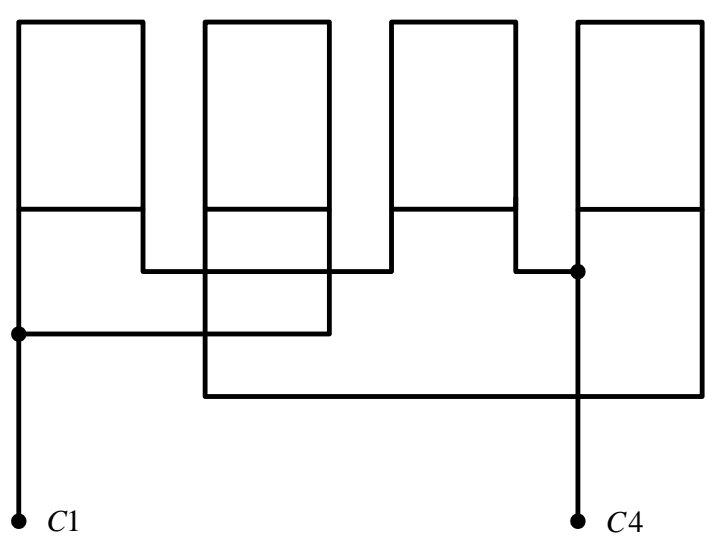


Рисунок 2.2 – Схема соединения фазы А обмотки с двумя параллельными ветвями

2.3 Задание № 3

По заданным параметрам трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором необходимо:

2.3.1 Рассчитать и построить механическую характеристику $M_{y\dot{i}} = f(s)$ в пределах изменения скольжения от -0,5 до 1,5;

2.3.2 По механической характеристике определить величины пускового, максимального и номинального электромагнитного момента;

2.3.3 Определить величину добавочного сопротивления цепи ротора, при котором обеспечивается максимум пускового момента при скольжениях $s = 0,6; 0,8; 1,0$.

Исходные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные асинхронных двигателей

Наименование величины	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
P_2 , кВт	11	14	18,5	22	30	37	45	55
$2p$	4	4	4	4	4	4	4	4
η (КПД), %	86,5	88,5	89	90	90,5	90	91	90,5
$\cos \varphi$, о.е.	0,86	0,87	0,88	0,87	0,87	0,87	0,86	0,9
$n_{\dot{m}}$, об/мин	1434	1444	1456	1462	1462	1447	1455	1466
R'_1 , о.е.	0,038	0,032	0,022	0,024	0,026	0,023	0,02	0,017
X'_1 , о.е.	0,068	0,06	0,042	0,05	0,057	0,061	0,067	0,061
R''_2 , о.е.	0,051	0,042	0,034	0,026	0,03	0,027	0,03	0,025
X''_2 , о.е.	0,086	0,078	0,063	0,075	0,087	0,059	0,08	0,073
i_o , о.е.	0,35	0,33	0,3	0,3	0,25	0,24	0,22	0,2

Продолжение таблицы 3

Наименование величины	Номер варианта							
	9	10	11	12	13	14	15	16
P_2 , кВт	71	7,5	10	13	18,5	22	30	37
$2p$	4	6	6	6	6	6	6	6
η (КПД), %	91,5	82,5	84,5	85,5	88	88	89	89
$\cos \varphi$, о.е.	0,86	0,77	0,76	0,8	0,81	0,8	0,85	0,84
$n_{\text{ш}}$, об/мин	1462	949	957	956	965	965	965	965
R'_1 , о.е.	0,015	0,054	0,043	0,035	0,03	0,032	0,029	0,026
X'_1 , о.е.	0,053	0,079	0,071	0,065	0,06	0,066	0,073	0,063
R''_2 , о.е.	0,021	0,068	0,058	0,057	0,038	0,041	0,03	0,024
X''_2 , о.е.	0,064	0,12	0,13	0,11	0,078	0,089	0,091	0,078
i_o , о.е.	0,19	0,4	0,37	0,36	0,34	0,31	0,28	0,24

Продолжение таблицы 3

Наименование величины	Номер варианта							
	17	18	19	20	21	22	23	24
P_2 , кВт	45	5,5	7,1	11	15	18,5	22	30
$2p$	6	8	8	8	8	8	8	8
η (КПД), %	90,5	80	82	82,5	87	88	88,5	90,5
$\cos \varphi$, о.е.	0,87	0,7	0,7	0,72	0,82	0,84	0,84	0,81
$n_{\text{ш}}$, об/мин	975	702	709	717	718	719	720	710
R'_1 , о.е.	0,029	0,06	0,053	0,041	0,064	0,067	0,062	0,045
X'_1 , о.е.	0,062	0,112	0,11	0,086	0,13	0,13	0,14	0,12
R''_2 , о.е.	0,024	0,094	0,079	0,062	0,03	0,026	0,029	0,022
X''_2 , о.е.	0,092	0,175	0,208	0,167	0,17	0,18	0,18	0,17
i_o , о.е.	0,22	0,42	0,4	0,36	0,33	0,31	0,3	0,24

Номинальное фазное напряжение двигателей $U_{\delta.í.} = 220$ В, частота питающей сети $f = 50$ Гц.

2.4 Методические указания к выполнению задания № 3

Параметры асинхронного двигателя, заданные в относительных единицах, необходимо перевести в абсолютные:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R'_1 \cdot Z_{\acute{a}} \\ X_1 &= X'_1 \cdot Z_{\acute{a}} \\ R'_2 &= R''_2 \cdot Z_{\acute{a}} \\ X'_2 &= X''_2 \cdot Z_{\acute{a}} \end{aligned} \right\}.$$

За базисное сопротивление принимают отношение номинального фазного напряжения к номинальному фазному току:

$$Z_{\acute{a}} = \frac{U_{\delta.í.}}{I_{\delta.í.}}.$$

Номинальный фазный ток обмотки статора:

$$I_{\delta.í.} = \frac{P_2}{m U_{\delta.í.} \eta \cos \varphi}.$$

Ток холостого хода в абсолютных единицах:

$$I_o = i_o I_{\delta.í.}.$$

Полное сопротивление взаимной индукции:

$$Z_{12} = \frac{U_{\delta.i.}}{I_o}$$

Полное сопротивление обмотки статора:

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$$

Коэффициент c_1 :

$$c_1 = \frac{Z_1 + Z_{12}}{Z_{12}}$$

Электромагнитный момент создается в результате взаимодействия проводников обмотки ротора с током I_2 и вращающегося магнитного поля основной гармоники статора. С учетом ряда допущений момент можно вычислить:

$$M_{y\hat{i}} = \frac{p m U_{\delta.i.}^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f \left[\left(R_1 + c_1 \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + c_1 X'_2)^2 \right]}$$

Задаваясь скольжениями -0,5; -0,4; -0,3 и так далее до 1,5, рассчитывается и строится на графике зависимость $M_{y\hat{i}} = f(s)$. По построенной зависимости определяются пусковой ($s = 1$), номинальный ($s = s_i$) и максимальный ($s = s_{\hat{\delta}}$) вращающие моменты. Номинальное скольжение электродвигателя:

$$s_f = \frac{n_c - n_f}{n_c}.$$

Синхронная скорость вращения:

$$n_c = \frac{60 \cdot f}{p}.$$

При введении в цепь фазного ротора добавочного активного сопротивления максимум вращающего не изменяется, но критическое скольжение увеличивается (рисунок 2.3). Кривая 1 получается при $R_{\dot{A}1} = 0$ и соответствует естественной механической характеристике. Кривая 3 соответствует такому значению $R_{\dot{A}3}$, при котором максимум момента достигается в начальный момент пуска двигателя в ход. Кривая 2 соответствует сопротивлению $R_{\dot{A}2} < R_{\dot{A}3}$. При введении $R_{\dot{A}}$ в цепь ротора кроме увеличения пускового момента, также достигается уменьшение потребляемого пускового тока.

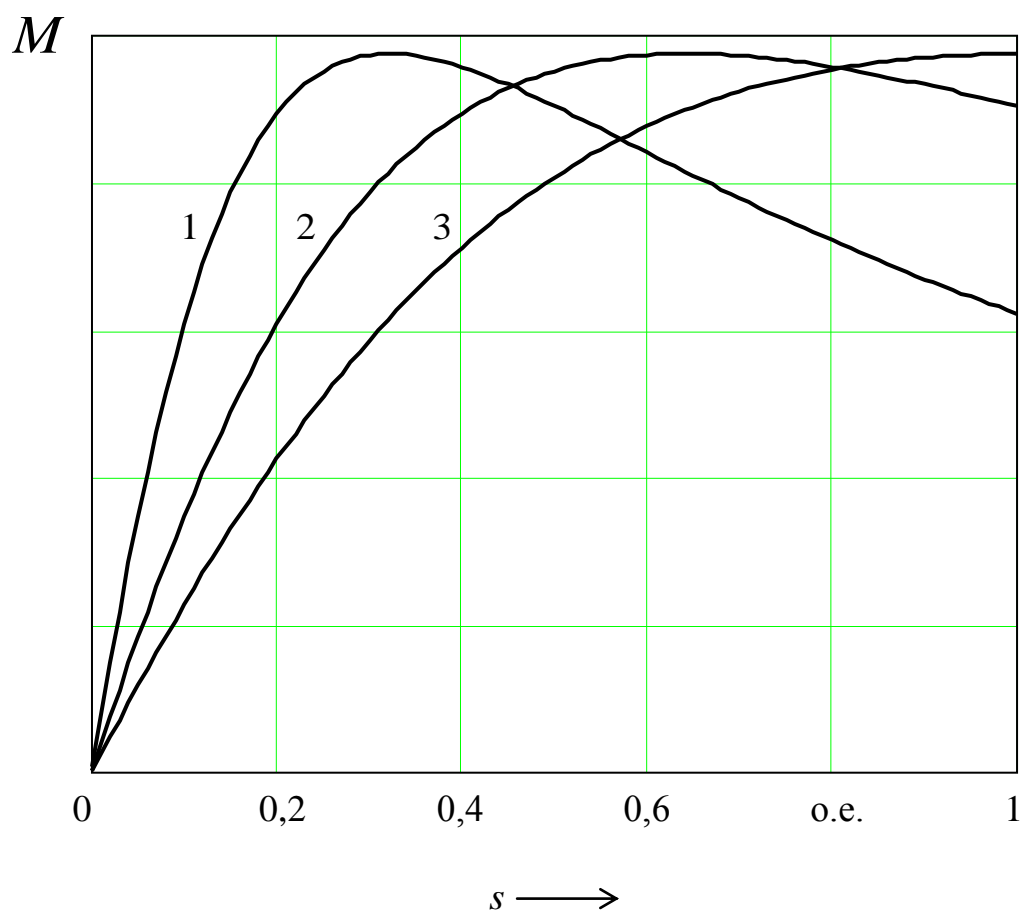


Рисунок 2.3 – Кривые $M = f(s)$ при различных значениях добавочного сопротивления в цепи ротора

3 Машины постоянного тока

3.1 Задание № 4

Для четырехполюсного генератора постоянного тока параллельного возбуждения необходимо:

3.1.1 Начертить эскиз магнитной цепи (для одной пары полюсов).

3.1.2 Рассчитать магнитную цепь, построить характеристику холостого хода и определить коэффициент насыщения магнитной цепи машины.

Сердечники главных полюсов выполнены из электротехнической стали марки 3411, сердечник якоря выполнен из электротехнической стали марки 2312 при толщине листов 0,35 мм и коэффициенте заполнения 0,93. Материал станины – стальное литье. Число главных полюсов $2p = 4$.

Пазы якоря – открытые прямые (с параллельными стенками). Вентиляционные каналы в сердечнике якоря отсутствуют. Данные, необходимые для расчета генератора, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные к заданию № 4

Наименование величин	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Номинальная мощность P_n , кВт	6,2	27	50	11	9	16	35	70
Номинальное напряжение U_n , В	115	230	230	115	115	230	230	230
Воздушный зазор δ , мм	1,5	2,2	2,5	1,5	1,8	2,0	2,5	2,2
Диаметр якоря D_a , мм	162	245	294	162	195	210	294	245
Длина якоря l_a , мм	95	175	187	140	135	173	145	234
Число пазов Z	29	31	37	27	29	31	35	35
Высота зубцов h_z , мм	25	32	36	25	25	26	32	32
Ширина паза b_n , мм	6,5	7,5	8	6,5	7,5	7,5	9	6,5
Высота спинки якоря h_a , мм	20	40	52	22	30	32	52	40
Высота полюса h_m , мм	52	75	85	52	60	70	88	75
Длина сердечника полюса l_m , мм	90	170	180	135	130	170	140	225
Высота станины h_s , мм	15	32	40	16	22	25	33	32
Длина станины l_s , мм	180	250	270	220	200	250	250	330
Расчетный коэффициент полюсной дуги α	0,65	0,69	0,71	0,66	0,66	0,67	0,7	0,72
Коэффициент магнитного рассеяния σ	1,12	1,17	1,19	1,13	1,14	1,15	1,18	1,2

Продолжение таблицы 4

Наименование величин	Номер варианта							
	9	10	11	12	13	14	15	16
Номинальная мощность P_n , кВт	6,5	21	4	5,5	7,5	15	22	30
Номинальное напряжение U_n , В	115	230	115	115	230	230	400	400
Воздушный зазор δ , мм	1,5	2,2	0,5	0,6	0,8	1,2	1,5	1,7
Диаметр якоря D_a , мм	162	245	125	137	148	171	191	210
Длина якоря l_a , мм	165	135	115	115	155	145	200	215
Число пазов Z	29	31	27	27	25	29	31	31
Высота зубцов h_z , мм	23	28	16	18	21	22	25	26
Ширина паза b_n , мм	6,5	9	6,1	6,3	7,2	6,8	7,5	8
Высота спинки якоря h_a , мм	22	40	15	16	22	25	29	37
Высота полюса h_m , мм	50	77	40	52	55	75	77	80
Длина сердечника полюса l_m , мм	160	130	120	130	155	170	185	200
Высота станины h_s , мм	18	26	10	12	14	20	20	24
Длина станины l_s , мм	240	230	150	160	180	200	245	250
Расчетный коэффициент полюсной дуги α	0,66	0,66	0,69	0,69	0,7	0,68	0,65	0,71
Коэффициент магнитного рассеяния σ	1,13	1,16	1,11	1,17	1,15	1,14	1,18	1,2

Продолжение таблицы 4

Наименование величин	Номер варианта							
	17	18	19	20	21	22	23	24
Номинальная мощность P_n , кВт	3	25	8	5,5	7	12	23	40
Номинальное напряжение U_n , В	130	400	130	130	230	400	600	600
Воздушный зазор δ , мм	0,5	1,5	0,7	0,6	0,65	0,8	1,3	2,2
Диаметр якоря D_a , мм	110	230	180	125	160	200	220	280
Длина якоря l_a , мм	120	200	130	115	125	160	180	250
Число пазов Z	29	31	31	27	37	37	29	31
Высота зубцов h_z , мм	12	25	18	14	13	16	22	27
Ширина паза b_n , мм	5,6	9,4	7,8	6,6	6,9	7,8	9,9	10,4
Высота спинки якоря h_a , мм	13,5	19,4	12,2	10,7	14,2	15,6	18,1	25,5
Высота полюса h_m , мм	40	74	50	42	48	55	70	85
Длина сердечника полюса l_m , мм	120	180	125	110	115	160	170	265
Высота станины h_s , мм	6	15	8	7	7	12	16	22
Длина станины l_s , мм	140	220	160	150	145	185	210	290
Расчетный коэффициент полюсной дуги α	0,65	0,69	0,71	0,66	0,66	0,67	0,7	0,72
Коэффициент магнитного рассеяния σ	1,12	1,17	1,19	1,13	1,14	1,15	1,18	1,2

3.2 Методические указания к выполнению задания № 4

Магнитная цепь машины постоянного тока представляет собой разветвленную симметричную цепь, поэтому её расчет следует вести для одной пары полюсов, выделив следующие однородные последовательно соединенные участки:

а) полюс (сердечник с наконечником) с длиной средней линии магнитного потока h_m ;

б) воздушный зазор δ ;

в) зубцовая зона h_z ;

г) сердечник (спинка) якоря L_a ;

д) ярмо L_s .

Эскиз магнитной цепи генератора постоянного тока для одной пары полюсов следует начертить на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1 или 1:2, указать размеры, приведенные в таблице 4, границы участков магнитной цепи и среднюю магнитную линию.

Расчет магнитной цепи генератора сначала необходимо выполнить для номинального значения индукции воздушного зазора $B_{\delta i}$.

Так как расчет магнитной цепи является поверочным (размеры машины заданы), то номинальное значение магнитной индукции определяется как функция диаметра якоря из графика $B_{\delta i} = f(D_a)$ на рисунке 3.1.

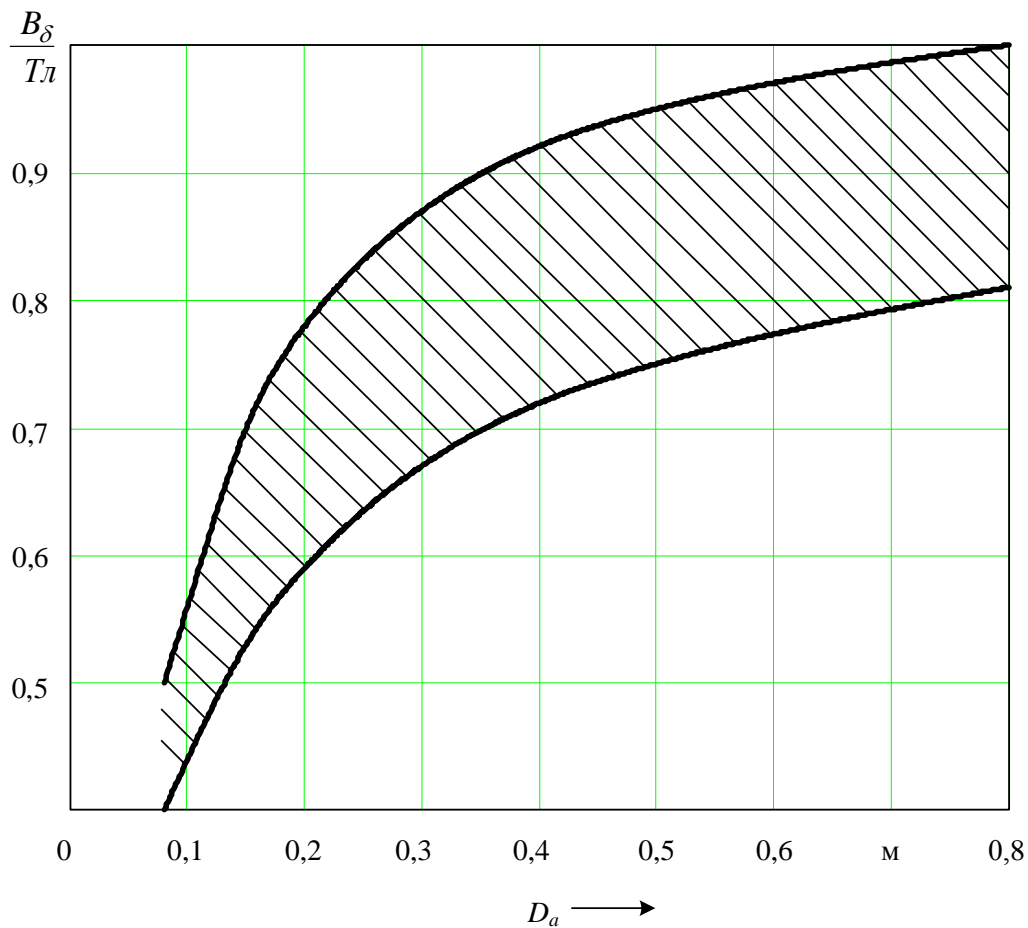


Рисунок 3.1 – Зависимость индукции в воздушном зазоре от диаметра якоря

Затем следует вычислить следующие величины:

а) полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p};$$

б) расчетную полюсную дугу:

$$b = \alpha \cdot \tau;$$

где α – расчетный коэффициент полюсной дуги.

в) расчетную длину якоря:

$$l_{\delta} = (l_a + l_m) / 2;$$

г) магнитный поток в воздушном зазоре:

$$\Phi_0 = B_{\delta} \cdot b \cdot l_{\delta};$$

д) магнитный поток в сердечниках главных полюсов:

$$\Phi_m = \sigma \cdot \Phi_0,$$

где σ – коэффициент магнитного рассеяния.

Целью расчета магнитной цепи является определение магнитодвижущей силы (МДС), которая необходима для создания основного магнитного потока электрической машины.

Магнитодвижущую силу одной пары полюсов можно представить в виде суммы магнитных напряжений участков магнитной цепи:

$$F_0 = F_{\delta} + F_m + F_a + F_s + F_z.$$

Магнитное напряжение воздушного зазора машины постоянного тока F_{δ} является наибольшей из составляющих правой части выражения. С подсчета значения F_{δ} и следует начинать определение магнитных напряжений.

$$F_{\delta} = \frac{2 \cdot B_{\delta} \cdot \delta'}{\mu_0} \approx 0,16 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^7,$$

где B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл;

$\delta' = \delta \cdot k_\delta$ – приведенный воздушный зазор, м;

$k_\delta = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta}{b_{z1} + 10 \cdot \delta}$ – коэффициент воздушного зазора;

t_1 – зубцовый шаг по внешней цилиндрической поверхности сердечника якоря, м.

Зубцовый шаг определяется по формуле:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_a}{Z},$$

где D_a – диаметр якоря, м;

Z – число пазов якоря;

b_{z1} – ширина зубца по окружности якоря ($b_{z1} = t_1 - b_n$), м.

Магнитное напряжение зубцовой зоны F_z можно определить как:

$$F_z = 2 \cdot H_z \cdot h_z,$$

где H_z – расчетная напряженность магнитного поля зубцовой зоны, А;

h_z – высота зубца якоря (глубина паза), м.

В условии задания № 5 указаны пазы якоря с параллельными стенками, т.е. зубцы имеют переменную ширину и, следовательно, магнитную индукцию, изменяющуюся обратно пропорционально сечению зубца.

При этих условиях расчетную напряженность можно определить с достаточной точностью по трем значениям расчетной магнитной индукции: для верхнего сечения зубца B'_{z1} , нижнего B'_{z2} и среднего B'_{zcp} и соответствующим значениям напряженности – H_1 , H_2 , H_{cp} .

Расчетная магнитная индукция B'_{zx} для любого сечения зубца определяется по формуле:

$$B'_{zx} = B_{\delta} \cdot \frac{t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{zx} \cdot l_a \cdot k_c},$$

где l_{δ} – расчетная длина якоря;

l_a – длина пакета сердечника якоря;

b_{zx} – ширина зубца в соответствующем сечении;

k_c – коэффициент заполнения сердечника сталью.

Для определения b_{zx} - ширины зубца в соответствующем сечении необходимо рассчитать зубцовый шаг t_x рассматриваемого сечения:

а) верхнее сечение на поверхности якоря:

$$t_1 = \pi \cdot D_a / Z, \quad b_{z1} = t_1 - b_n;$$

б) нижнее сечение (у основания паза):

$$t_2 = \pi \cdot (D_a - 2 \cdot h_z) / Z, \quad b_{z2} = t_2 - b_n;$$

в) среднее сечение:

$$t_{cp} = 0,5 \cdot (t_1 + t_2); \quad b_{zcp} = t_{cp} - b_n.$$

При наибольшей магнитной индукции до 1,8 Тл (в наименьшем сечении зубца) весь магнитный поток, приходящийся на зубцовое деление, проходит практически по стали зубца. В этом случае расчетная магнитная индукция в

выбранных сечениях равна действительной и по таблице 5 можно определить соответствующие напряженности H_1 , H_2 и H_{cp} .

Таблица 5 – Основная кривая намагничивания. Сталь 2312

B , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H , А/м									
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1,0	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100
1,6	3400	3600	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6500	7100
1,7	7700	8200	8900	9400	10000	10600	11100	11700	12200	12800

Если же наибольшая магнитная индукция будет больше 1,9 Тл, то магнитная проводимость потока Φ_t пройдет через паз, что приведет к значительной разнице действительной B_{zx} и расчетной B'_{zx} магнитной индукции. В этом случае (когда $B'_{zx} > 1,9$ Тл) для более точного определения напряженности магнитного поля по расчетной индукции необходимо учесть коэффициент k_{nx} , который определяется по формуле (для сечения x):

$$k_{nx} = \frac{S_{nx}}{S_{zx}} = \frac{S_{tx} - S_{zx}}{S_{zx}} = \frac{t_x \cdot l_\delta}{b_{zx} \cdot l_a \cdot k_c} - 1,$$

где S_{tx}, S_{nx}, S_{zx} – соответственно площади зубцового деления, паза и зуба в любом сечении x по высоте зуба. Напряженности H_1, H_2 и H_{cp} можно определить по характеристикам намагничивания электротехнической стали 2312 $B'_{zx} = f(H)$ с учетом коэффициента k_{nx} , показанным на рисунке 3.2.

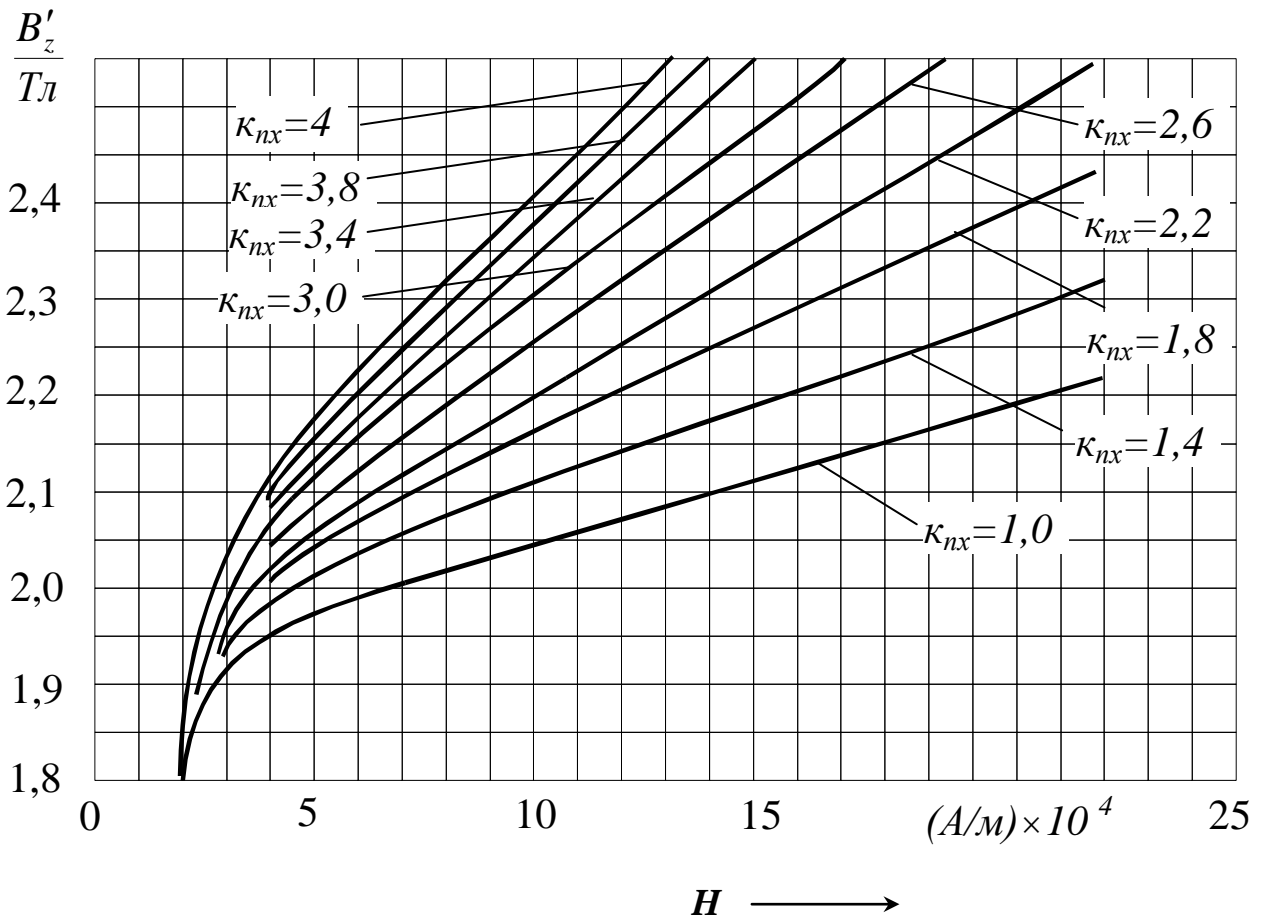


Рисунок 3.2 – Кривые намагничивания зубцов сердечника якоря. Сталь 2312

После определения напряженностей H_{z1}, H_{z2} и H_{zcp} следует найти расчетную напряженность зубцовой зоны:

$$H_z = 1/6 \cdot (H_1 + 4 \cdot H_{cp} + H_2).$$

Магнитное напряжение участка главных полюсов можно подсчитать по формуле:

$$F_m = 2 \cdot H_m \cdot h_m,$$

где H_m – напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса, А/м;

h_m – высота главного полюса, м.

Напряженность H_m зависит от величины индукции в сердечнике главного полюса B_m и определяется по таблице 6. Величину индукции B_m в номинальном режиме следует принять в пределах $B_m = (1,2 \div 1,6)$ Тл.

Таблица 6 – Кривая намагничивания для полюсов. Сталь 3411

B , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H , А/м									
1,0	170	170	180	185	190	190	200	200	210	210
1,1	220	220	230	235	240	240	250	260	260	270
1,2	280	290	300	310	320	320	330	340	350	360
1,3	370	380	400	410	420	430	450	460	470	480
1,4	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
1,5	700	730	760	790	820	850	880	910	940	970
1,6	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
1,7	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2800	3100	3400	3700
1,8	4000	4300	4600	5000	5400	5900	6500	7100	7800	8500
1,9	9200	10000	11200	13000	15500	19000	22500	26000	30000	35000

Магнитный поток Φ_0 разветвляется в сердечнике якоря на две части. Магнитная индукция в спинке якоря находится из выражения:

$$B_a = \frac{\Phi_0}{2 \cdot S_a} = \frac{\Phi_0}{2 \cdot h_a \cdot l_a \cdot k_c},$$

где h_a – высота спинки, м.

Магнитное напряжение сердечника якоря вычисляется по формуле:

$$F_a = H_a \cdot L_a,$$

где H_a – напряженность магнитного поля (по таблице 6);

$$L_a = \frac{(D_a - 2 \cdot h_z - h_a)}{2 \cdot p} - \text{длина участка по сердечнику якоря, м.}$$

Магнитное напряжение участка по станине генератора:

$$F_s = H_s \cdot L_s.$$

Напряженность поля H_s определяется по характеристике намагничивания литой стали (таблица 7). Магнитная индукция станины:

$$B_s = \frac{\Phi_s}{S_s} = \frac{\Phi_m}{2 \cdot l_s \cdot h_s},$$

где $\Phi_s = \Phi_m / 2$ - магнитный поток в станине, Вб;

l_s – длина станины, м;

h_s – толщина станины, м.

Длина силовой линии:

$$L_s = \frac{(D_a + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_m + h_s)}{2 \cdot p}.$$

Таблица 7 – Литая сталь, толстые листы (Ст. 3)

<i>B</i> , <i>Tл</i>	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	593	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	693	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1,0	924	938	953	969	986	1004	1022	1039	1056	1073
1,1	1090	1108	1127	1147	1167	1187	1207	1227	1248	1269
1,2	1290	1315	1340	1370	1400	1430	1460	1490	1520	1555
1,3	1590	1630	1670	1720	1760	1810	1860	1920	1970	2030
1,4	2090	2160	2230	2300	2370	2440	2530	2620	2710	2800

По окончании расчета магнитной цепи при $B = B_{\delta_H}$ магнитную индукцию зубцовой зоны, сердечника якоря и ярма, полученные в ходе расчета, сравнить с соответствующими значениями магнитной индукции серийных машин постоянного тока средней мощности, выпускаемых промышленностью:

а) для зубцовой зоны максимальное значение:

$$B_{z \max} = 1,8 \div 2,5, \text{ Тл};$$

б) для сердечника якоря:

$$B_a = 1,0 \div 1,5, \text{ Тл};$$

в) для станины:

$$B_s = 1,1 \div 1,2 \text{ Тл.}$$

Если значение магнитной индукции, полученные в ходе расчета, сильно отличаются от рекомендованных выше значений, то необходимо изменить магнитную индукцию в воздушном зазоре B_{δ_n} и расчет провести вновь.

После правильного выбора магнитной индукции в воздушном зазоре B_{δ_n} для построения характеристики холостого хода следует выполнить расчет магнитной цепи генератора еще для трех её значений, равных $0,5 \cdot B_{\delta_n}$, $0,75 \cdot B_{\delta_n}$, $1,25 \cdot B_{\delta_n}$.

Следует помнить, что при насыщении участков магнитной цепи зависимость между индукцией и напряженностью на этих участках становится нелинейной, поэтому напряженности для каждого значения индукции определяются по соответствующим кривым намагничивания (рисунок 3.2, таблицы 5 – 7).

Результаты расчета магнитной цепи сводятся в таблицу 8. По результатам расчета строится характеристика холостого хода генератора в относительных единицах $E_0 = f(F_0)$, определяется коэффициент насыщения $k_n = F_0 / F_\delta$ и оценивается степень насыщения магнитной цепи.

Таблица 8 – Результаты расчета магнитной цепи

Наименование величин		Едини- ца из- мерения	Значение ЭДС			
			$0,5 \cdot E_{0H}$	$0,75 \cdot E_{0H}$	$1,0 \cdot E_{0H}$	$1,25 \cdot E_{0H}$
<i>Основной магнитный поток Φ_0</i>		<i>Вб</i>				
Магнитная индукция	<i>Воздушный зазор B_δ</i>	<i>Тл</i>				
	<i>Зубцовая зона B'_{z1}</i>	<i>Тл</i>				
	<i>Зубцовая зона B'_{z2}</i>	<i>Тл</i>				
	<i>Зубцовая зона B'_{zcp}</i>	<i>Тл</i>				
	<i>Полюсы B_m</i>	<i>Тл</i>				
	<i>Якорь B_a</i>	<i>Тл</i>				
	<i>Станина B_s</i>	<i>Тл</i>				
Напряженность магнитного поля	<i>Зубцовая зона H_z</i>	<i>А/м</i>				
	<i>Полюсы H_m</i>	<i>А/м</i>				
	<i>Якорь H_a</i>	<i>А/м</i>				
	<i>Станина H_s</i>	<i>А/м</i>				
Магнитное напряже- ние	<i>Воздушный зазор F_δ</i>	<i>А</i>				
	<i>Зубцовая зона F_z</i>	<i>А</i>				
	<i>Полюсы F_m</i>	<i>А</i>				
	<i>Якорь F_a</i>	<i>А</i>				
	<i>Станина F_s</i>	<i>А</i>				
<i>Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи F_a</i>		<i>А</i>				
<i>Коэффициент насыщения маг- нитной цепи k_H</i>		<i>–</i>				

Список использованных источников

1 Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. : Питер, 2008. - 320 с.

2 Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. : Питер, 2008. - 350 с.

3 Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / под ред. И. П. Копылова.- 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 2005. - 767 с.

4 Кацман, М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман.- 8-е изд., стер. - М. : Академия, 2008. - 496 с.