

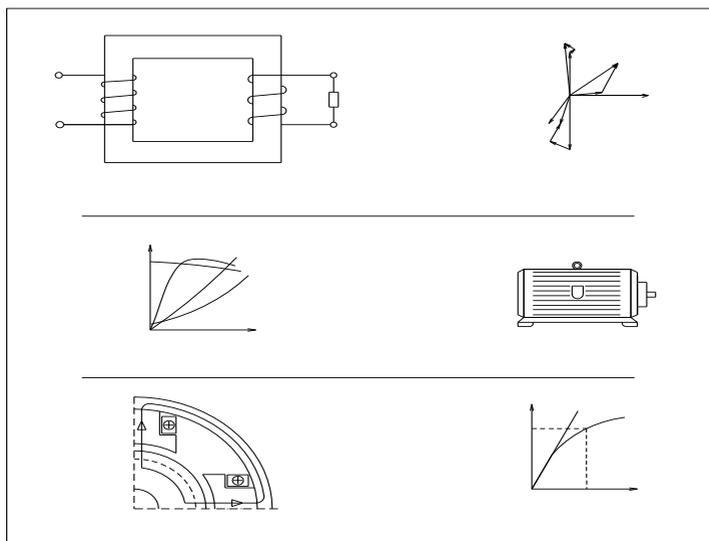
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

В.Г. ЧЕРНОМАШЕНЦЕВ, В.А. ПАЦКЕВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Пособие для выполнения курсовой и контрольных работ
студентами безотрывной формы обучения



Гомель 2005

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

В.Г.ЧЕРНОМАШЕНЦЕВ, В.А.ПАЦКЕВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Пособие для выполнения курсовой и контрольных работ
студентами безотрывной формы обучения

Под редакцией *В.Г. Черномашенцева*

Одобрено методической комиссией ФБО

Гомель 2005

УДК 621.3+621.38(076.5)
ББК
Ч-49

Р е ц е н з е н т – канд. техн. наук, доцент В.С. Могила (УО «БелГУТ»).

Черномашенцев, В.Г.

Ч-49 Электрические машины: пособие для выполнения курсовой и контрольных работ студентами безотрывной формы обучения / В.Г. Черномашенцев, В.А. Пацкевич; под ред В.Г.Черномашенцева. – Гомель: УО «БелГУТ», 2005. – 72 с.

ISBN

Содержит теоретическую часть, необходимую для выполнения отмеченных работ, практическую, включающую в себя задания, и методические указания к их выполнению, состоит из трёх разделов: трансформаторы, асинхронные двигатели и машины постоянного тока.

Предназначено для студентов специальностей «Тяговый подвижной состав (тепловозы)» и «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

УДК 621.3+621.38(076)
ББК

ISBN

© Черномашенцев В.Г., Пацкевич В.А., 2005.
© УО «БелГУТ», 2005.

ВВЕДЕНИЕ

Пособие предназначено для выполнения курсовой и контрольных работ по дисциплине «Электрические машины и преобразователи» студентами IV курса заочной формы обучения. При этом студенты специальности «Тяговой подвижной состав (тепловозы)» выполняют курсовую работу, состоящую из трех задач, а студенты специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» – две контрольные работы, каждая из которых включает в себя по две задачи. Решение указанных задач способствует более глубокому усвоению теории, позволяет сконцентрировать внимание обучающихся на ее узловых положениях.

Так как у студентов заочной формы обучения на самостоятельную работу времени значительно меньше, чем у студентов, занимающихся с отрывом от производства, то им трудно пользоваться существующими учебными пособиями и методическими указаниями, предназначенными прежде всего для студентов дневной формы обучения. Это учтено в данном пособии, где каждая глава содержит в себе: теоретическую часть, необходимую для решения задач и помогающую студенту восстановить в памяти теоретические положения курса; практическую, в которой приведены задачи для решения и методические указания к их решению.

Пособие включает в себя три раздела: трансформаторы, асинхронные двигатели и машины постоянного тока. Курсовая работа, выполненная на основании данного пособия, должна состоять из расчетной записки с графиками и эскизами, которые следует выполнять карандашом на миллиметровой бумаге. Расчетные точки, через которые проводятся линии графика, должны быть видны на кривых. Для координатных осей необходимо выбирать равномерные масштабы, кратные 1; 2; 2,5; 5; 10 и т.д., во всем диапазоне изменения величины, при этом по оси абсцисс откладывается только один масштаб какой-нибудь величины, например P_2 , а по направлению оси ординат можно построить несколько масштабных осей по числу рассматриваемых зависимостей, например $I_1 = f_1(P_2)$; $\cos\varphi_1 = f_2(P_2)$; $n = f_3(P_2)$ и т.д. Все вертикальные шкалы должны быть оцифрованы равномерно на одной высоте и должны начинаться с нуля.

При выполнении курсовой или контрольных работ необходимо применять стандартные условные обозначения электрических величин, единиц их измерения и условные графические обозначения элементов электрических цепей по ГОСТам.

Расчетная записка курсовой работы пишется на одной стороне листа формата А4 с обязательным оставлением полей для замечаний рецензента. В записке приводятся необходимые расчеты, таблицы, пояснения, перечень использованной литературы. Листы, рисунки и таблицы пояснительной записки должны быть пронумерованы. Применять сокращения не следует, кроме общепринятых. В тексте должны быть приведены номера таблиц, рисунков тех источников, которые использованы в расчете.

Рисунки и таблицы в курсовой работе размещаются после ссылки на них в тексте или на следующей странице, если они выполняются на отдельных листах.

Результаты расчетов округляются до трех значащих цифр. Ошибки, отмеченные рецензентом, должны быть исправлены аккуратно. Для исправлений можно использовать обратную (чистую) сторону предыдущего листа. При большом количестве исправлений на одной странице ее нужно переписать и вклеить рядом со страницей, содержащей замечания рецензента.

Контрольные работы студентов 3ЭТ-IV можно выполнять в тетради, однако все вышеперечисленные требования остаются теми же.

Для успешного выполнения курсовой и контрольных работ необходимо изучить по [1] или любому учебнику по электрическим машинам соответствующий теоретический раздел. Без знания теории нельзя рассчитывать на решение даже сравнительно простых задач.

Номера вариантов задач выбираются по таблицам согласно двум последним цифрам учебного шифра студента или выдаются преподавателем, ведущим данный вид занятия.

При разработке пособия использован материал [2-6].

Для решения задач можно рекомендовать следующие общие указания:

1. Внимательно прочитать условие задачи и при необходимости дать его наглядную схемную интерпретацию, используя условные графические обозначения элементов электрических схем и электрических машин в соответствии с ГОСТами.

2. Записать числовые данные условия задачи и их единицы измерения. Указать также те величины, числовые значения которых непосредственно не задаются, но о них можно судить по условию задачи. Например, если в условии сказано, что активным сопротивлением обмотки можно пренебречь, следует записать $R = 0$, если в задаче насыщение не учитывается, указывается $\mu = \infty$ и т. п. Устанавливаются искомые величины и единицы их измерения.

3. Подобрать нужную формулу. Если искомая величина определяется из нескольких выражений, то необходимо сравнить заданные величины с величинами, входящими в различные формулы и выбрать нужное выражение. При необходимости выполнить преобразования для определения искомой величины.

4. Если решение задачи требует графических построений, то следует предварительно наметить последовательность графических операций.

5. Провести числовой расчет и анализ полученного результата. Получив числовой ответ, следует по возможности оценить его соответствие реальному физическому смыслу исходной величины.

6. В заключение целесообразно проанализировать расчетную формулу, последовательность графических построений, алгоритм расчета и выяснить, как изменяются искомые величины при изменении величин, функцией которых они являются.

1 ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1 Теоретические сведения, необходимые для выполнения курсовой и контрольных работ

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной системы переменного тока в другую. Основное назначение трансформаторов – изменять напряжение переменного тока. Однако они могут применяться также для преобразования числа фаз и частоты.

Трансформатор характеризуется номинальными данными, которые указаны на его заводском щитке.

Номинальная мощность трансформатора $S_{\text{н}}$ – полная мощность на зажимах вторичной обмотки, указываемая на щитке и выраженная в вольт-амперах (ВА) или киловольт-амперах (кВА).

Номинальное первичное напряжение $U_{1\text{н}}$ – напряжение сети, на которое рассчитан трансформатор.

Номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{н}}$ – напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе и номинальном первичном напряжении.

Номинальные токи обмоток – первичный $I_{1\text{н}}$ и вторичный $I_{2\text{н}}$ – токи, соответствующие номинальным значениям напряжений и мощности. Так как КПД трансформаторов сравнительно высок, то принимают, что у двухобмоточного трансформатора номинальные мощности обеих обмоток

равны. Для трехфазных трансформаторов в качестве номинальных значений напряжений и токов указывают линейные величины.

Магнитный поток Φ , создаваемый реактивной составляющей тока первичной обмотки и сцепленный со всеми витками обеих обмоток, при своем изменении наводит в них ЭДС, действующие значения которых: $E_1 = 4,44f w_1 \Phi_m$, и $E_2 = 4,44f w_2 \Phi_m$, где f – частота тока в сети; w_1 и w_2 – числа витков обмоток; Φ_m – амплитудное значение основного магнитного потока в сердечнике.

Для понижающего трансформатора отношение ЭДС первичной обмотки к ЭДС вторичной есть коэффициент трансформации трансформатора

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{1н}}{U_{2н}}. \quad (1.1)$$

В общем случае числа витков $w_1 \neq w_2$, поэтому $E_1 \neq E_2$, $I_1 \neq I_2$ и, как следствие, различны активные r_1 , r_2 и реактивные x_1 , x_2 сопротивления обмоток. Это затрудняет количественный анализ процессов, происходящих в трансформаторе.

Чтобы избежать этих затруднений реальный трансформатор, имеющий различные числа витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток, заменяется эквивалентным (приведенным) трансформатором, у которого $w_2 = w_1$ и $k = 1$. Приведенные параметры вторичной обмотки обозначаются со штрихами.

Из условий, что все энергетические и электромагнитные соотношения в реальном и приведенном трансформаторах одинаковы, находим:

$$\begin{aligned} E_2' &= kE_2, \quad I_2' = \frac{I_2}{k}, \quad U_2' = kU_2, \quad r_2' = k^2 r_2, \quad x_2' = k^2 x_2, \\ z_2' &= k^2 z_2, \quad Z_H' = k^2 Z_H \end{aligned} \quad (1.2)$$

Исследование работы трансформатора упрощается, если электромагнитную связь между обмотками заменить цепью, элементы которой связаны между собой только электрически. В теории трансформаторов используют Т-образную схему замещения для приведенного трансформатора (рисунок 1.1).

На схеме замещения с помощью параметров r_1 , x_1 , r_2' , x_2' учитываются сопротивления обмоток приведенного трансформатора, а с помощью r_0 , x_0 – параметры намагничивающего контура, причем

$$r_1 = r_2' \ll r_0 \quad \text{и} \quad x_1 = x_2' \ll x_0. \quad (1.3)$$

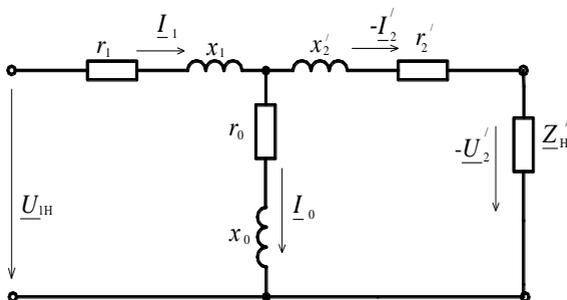


Рисунок 1.1 – Т-образная схема замещения трансформатора

В зависимости от величины сопротивления нагрузки трансформатор может работать в трех режимах:

1. Холостой ход при сопротивлении нагрузки $z_H = \infty$.
2. Короткое замыкание при $z_H = 0$.
3. Нагрузочный режим при $0 < z_H < \infty$.

Имея параметры схемы замещения, можно анализировать любой режим работы трансформатора. Сами параметры определяются на основе опытов холостого хода и короткого замыкания.

Для однофазного трансформатора на основе данных опыта холостого хода имеем:

$$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \quad (1.4)$$

а из опыта короткого замыкания –

$$r_k = r_1 + r_2' = \frac{P_{кн}}{I_{1H}^2}, \quad z_k = \frac{U_{кн}}{I_{1H}}, \quad x_k = x_1 + x_2' = \sqrt{z_k^2 - r_k^2},$$

$$r_1 = r_2' = \frac{r_k}{2}, \quad x_1 = x_2' = \frac{x_k}{2}, \quad (1.5)$$

где P_0 , I_0 – активная мощность и ток, потребляемые трансформатором из сети в опыте холостого хода;

$P_{кн}$ – активная мощность, потребляемая из сети в опыте короткого замыкания;

$U_{кн}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, при котором $I_{1к} = I_{1H}$.

При работе в нагрузочном режиме очень важно знать, как влияют параметры нагрузки на КПД и изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки.

КПД трансформатора равен

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{кн}} + P_0}, \quad (1.6)$$

где S_n – полная номинальная мощность трансформатора; φ_2 – угол сдвига фаз между током и напряжением в нагрузке;

β – коэффициент нагрузки, равный отношению реального тока вторичной обмотки к его номинальному значению; $\beta = I_2/I_{2н}$.

Зависимость $\eta = f(\beta)$ имеет максимум, который достигается при $P_k = P_0$, где P_k – мощность потерь в обмотках при реальных значениях токов в них;

$$P_k = \beta^2 P_{\text{кн}}.$$

График $\eta = f(\beta)$ имеет вид рисунка 1.2.

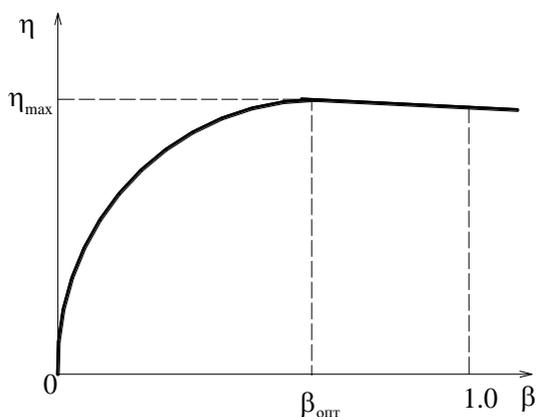


Рисунок 1.2 – Кривая изменения КПД трансформатора в зависимости от коэффициента нагрузки

Для определения процентного изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора используется уравнение

$$\Delta u \% = \beta \left(\frac{I_{1н} r_k \cos \varphi_2}{U_{1н}} + \frac{I_{1н} x_k \sin \varphi_2}{U_{1н}} \right) \cdot 100 \% = \beta (u_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \sin \varphi_2), \quad (1.7)$$

$$\text{где } u_{\text{ка}} = \frac{I_{1н} r_k}{U_{1н}} \cdot 100 \%, \quad u_{\text{кр}} = \frac{I_{1н} x_k}{U_{1н}} \cdot 100 \%.$$

Внешней характеристикой трансформатора является зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$ (рисунок 1.3).

Для построения внешней характеристики можно использовать выражение

$$U_2 = \frac{U_{1н}}{k} \left(1 - \frac{\Delta u\%}{100} \right). \quad (1.8)$$

При активно-емкостной нагрузке и определенном соотношении $r_{н}$ и $x_{сн}$ может быть получено постоянство U_2 при росте I_2 . Отмеченное достигается, когда угол φ_2 имеет определенную величину и является отрицательным.

В цепях трехфазного тока трансформирование электрической энергии осуществляется с помощью трехфазных трансформаторов. При этом принято начала фаз обмотки высшего напряжения обозначать A, B, C , а их концы – X, Y, Z ; начала фаз обмотки низшего напряжения соответственно – a, b, c , а концы – x, y, z .

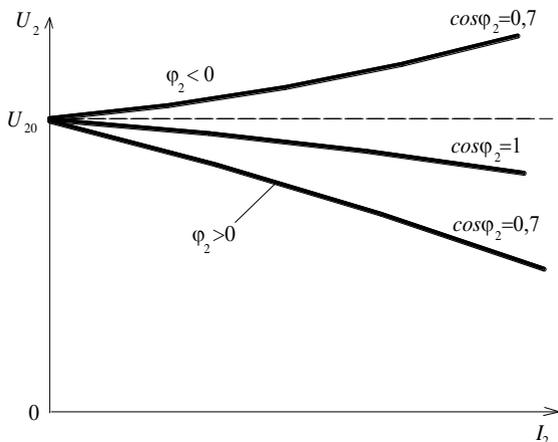


Рисунок 1.3 – Внешние характеристики трансформаторов средней и большой мощности

Как первичные, так и вторичные обмотки трансформаторов могут соединяться звездой (символ Υ , а при выведенной нейтральной точке – Υ^0) или треугольником (символ Δ). Обычно применяются группы соединения Υ/Υ^0 , Υ/Δ , Υ^0/Δ , которые являются основными. Символ способа соединения обмотки высшего напряжения принято указывать в числителе.

Трехфазные трансформаторы характеризуются коэффициентами трансформации:

а) *фазным* – отношением числа витков $w_{вн}$ фазы обмотки высшего напряжения (ВН) к числу витков $w_{нн}$ фазы обмотки низшего напряжения (НН),

$$k_{\phi} = w_{вн}/w_{нн} = U_{фвн}/U_{фнн}; \quad (1.9)$$

б) *линейным* – отношением линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода

$$k_{л} = U_{лвн}/U_{лнн}. \quad (1.10)$$

Для схем Y/Y и Δ/Δ фазный и линейный коэффициенты трансформации равны, то есть $k_{л} = k_{\phi}$; для схемы Y/Δ $k_{л} = \sqrt{3} k_{\phi}$, а для схемы Δ/Y $k_{л} = k_{\phi}/\sqrt{3}$.

1.2 Задания на выполнение курсовой и контрольной работ по разделу «Трансформаторы»

1.2.1 Задача 1 курсовой работы для студентов ЗТ-IV

Трехфазный двухобмоточный трансформатор характеризуется следующими величинами: мощность $S_{п}$; высшее линейное напряжение $U_{вн}$; низшее линейное напряжение $U_{нн}$; мощность потерь холостого хода P_0 ; мощность потерь короткого замыкания $P_{кн}$; напряжение короткого замыкания u_k ; ток холостого хода i_0 ; коэффициент полезного действия η , определенный при коэффициенте нагрузки $\beta = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$; параметры упрощенной схемы замещения r_k и x_k ; параметры намагничивающей ветви r_0 и x_0 .

Числовые значения заданных величин, схема соединения обмоток и номера пунктов задания, подлежащих выполнению, указаны в таблице 1.1–1.5. Номер варианта выдается студенту преподавателем.

Задание: сформулировать условие задачи для своего варианта и выполнить следующее:

1. Начертить схему трансформатора.
2. Определить номинальные токи в обмотках трансформатора.
3. Определить коэффициенты трансформации фазных и линейных напряжений.
4. Определить мощность потерь холостого хода P_0 .
5. Определить мощность потерь короткого замыкания $P_{кн}$.
6. Определить параметры упрощенной схемы замещения трансформатора, активное и реактивное сопротивление фазы первичной и вторичной обмоток, полагая, что $r_1 = r_2' = r_k/2$ и $x_1 = x_2' = x_k/2$.

7. Начертить упрощенную схему замещения трансформатора.
8. Начертить Т-образную схему замещения трансформатора и определить ее параметры.
9. Построить векторную диаграмму для упрощенной схемы замещения при значении коэффициента нагрузки $\beta = 0,75$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$).
10. Определить процентное изменение вторичного напряжения $\Delta u\%$ при значениях коэффициента нагрузки $\beta : 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$ и $\varphi_2 < 0$).
11. Определить максимальное значение КПД трансформатора при $\cos\varphi_2 = 0,8$.
12. Определить КПД трансформатора при значениях коэффициента нагрузки $\beta: 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$.
13. Определить напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки при значениях коэффициента нагрузки $\beta: 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$). Построить график зависимости $U_2 = f(\beta)$.
14. Определить характер нагрузки ($\varphi_2 = ?$), при котором напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки не зависит от коэффициента нагрузки β .

Исходные данные к задаче 1 курсовой работы для студентов ЗТ-IV

Таблица 1.1

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1,2,3,6,7,8,9,10($\varphi_2 > 0$),12,14								
Схема соединения обмоток – Y/ Δ								
Вариант	Тип трансформатора	S_n , кВА	U , кВ		P_{σ} , кВт	$P_{\text{кв}}$, кВт	u_k , %	i_0 , %
			ВН	НН				
1	ТМ-25/6	25	6,3	0,4	0,105	0,600	4,5	3,2
2	ТМ-40/6	40	6,3	0,23	0,240	0,880	4,5	4,5
3	ТМ-40/10	40	10	0,4	0,160	0,940	4,6	3,0
4	ТМ-63/6	63	6,3	0,4	0,360	1,350	4,7	4,5
5	ТМ-100/6	100	6,3	0,4	0,330	2,100	4,6	2,6
6	ТМ-100/35	100	35	0,4	0,430	2,100	6,6	4,16
7	ТМ-160/35	160	35	0,4	0,610	2,800	6,6	2,4
8	ТМ-250/10	250	10	0,4	1,050	3,900	4,6	3,0
9	ТМ-250/35	250	35	0,4	0,960	3,900	6,6	2,3
10	ТСМ-320/10	320	10	0,525	1,250	4,650	4,5	2,5

Таблица 1.2

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1,2,3,6,7,8,9,10($\varphi_2 > 0$),12,14								
Схема соединения обмоток – Y/Δ								
Вариант	Тип трансформатора	S_n , кВА	U , кВ		P_0 , кВт	$P_{\text{кн}}$, кВт	u_k , %	i_0 , %
			ВН	НН				
11	ТМ-1000/10	1000	10	0,4	2,45	12,2	5,5	1,4
12	ТМ-1600/10	1600	10	0,4	3,30	18,0	5,5	1,3
13	ТМ-1000/35	1000	35	0,4	2,75	12,2	6,5	1,5
14	ТМ-1600/35	1600	35	0,4	3,65	18,0	6,5	1,4
15	ТМ-2500/10	2500	10	0,4	4,60	25,0	5,5	1,0
16	ТМ-2500/35	2500	35	0,4	5,10	25,0	6,5	1,1
17	ТМ-1000/10	1000	10	0,23	2,45	12,8	5,5	1,4
18	ТМ-1600/10	1600	10	0,23	3,30	18,9	5,5	1,3
19	ТМ-1000/35	1000	35	0,23	2,75	12,8	6,5	1,5
20	ТМ-1600/35	1600	35	0,23	3,65	18,9	6,5	1,4

Таблица 1.3

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1,2,3,5,6,7,10,12,13,14								
Вариант	Тип трансформатора	S_n , кВА	U , кВ		P_0 , кВт	r_k , Ом	x_k , Ом	Схема соединения
			ВН	НН				
21	ТМ-25/6	25	6,3	0,4	0,105	38,14	60,41	Y/Δ
22	ТМ-40/10	40	10	0,4	0,160	59,23	98,57	Y/Y
23	ТМ-100/35	100	35	0,23	0,465	253,4	755,6	Y/Δ
24	ТМ-160/10	160	10	0,23	0,565	10,84	25,92	Y/Δ
25	ТМ-250/10	250	10	0,23	0,820	6,20	16,90	Y/Δ
26	ТМ-250/35	250	35	0,23	1,000	75,9	301,2	Y/Δ
27	ТМ-25/10	25	10	0,4	0,135	95,12	152,8	Y/Y
28	ТМ-160/35	160	35	0,4	0,610	133,9	487,7	Y/Y
29	ТМ-100/6	100	6,3	0,4	0,330	8,30	16,25	Y/Y
30	ТМ-63/6	63	6,3	0,4	0,360	13,47	26,36	Y/Y

Таблица 1.4

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1,2,3,4,6,7,8,9,11,13,14								
Схема соединения обмоток – Y/Δ								
Вариант	Тип трансформатора	S_n , кВА	U , кВ		$P_{\text{кн}}$, кВт	u_k , %	i_0 , %	η^* , %
			ВН	НН				
31	ТМ-250/35	250	35	0,23	3,885	6,5	2,3	98,1
32	ТМ-250/10	250	10	0,23	3,885	4,5	2,3	98,2
33	ТМ-160/10	160	10	0,23	2,783	4,5	2,4	98,1
34	ТМ-1600/10	1600	10	0,23	18,9	5,5	1,3	98,8
35	ТМ-100/35	100	35	0,4	1,970	6,5	2,6	97,7
36	ТМ-63/6	63	6,3	0,4	1,350	4,7	4,5	97,3
37	ТМ-160/35	160	35	0,4	2,800	6,6	2,4	98,0
38	ТМ-1000/35	1000	35	0,23	12,8	6,5	1,5	98,5

39	ТМ-40/6	40	6,3	0,23	0,880	4,5	4,5	97,2
40	ТМ-25/6	25	6,3	0,4	0,600	4,5	3,2	97,5

* — КПД определен при коэффициенте нагрузки $\beta = 0,5$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$

Таблица 1.5

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,13,15,18,22								
Вариант	S_n , кВА	U , кВ		r_k ,	x_k ,	r_0 ,	x_0 ,	Схема соединения
		ВН	НН	Ом	Ом	Ом	Ом	
41	180	10	0,525	12,64	27,84	755	7904	Y/Y
42	100	10	0,525	23,95	49,51	1295	1327	Y/ Δ
43	100	6,3	0,525	9,5	19,65	562	5918	Y/Y
44	20	6,3	0,4	59,4	91,57	2200	21940	Y/ Δ
45	10	10	0,4	334,2	436,78	13969	99026	Y/ Δ
46	63	6,3	0,4	13,47	26,36	1775	13893	Y/ Δ
47	100	6,3	0,4	8,3	16,35	1931	15134	Y/Y
48	160	35	0,4	133,9	487,7	50650	315263	Y/Y
49	50	6,3	0,525	20,98	38,28	1131	11282	Y/ Δ
50	30	6,3	0,4	37,38	62,41	1718	16446	Y/Y
								Y/ Δ

1.2.2 Задача 1 контрольной работы № 1 для студентов ЗЭТ-IV

Однофазный трансформатор малой мощности характеризуется следующими номинальными величинами: мощность S_n , первичное напряжение $U_{1н}$, вторичное напряжение $U_{2н}$, процентное значение тока холостого хода i_0 %, мощность потерь в сердечнике трансформатора P_0 , процентное значение напряжения короткого замыкания u_k %, мощность потерь короткого замыкания $P_{кн}$.

Определить:

1. Коэффициент трансформации трансформатора k , номинальные токи первичной $I_{1н}$ и вторичной $I_{2н}$ обмоток.
2. Параметры Т-образной схемы замещения, КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = (0,25; 0,5; 0,75; 1)$ и коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$.
3. Процентное изменение вторичного напряжения Δu % и вторичное напряжение U_2 при $\beta = (0,25; 0,5; 0,75; 1)$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$.
4. Характер нагрузки, при котором вторичное напряжение не зависит от коэффициента β .
5. Коэффициенты мощности для режимов холостого хода и короткого замыкания – $\cos \varphi_0$, $\cos \varphi_k$.
6. Начертить схему замещения трансформатора, построить зависимость $U_2 = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Числовые значения исходных величин берутся студентом из таблицы 1.6 по варианту, выданному преподавателем.

Таблица 1.6 – Исходные данные к задаче 1 контрольной работы № 1 для студентов ЗЭТ-IV

Вариант	Тип трансформатора	S_n , ВА	$U_{1н}$, В	$U_{2н}$, В	i_o , %	P_o , Вт	u_k , %	$P_{кн}$, Вт
1	ОМ-0,3/6	300	6300	230	30	23	8	20
2	ОМ-0,66/6	660	6000	230	20	25	8	46
3	ОМ-1,2/6	1200	5150	230	20	32	7	66
4	ОМ-0,66/10	660	10500	230	30	25	8	46
5	ОМ-1,2/10	1200	10000	230	20	32	7	66
6	ОМ-1,2/6	1200	5700	115	20	32	7	66
7	ОМ-1,2/6	1200	5400	115	20	32	7	66
8	ОМ-1,2/10	1200	9500	115	20	32	7	66
9	ОМ-1,2/10	1200	9000	115	20	32	7	66
10	ОМ-1,2/10	1200	8590	115	20	32	7	66
11	ОМ-0,63/6	630	6000	230	34	18	6,8	42
12	ОМ-0,63/10	630	10000	230	34	18	6,8	42
13	ОМ-1,25/6	1250	6000	230	23	23	6	60
14	ОМ-1,25/10	1250	10000	230	23	23	6	60
15	ОМ-0,3/6	630	6000	115	34	18	6,8	42
16	ОМ-0,63/10	630	10000	115	34	18	6,8	42
17	ОМ-1,25/6	1250	600	115	23	23	6	60
18	ОМ-1,25/10	1250	1000	115	23	23	6	60
19	ПОБС-2АУЗ	300	220	17,6	14	20	12	20
20	ПОБС-3АУЗ	300	220	247,5	14	20	10	25
21	ПОБС-5АУЗ	300	220	44	14	18	11	20
22	ПРТ-АУЗ	65	220	12	4,4	3	15	5
23	ПТ-25АУЗ	65	220	60	4,4	3	14	4
24	ПТИУЗ	80	220	11,2	27	4,5	13	4
25	СОБСЗА	50	110	82,6	8	3	12	3
26	СТ-3	13	110	13	53	1	25	2
27	СТ-2	25	165	13	27	2	18	2
28	СТ-3	13	220	13	42	1,5	17	1,5
29	СКТ-1	12	220	165	50	3	17	1
30	СТ-2	25	165	13	29	1	15	2

1.3 Методические указания к решению задач

1.3.1 Методические указания к решению задачи 1 курсовой работы для студентов ЗТ-IV

Номинальные линейные токи:

обмотки ВН $I_{1нн} = S_n / (\sqrt{3} U_{вн})$; обмотки НН $I_{2нн} = S_n / (\sqrt{3} U_{нн})$.

Мощность потерь холостого хода P_0 затрачивается на потери в стали, $P_0 = 3I_0^2 r_0$. Если заданы S_n , β , $\cos\varphi_2$, $P_{кн}$ и η , то величину P_0 можно определить из уравнения

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos\varphi_2}{\beta S_n \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кн}}$$

Мощность потерь короткого замыкания $P_{кн} = 3I_{1фн}^2 r_k$,

где $I_{1фн}$ – номинальный фазный ток первичной обмотки трансформатора; $r_k = r_1 + r_2'$.

Упрощенную схему замещения трансформатора получаем при $z_0 = \infty$ и $I_0 = 0$. Последняя имеет вид рисунка 1.4, а, а ее векторная диаграмма при $r - L$ нагрузке представлена на рисунке 1.4, б.

Максимальное значение КПД в трансформаторе будет при равенстве потерь в стали потерям в меди, то есть $P_0 = \beta_{опт}^2 P_{кн}$. Из отмеченного условия получаем $\beta_{опт} = \sqrt{P_0/P_{кн}}$. Имея оптимальный коэффициент нагрузки $\beta_{опт}$ и $\cos\varphi_2$, можно по (1.6) определить η_{max} . Вопросы теории по решению остальных пунктов задания отражены в подразделе 1.1.

1.3.2 Методические указания к решению задачи 1 контрольной работы № 1 для студентов ЗЭТ-IV

Параметрами Т-образной схемы замещения являются сопротивления r_1 , x_1 , r_2' , x_2' , r_0 и x_0 . Данные сопротивления определяются из следующих уравнений:

$$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad \text{где } I_0 = \frac{i_0\%}{100} I_{1н}; \quad r_1 = r_2' = r_k/2, \quad \text{где } r_k = \frac{P_{кн}}{I_{1н}^2};$$

$$x_1 = x_2' = x_k/2, \quad \text{где } x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}; \quad z_k = U_{кн}/I_{1н}, \quad U_{кн} = \frac{u_k\%}{100} U_{1н};$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \quad \text{где } z_0 = U_{1н}/I_0.$$

Коэффициенты мощности для режимов:

холостого хода $\cos\varphi_0 = r_0/z_0$ или $\cos\varphi_0 = P_0/(U_{1н}I_0)$;

короткого замыкания $\cos\varphi_k = r_k/z_k$ или $\cos\varphi_k = P_{кн}/(U_{кн}I_{1н})$.

Зависимость $U_2 = f(\beta)$ строится на основании данных расчета по п. 3 задания.

Вопросы теории по решению остальных пунктов задания отражены в подразделе 1.1.

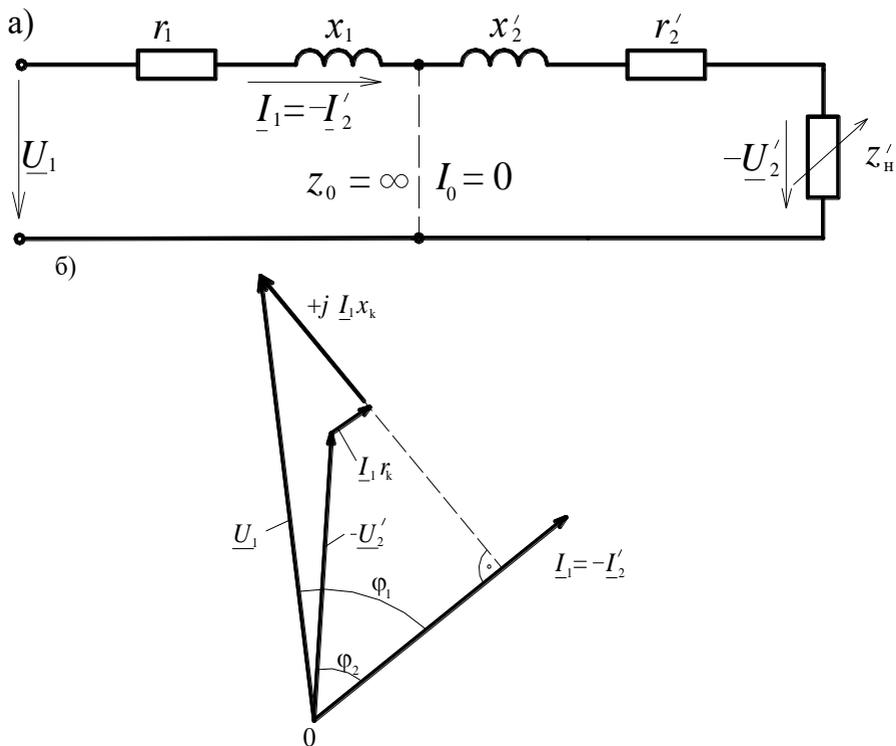


Рисунок 1.4 – Упрощенная схема замещения трансформатора (а) и ее векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке (б)

2 АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

2.1 Теоретические сведения, необходимые для выполнения курсовой и контрольной работ

2.1.1 Принцип действия асинхронного двигателя

Асинхронная машина – это машина переменного тока, у которой частота вращения ротора отличается от частоты вращения магнитного поля статора.

В большинстве случаев асинхронная машина используется как двигатель. Наиболее широкое распространение нашли трехфазные асинхронные двигатели, двигатели с однофазной обмоткой, как правило, выполняются небольшой мощности (примерно до 0,5 кВт).

Конструктивно асинхронный двигатель состоит из двух частей: неподвижной – статора и вращающейся – ротора.

Статор трехфазного двигателя представляет собой полый цилиндр, набранный из листов электротехнической стали, на внутренней поверхности которого имеются пазы. Внутри пазов укладывается обмотка, которая может соединяться звездой или треугольником. Она состоит из отдельных катушек (секций), которые объединены в три фазы. В двухполюсных машинах фазы на статоре располагаются со сдвигом в пространстве под углом в 120° .

Внутри статора находится ротор, в пазах которого также размещается обмотка. В зависимости от исполнения этой обмотки асинхронные двигатели делятся на двигатели с фазным и короткозамкнутым ротором. На практике наибольшее распространение имеют последние, в них обмотка ротора выполняется в виде «беличьей клетки».

При питании обмотки статора трехфазным током создается вращающееся магнитное поле (поток Φ), частота вращения которого (синхронная)

$$n_1 = 60f_1/p, \quad (2.1)$$

где f_1 – частота тока сети;

p – число пар полюсов статорной обмотки.

Вращающееся поле статора индуцирует в проводниках ротора ЭДС (направление ЭДС определяется по правилу правой руки), и по ним протекает ток. Активная составляющая этого тока совпадает по фазе с ЭДС. В результате взаимодействия отмеченного тока с потоком статора создается электромагнитная сила (ее направление определяется по правилу левой руки) и электромагнитный момент M , под действием которого ротор приходит во вращение с частотой n в ту же сторону, что и поток Φ . Относительную разность частот вращения статорного магнитного поля и ротора обозначают через s и называют скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (2.2)$$

последнее часто выражают в процентах

$$s_{\%} = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100 \% . \quad (2.3)$$

2.1.2 Асинхронный двигатель при неподвижном роторе

Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе с заторможенным ротором аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе. Если к обмотке статора подвести напряжение сети U_1 , а обмотку ротора разомкнуть (например, в двигателе с фазным ротором с помощью подъема щеток), то вращающееся поле статора, пересекая обмотки статора и ротора, индуцирует в них фазные ЭДС E_1 и E_2 :

$$E_1 = 4,44f_1w_1k_{o\delta 1}\Phi_m ; \quad (2.4)$$

$$E_2 = 4,44f_1w_2k_{o\delta 2}\Phi_m , \quad (2.5)$$

где f_1 – частота тока сети;

w_1, w_2 – числа витков фазных обмоток статора и ротора;

$k_{o\delta 1}, k_{o\delta 2}$ – обмоточные коэффициенты соответствующих обмоток;

Φ_m – амплитудное значение основного магнитного потока.

Рассмотренный режим аналогичен режиму холостого хода трансформатора. Однако относительное значение тока холостого хода у асинхронного двигателя больше, чем у трансформатора из-за двойного воздушного зазора между статором и ротором, который увеличивает магнитные потоки рассеяния. На основании второго закона Кирхгофа для одной фазы статорной обмотки можно записать следующее уравнение

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + j\underline{I}_0x_1 + \underline{I}_0r_1 , \quad (2.6)$$

где U_1 – фазное напряжение источника питания;

E_1 – фазная ЭДС статорной обмотки;

I_0 – ток холостого хода;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки статора;

r_1 – активное сопротивление этой обмотки.

Коэффициент трансформации ЭДС асинхронного двигателя

$$k_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{o\delta 1}w_1}{k_{o\delta 2}w_2} . \quad (2.7)$$

Если роторную обмотку двигателя замкнуть, а сам ротор затормозить, то двигатель будет работать в режиме короткого замыкания. Относительное значение напряжения короткого замыкания, при котором $I_{\text{к}} = I_{\text{н}}$ у двигателя больше, чем у трансформатора из-за больших магнитных потоков рассеяния.

Физическая сущность явлений при коротком замыкании асинхронного двигателя та же, что и в трансформаторе. Если пренебречь для режима короткого замыкания МДС, создающей основной магнитный поток, то можно записать

$$\underline{F}_1 = -\underline{F}_2, \quad (2.8)$$

где F_1 и F_2 – намагничивающие силы статорной и роторной обмоток;

$$\underline{F}_1 = 0,9m_1w_1k_{о\sigma 1}I_1, \quad (2.9)$$

$$\underline{F}_2 = 0,9m_2w_2k_{о\sigma 2}I_2, \quad (2.10)$$

где m_1 и m_2 – числа фаз соответствующих обмоток.

Из равенства МДС F_1 и F_2 можно определить коэффициент трансформации токов при $m_1 = m_2$,

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1k_{о\sigma 1}}{w_2k_{о\sigma 2}}.$$

По аналогии с трансформатором обмотку ротора приводят к числу фаз и числу витков обмотки статора. Для приведенной асинхронной машины имеем следующие параметры:

$$\begin{aligned} E_2' &= E_1 = E_k k_E; \\ I_1 &= I_2' = I_2 / k_i; \\ r_2' &= r_2 k_E k_i; \\ x_2' &= x_2 k_E k_i; \\ r_k &= r_1 + r_2'; \\ x_k &= x_1 + x_2'. \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.1.3 Работа асинхронной машины при вращающемся роторе

В статорной обмотке при переходе от неподвижного ротора к подвижному практически ничего не меняется. В роторной же обмотке изменяется частота ЭДС из-за возникновения скольжения:

$$f_{2s} = f_1 s. \quad (2.12)$$

Для ЭДС и индуктивного сопротивления обмотки ротора можно записать:

$$E_{2s} = 4,44f_{2s}w_2k_{о\sigma 2}\Phi_m = 4,44f_1s w_2k_{о\sigma 2}\Phi_m = E_2s; \quad (2.13, a)$$

$$x_{2s} = 2\pi f_{2s}L_{2\sigma} = 2\pi f_1sL_{2\sigma} = x_2s, \quad (2.13, б)$$

где $L_{2\sigma}$ – индуктивность рассеяния фазной обмотки ротора.

Активное сопротивление при малой частоте тока в роторной обмотке можно считать неизменным, то есть $r_2 = r_2' = \text{const}$, тогда по закону Ома ток в роторной обмотке

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}} . \quad (2.14)$$

Последнее выражение для тока позволяет режим двигателя с вращающимся ротором привести к эквивалентному режиму при неподвижном роторе. В этом режиме во вторичной цепи вместо ЭДС при вращении ротора E_{2s} с частотой f_{2s} будет существовать ЭДС при неподвижном роторе E_2 с частотой f_1 , а вместо индуктивного сопротивления при вращении ротора x_{2s} во вторичной цепи действует индуктивное сопротивление при неподвижном роторе x_2 . Для сохранения величины и фазы тока I_2 необходимо вместо r_2 , действующего при вращении, ввести новое сопротивление r_2/s . Представим r_2/s как

$$r_2/s = r_2 + r_2(I - s)/s . \quad (2.15)$$

Тогда эквивалентная схема роторной цепи имеет вид рисунка 2.1, а схема замещения для приведенной машины изображена на рисунке 2.2.

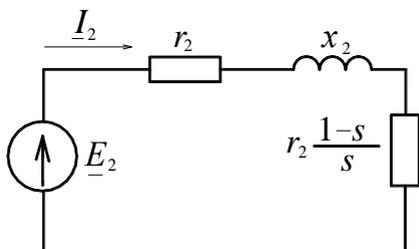


Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема роторной цепи

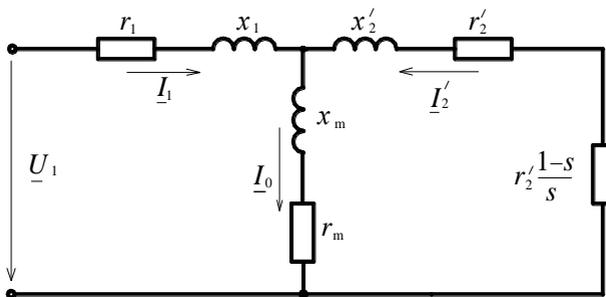


Рисунок 2.2 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

В приведенной Т-образной схеме замещения скольжение оказывает влияние на все три тока цепи, что затрудняет анализ процессов в двигателе. Поэтому часто применяют Г-образную схему с вынесенной на входные зажимы намагничивающей ветвью (рисунок 2.3).

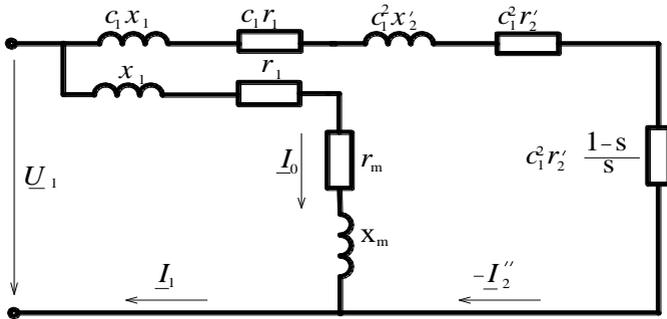


Рисунок 2.3 – Г-образная схема замещения асинхронной машины

В данной схеме с помощью поправочного коэффициента c_1 компенсируется некоторая погрешность, возникающая при вынесении намагничивающей ветви на входные зажимы. Этот коэффициент можно определить по формуле

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m} \cdot \quad (2.16)$$

На схемах замещения r_1 и x_1 – фазное активное и индуктивное сопротивления статорной обмотки; r_2' и x_2' – аналогичные приведенные сопротивления роторной обмотки; r_m и x_m – параметры намагничивающей ветви, $r_2' \frac{1-s}{s}$ и $c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}$ – элементы, на которых выделяется электрическая мощность, равная механической мощности на валу двигателя.

2.1.4 Вращающий момент асинхронного двигателя

Согласно схеме замещения (рисунок 2.3) уравнение электромагнитной мощности имеет вид

$$P_{эм} = m I_2'^2 c_1^2 \left(r_2' + r_2' \frac{1-s}{s} \right) = m I_2'^2 c_1^2 \frac{r_2'}{s} \cdot$$

Приведенное значение тока роторной обмотки

$$I_2'' = \frac{U_1}{\sqrt{(c_1 r_1 + \frac{c_1^2 r_2'}{s})^2 + (c_1 x_1 + c_1^2 x_2')^2}} . \quad (2.17)$$

Электромагнитный момент

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{m U_1 \frac{c_1^2 r_2'}{s}}{\omega_1 [(c_1 r_1 + \frac{c_1^2 r_2'}{s})^2 + (c_1 x_1 + c_1^2 x_2')^2]} , \quad (2.18)$$

где m – число фаз статора; $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$.

При анализе электромагнитных процессов в машинах общего применения очень часто полагают $c_1 \approx 1$, что существенно облегчает расчеты и мало сказывается на точности полученных результатов. Г-образную схему замещения при $c_1 \approx 1$ называют упрощенной. Для данной схемы электромагнитный момент

$$M = \frac{m U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]} . \quad (2.19)$$

В соответствии с этим выражением зависимость $M = f(s)$, называемая механической характеристикой, имеет вид рисунка 2.4.

На рисунке 2.4 максимальный (критический) момент, развиваемый при критическом скольжении $s_{кр}$, при некоторых допущениях равен:

$$M_{\max} = M_{кр} = \pm \frac{1}{2} \frac{m_1 U_1^2}{\omega_1 (x_1 + x_2')} , \quad (2.20)$$

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{x_{кр}} . \quad (2.21)$$

При пуске, когда $s = +1$, двигатель развивает пусковой момент $M_{п}$. В номинальном режиме при s_n двигатель имеет номинальный момент M_n .

Для расчета механической характеристики можно использовать упрощенную формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}, \quad (2.22)$$

где s – скольжение, при котором определяется момент M .

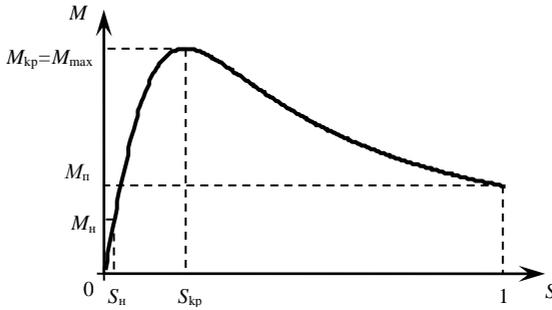


Рисунок 2.4 – Зависимость $M = f(s)$ для асинхронного двигателя

Формула Клосса вместе с выражением для определения частоты вращения ротора $n = n_1(1 - s)$ позволяет получить механическую характеристику в виде зависимости $n = f(M)$ (рисунок 2.5).

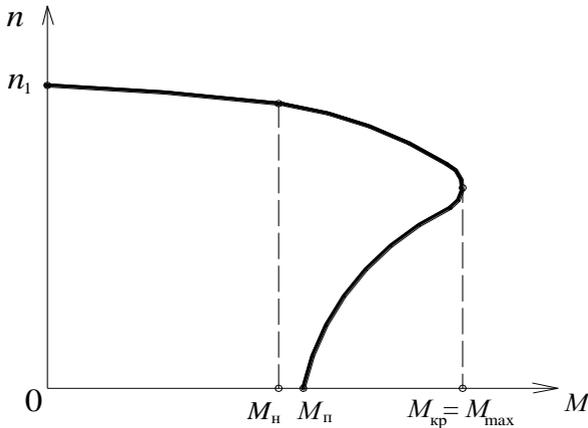


Рисунок 2.5 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

Более точные кривые $M = f(s)$ и $n = f(M)$ можно получить, если воспользоваться уточненной формулой Клосса:

$$M = \frac{(2 + a s_{кр}) M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + a s_{кр}}, \quad (2.23)$$

где $a = \frac{2r_1'}{c_1 r_2'}$; $c_1 = 1 + x_1/x_m$; $s_{кр} = \frac{c_1 r_2'}{x_1 + c_1 x_2'}$. (2.24)

В расчете можно принять $a = 2$ [5].

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости потребляемой мощности P_1 , первичного тока I_1 , коэффициента мощности $\cos\varphi_1$, момента на валу M_2 , скольжения s и КПД η от полезной мощности P_2 при работе с номинальным напряжением и частотой.

Вид отмеченных характеристик представлен на рисунке 2.6.

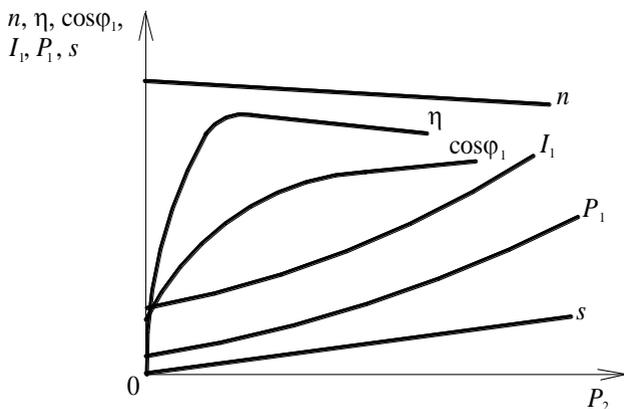


Рисунок 2.6 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

2.2 Задания на выполнение курсовой и контрольной работ по разделу «Асинхронные двигатели»

2.2.1 Задача 2 курсовой работы «Расчет характеристик асинхронного двигателя» для студентов ЗТ-IV

Для трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором необходимо:

а) рассчитать и построить рабочие характеристики, то есть зависимости частоты вращения n , вращающего момента M_2 , КПД η , тока статора I_1 ,

потребляемой мощности P_1 и коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ в функции полезной мощности P_2 ;

б) определить величину критического скольжения $s_{кр}$, максимального M_{max} и пускового $M_{п}$ моментов и их относительные значения $M_{п}^*$ и $M_{п}^*$;

в) рассчитать и построить зависимость электромагнитного момента от скольжения $M = f(s)$ при изменении скольжения от нуля до единицы;

г) рассчитать и построить механическую характеристику двигателя $n = f(M)$.

Числовые значения исходных величин берутся студентом из таблицы 2.1 согласно двум последним цифрам учебного шифра.

При этом обмотка статора двигателя соединена звездой, частота сети f_1 равна 50 Гц. Параметры двигателя в таблице 2.1 приведены в относительных единицах (о.е.); для определения размерных величин сопротивлений нужно воспользоваться соотношениями:

$$r = r^* z_6; \quad x = x^* z_6; \quad z = z^* z_6,$$

где r^*, x^*, z^* – сопротивления в относительных единицах;

$$z_6 - \text{базисное сопротивление, равное } z_6 = U_H / (\sqrt{3} I_{1H})$$

Для расчета механической характеристики целесообразно использовать уточненную формулу Клосса (2-23).

2.2.2 Задача 2 контрольной работы №1 для студентов ЗЭТ – IV

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется следующими номинальными величинами: мощность P_H , линейное напряжение U_H , частота вращения ротора n_H , коэффициент полезного действия η_H , коэффициент мощности $\cos\varphi_H$, кратность пускового тока $I_{п1}/I_{1H}$, кратность максимального момента M_{max}/M_H .

Определить:

1. Активную мощность, потребляемую двигателем из сети P_{1H} ; номинальный M_H и критический $M_{кр}$ моменты ($M_{кр} = M_{max}$); номинальный I_{1H} и пусковой $I_{п1}$ токи.

Таблица для студентов
ЗЭТ – IV

Вариант по последней цифре учебного шифра	6		7		8		9			
		320	6000	500	6000	500	6000	500	6000	
	37,2	380	57	42,7	35	600	1500	0,56	0,16	
	1000	1500	1500	1000	0,16	0,165	0,6	0,26	2,1	3,8
	0,18	0,17	3,6	3,85	3,4	3,62	0,012	0,024	0,034	0,036
	0,013	0,016	0,015	0,016	0,017	0,017	0,029	0,11	0,115	0,12
	0,020	0,018	0,016	0,017	0,029	0,11	0,115	0,12	0,16	0,155
	0,016	0,016	0,017	0,029	0,11	0,115	0,12	0,16	0,155	0,15
	0,115	0,125	0,127	4,41	4,32	4,24	4,24	4,24	4,24	4,24

Наименование величин	Вариант по предпоследней цифре шифра						
		0	1	2	3	4	5
Номинальная мощность на валу $P_{\text{н}}$, кВт	0 – 9	55	4	7,5	125	30	75
Номинальное линейное напряжение $U_{\text{л}}$, В	0 – 9	380	380	380	380	380	380
Номинальный ток статора $I_{\text{н}}$, А	0 – 9	104	8,5	15,1	234	58,8	143
Частота вращения n_1 , об/мин	0,2,4,6,8	750	1000	1500	3000	1500	750
	1,3,5,7,9	3000	1500	3000	1500	1000	1000
Активное сопротивление цепи намагничивания $r^*_{\text{м}}$, о.е.	1,3,5,7,9	0,54	0,5	0,55	0,24	0,29	0,3
	0,2,4,6,8	0,26	0,34	0,48	0,29	0,14	0,28
Индуктивное сопротивление цепи намагничивания $x^*_{\text{м}}$, о.е.	0,2,4,6,8	2,7	2,35	3,2	4,5	2,55	2,9
	1,3,5,7,9	4,0	3,0	3,3	4,0	2,9	3,2
Активное сопротивление обмотки статора	0 – 9	0,018	0,033	0,028	0,015	0,032	0,017
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора r^*_{2} , о.е.	2,3,7	0,026	0,048	0,048	0,018	0,040	0,022
	0,1,5,8	0,024	0,051	0,043	0,020	0,035	0,024
	4,6,9	0,022	0,055	0,041	0,022	0,026	0,025
Индуктивное сопротивление обмотки статора	0 – 9	0,11	0,12	0,105	0,10	0,105	0,11
Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора x^*_{2} , о.е.	0 – 9	0,12	0,13	0,11	0,12	0,14	0,12
Потери мощности механические $\Delta P_{\text{мех}}$, кВт	0,5,7	0,45	0,055	0,07	1,32	0,16	0,85
	2,3,6,8	0,55	0,05	0,08	1,24	0,20	0,70
	1,4,9	0,60	0,04	0,09	1,15	0,27	0,60

- Число пар полюсов статорной обмотки p , частоту вращения магнитного поля статора n_1 , номинальное $s_{\text{н}}$ и критическое $s_{\text{кр}}$ скольжения.
- Зависимость электромагнитного момента от скольжения $M = f(s)$. Построить графики $M = f(s)$ и $n = f(M)$.
- Значения пускового и критического моментов при уменьшении питающего напряжения на 15%. Указать, можно ли запустить двигатель под нагрузкой $M_{\text{с}} = M_{\text{н}}$ при снижении напряжения на 15%

Числовые значения исходных величин берутся студентами из таблицы

2.2 по варианту, выданному преподавателем.

Таблица 2.2 - Исходные данные к задаче 2 контрольной работы №1 для студентов ЗЭТ – IV

Вариант	Тип	P_H , кВт	U_H , В	n_H , об/МИН	η_H ,%	$\cos \varphi_H$	I_{II}/I_{IH}	M_{max}/M_H
1	4A50A4	0,06	380	1380	50	0,6	2,5	2,2
2	4A50B4	0,09	380	1370	55	0,6	2,5	2,2
3	4A56A4	0,12	380	1375	63	0,66	3,5	2,2
4	4A56B4	0,18	380	1365	64	0,64	3,5	2,2
5	4A63A4	0,25	380	1380	68	0,65	4	2,2
6	4A63B4	0,37	380	1365	68	0,69	4	2,2
7	4A71A4	0,55	380	1390	70,5	0,7	4,5	2,2
8	4A71B4	0,75	380	1390	72	0,73	4,5	2,2
9	4A80A4	1,1	380	1420	75	0,81	5	2,2
10	4A80B4	1,5	380	1415	77	0,83	5	2,2
11	4A90 4	2,2	380	1425	80	0,83	6	2,4
12	4A100 4	3	380	1435	82	0,83	6	2,4
13	4A100 4	4	380	1430	84	0,84	6	2,4
14	4AC71A4	0,6	380	1350	68	0,73	4,5	2,2
15	4AC71B4	0,8	380	1350	68,5	0,75	4,5	2,2
16	4AC80A4	1,3	380	1360	68,5	0,82	5	2,2
17	4AC80B4	1,7	380	1335	70	0,82	5	2,2
18	4AC90 4	2,4	380	1360	76	0,82	6	2,2
19	4AC100 4	3,2	380	1395	76,5	0,82	6	2,2
20	4AC100 4	4,25	380	1395	78	0,82	6	2,2
21	АОЛ2-12	1,1	380	2815	79,5	0,87	6	2,2
22	АОЛ2-22	2,2	380	2860	83	0,89	6,5	2,2
23	АОЛ2-32	4	380	2880	86,5	0,89	6,5	2,2
24	АОЛ2-12	0,8	380	1360	74,5	0,76	6	2,2
25	АОЛ2-22	1,5	380	1400	80	0,81	6	2,2
26	АОЛ2-32	3	380	1430	83,5	0,84	6,5	2,2
27	АОЛ2-12	0,6	380	915	70	0,68	6	2,2
28	АОЛ2-22	1,1	380	930	76	0,73	6	2,2
29	АОЛ2-32	2,2	380	950	81	0,77	6,5	2,2
30	АО2-42-8	3	380	720	80	0,7	6	2,2

2.3 Методические указания к решению задач

2.3.1 Методические указания к решению задачи 2 курсовой работы для студентов 3Т – IV

Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя выполняется в форме таблицы 2.3, где в расчетных формулах используются следующие обозначения:

$$s - \text{скольжение, } s = \frac{n_1 - n}{n_1};$$

r_2'' - добавочное сопротивление, на котором выделяется электрическая мощность, равная механической мощности на валу двигателя;

r_1, x_1 - активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки статора;

r_2', x_2' - приведенное активное и индуктивное сопротивления роторной обмотки;

c_1 - поправочный коэффициент, $c_1 \approx 1 + x_1/x_m$;

I_{1a} - активная составляющая тока статорной обмотки;

U_1 - напряжение на фазе статорной обмотки, $U_1 = U_H / \sqrt{3}$;

r_m, x_m - активное и индуктивное сопротивления намагничивающего контура;

P_1 - активная мощность, подводимая к двигателю из сети;

$P_{пр}$ - механическая мощность двигателя;

$\Delta P_{мех}$ - потери мощности механические;

$\Delta P_{доб}$ - добавочные потери;

P_2 - полезная механическая мощность на валу двигателя;

η - КПД двигателя;

n - частота вращения ротора;

M_2 - полезный момент на валу двигателя.

По результатам расчета таблицы 2.3 строятся рабочие характеристики двигателя: P_1 ; I_1 ; $\cos\phi_1$; η ; M_2 ; s ; $n = f(P_2)$.

Определяются критическое скольжение s_{KP} и максимальное значение момента M_{max} по уравнениям:

$$s_{KP} = \frac{r_2'}{c_1 \frac{x_1 + x_2'}{c_1}}; \quad M_{max} = M_{KP} = \frac{3U_1^2 \frac{r_2'}{s_{KP}}}{\omega_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s_{KP}})^2 + (x_1 + x_2')^2]}, \text{ Нм,}$$

$$\text{где } \omega_1 = 2\pi f \frac{1}{p}.$$

Таблица 2.3 – Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя

№ п/п	Расчетная формула	Скольжение					
		0,005	s_H	0,1	$s_{кр}$	0,3	0,5
1	$r_{2ПР}'' = c_1^2 r_2' (1-s) / s$						
2	$r_2'' = r_{2К}'' + r_{2ПР}''$, где $r_{2К}'' = c_1 r_1 + c_1^2 r_2'$						
3	$z_2^{//2} = r_2^{//2} + x_2^{//2}$, где $x_2^{//} = c_1 x_1 + c_1^2 x_2'$						
4	$D = U_1 / z_2^{//2}$						
5	$I_{2a}'' = D r_2''$						
6	$I_{2p}'' = D x_2^{//}$						
7	$I_{1a} = I_{10a} + I_{2a}''$, где $I_{10a} = U_1 r_0' / z_0'^2$; $z_0'^2 = (r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2$, $r_0' = r_1 + r_m$						
8	$I_{1p} = I_{10p} + I_{2p}''$, где $I_{10p} = U_1 x_0' / z_0'^2$, $x_0' = x_1 + x_m$						
9	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$						
10	$\cos \varphi_1 = I_{1a} / I_1$						
11	$I_2^{//2} = D U_1$						
12	$P_{ПР} = m_1 r_{2ПР}'' I_2^{//2}$						
13	$P_1 = m_1 U_1 I_{1a}$						
14	$\Delta P_{\text{дооб}} = \Delta P_{\text{дообН}} (I_1 / I_{1Н})^2$, где $\Delta P_{\text{дообН}} = 0,005 P_H$						
15	$P_2 = P_{ПР} - \Delta P_{\text{дооб}} - \Delta P_{\text{мех}}$						
16	$\eta = P_2 / P_1$						
17	$n = n_1 (1-s)$						
18	$M_2 = 9,55 P_2 / n$, где P_2 [Вт], n [об/мин], M_2 [Нм]						

Задавая ряд значений скольжения s (0,005; s_H ; 0,1; $s_{кр}$; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0), по уточненной формуле Клосса рассчитывается зависимость $M = f(s)$, строится ее график. Таблица 2.3 должна быть рассчитана для указанных выше значений s . Для заданных s определяются частоты вращения ротора $n = n_1(1-s)$ и изображается механическая характеристика $n = f(M)$.

Из графика рабочих характеристик для $P_2 = P_H$ определяется скольжение s_H , на основании которого по кривой $M = f(s)$ получаем номинальный момент M_H . Из последней характеристики находим также пусковой момент при $s=1$. Тогда относительные значения моментов будут:

$$M^*_{\max} = M_{\max}/M_H; \quad M^*_П = M_П/M_H.$$

2.3.2 Методические указания к решению задачи 2 контрольной работы №1 для студентов ЗЭТ – IV

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети при номинальной нагрузке, $P_{\text{иH}} = P_H/\eta_H$.

Указанная мощность $P_{\text{иH}} = \sqrt{3} U_{\text{иH}} I_{\text{иH}} \cos\varphi_H$. Из данного уравнения можно определить $I_{\text{иH}}$, а имея кратность пускового тока – рассчитать саму величину пускового тока $I_{\text{пH}}$.

Номинальный момент на валу двигателя $M_H = 9,55 P_H/n_H$, а критический (максимальный) $M_{\text{кр}} = \kappa_M M_H$, где κ_M – кратность максимального момента, $\kappa_M = M_{\text{кр}}/M_H$. По заданию имеем номинальную частоту вращения двигателя n_H , $n_H = n_1(1-s_H)$. Величина n_H в двигательном режиме работы асинхронной машины всегда несколько меньше частоты вращения магнитного поля статора n_1 . Последняя зависит от числа пар полюсов статорной обмотки p .

При $p = 1$ $n_1 = 60f/p = 60 \cdot 50/1 = 3000$ об/мин; $p = 2$ $n_1 = 1500$ об/мин; $p = 3$ $n_1 = 1000$ об/мин и т.д.

Если, например, по заданию $n_H = 1415$ об/мин, то ближайшее большее значение $n_1 = 1500$ об/мин и $p = 2$.

Имея n_1 и n_H можно определить номинальное скольжение s_H . Тогда, используя упрощенную формулу Клосса (2-22), из условия номинального режима работы можно определить критическое скольжение $s_{\text{кр}}$.

Зависимость момента от скольжения $M = f(s)$ определяется по той же формуле (2-22). Для этого задаются рядом значений скольжения s (0,005; s_H ; 0,1; $s_{\text{кр}}$; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0) и для каждого из них по указанной формуле рассчитывается момент. Строится график $M = f(s)$.

Для тех же значений скольжения определяется частота вращения ротора n , $n = n_1(1-s)$. Используя зависимости $M = f(s)$, $n = f(s)$, можно построить график механической характеристики $n = f(M)$.

Из графика $M = f(s)$ при $s = 1$ определяется $M_П$.

Вращающий момент асинхронного двигателя зависит от U_1^2 . При снижении напряжения на 15% получим новые значения моментов $M'_П = (0,85)^2 M_П$, $M'_{\max} = (0,85)^2 M_{\max}$. Если $M'_П$ будет больше момента нагрузки M_C ($M_C = M_H$), то двигатель запустится, если $M'_П < M_C$, то – нет.

3 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1 Теоретические сведения, необходимые для выполнения курсовой и контрольной работ

Машиной постоянного тока называется электрическая машина, обмотка якоря которой соединяется с электрической сетью постоянного тока с помощью механического преобразователя частоты - коллектора и щеток. Машина постоянного тока используется в промышленности в качестве двигателя и генератора. Как двигатель она имеет большое достоинство – простоту и плавность регулирования частоты вращения.

К номинальным данным машины относятся: номинальная мощность (для генераторов – полезная мощность на зажимах машины, отдаваемая в сеть, для двигателей – полезная механическая мощность на валу); ток цепи якоря, напряжение на главных зажимах машины, частота вращения и коэффициент полезного действия.

3.1.1 Конструкция и принцип действия машины постоянного тока

Машина постоянного тока включает в себя станину – неподвижную часть и якорь – вращающуюся часть (рисунок 3.1). К станине крепятся сердечники полюсов с обмоткой возбуждения, по которой протекает постоянный ток,

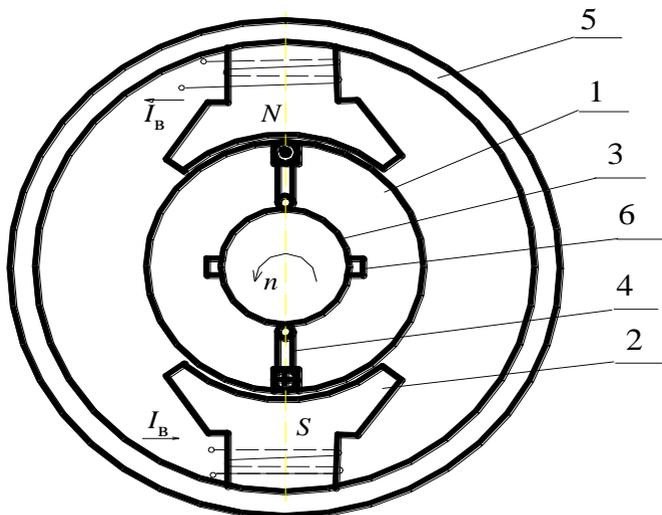


Рисунок 3.1 Эскиз конструкции машины постоянного тока: 1- якорь; 2- главный полюс; 3- коллектор; 4- соединение обмотки якоря с коллектором; 5- станина; 6- щетка

создающий магнитный поток возбуждения Φ_v . На якоре размещается двухслойная обмотка, в которой при вращении якоря индуцируется ЭДС.

При заданном направлении вращения якоря направление ЭДС, индуцируемой в проводниках, зависит только от того, под каким полюсом находится проводник. Поэтому во всех проводниках, расположенных под одним полюсом, направление ЭДС одинаковое и сохраняется таким независимо от частоты вращения.

При вращении якоря проводники обмотки перемещаются от одного полюса к другому, ЭДС, индуцируемая в них, меняет знак, т.е. в каждом проводнике наводится переменная ЭДС. Чтобы выпрямить полученный переменный ток, т.е. заставить его течь во внешней цепи неизменно в одном направлении, используют коллектор.

Процесс выпрямления ЭДС будет происходить в наиболее благоприятных условиях, если установить щетки на коллекторе так, чтобы переход каждой из щеток с одной пластины на другую происходил как раз в тот момент времени, когда наводимая в витке ЭДС равна нулю.

Таким образом, главной особенностью машины постоянного тока является наличие коллектора и скользящего контакта между обмоткой якоря и внешней электрической цепью.

3.1.2 Схемы включения машин постоянного тока

Свойства машин постоянного тока определяются в основном способом питания обмотки возбуждения. В зависимости от этого машины бывают:

- 1) независимого возбуждения – обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника постоянного тока;
- 2) параллельного возбуждения – обмотка возбуждения подключена к обмотке якоря параллельно;
- 3) последовательного возбуждения – обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря (используются такие машины как двигатели);
- 4) смешанного возбуждения – имеются две обмотки возбуждения: одна - параллельная, другая – последовательная.

Устройство отмеченных машин одинаковое, отличаются они лишь выполнением обмотки возбуждения. Обмотки независимого и параллельного возбуждения, имеющие большое число витков, изготавливают из провода малого сечения, а обмотку последовательного возбуждения, имеющую небольшое число витков, - из провода относительно большого сечения.

На рисунке 3.2 приведены схемы включения двигателей (а- с независимым; б- с параллельным; в- с последовательным; г- со смешанным

возбуждением) и обозначения выводов обмоток данных двигателей. Машины с обоими видами возбуждения можно включать двумя способами: так, чтобы МДС параллельной и последовательной обмоток складывались (согласное включение) или вычитались (встречное включение).

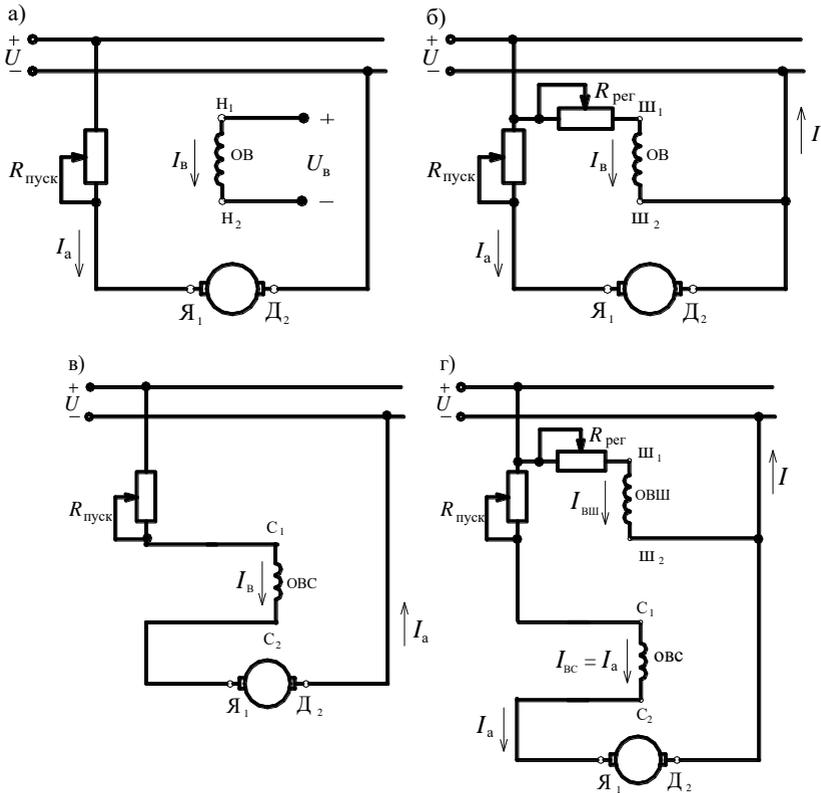


Рисунок 3.2 Схемы включения двигателей постоянного тока

3.1.3 Магнитный поток и магнитная цепь машины постоянного тока

Магнитной цепью машины постоянного тока называется замкнутый путь, вдоль которого распределяются линии магнитного потока. В основу расчета магнитной цепи положен закон полного тока

$$\sum H\Delta l = \sum Iw, \quad (3-1)$$

т.е. сумма произведений из напряженности магнитного поля H и длины участка Δl с этой напряженностью равна магнитодвижущей силе F , $F = \sum Iw$. В обеих частях равенства суммирование производится по

рассматриваемому замкнутому пути. Величина $H_i \Delta l_i = U_{Mi}$ называется падением магнитного напряжения на i -том участке.

Для расчета магнитной цепи машины постоянного тока последняя разбивается на ряд участков, чтобы в пределах каждого индукция и материал были неизменными. При этом принимаются следующие допущения:

1) магнитные линии в зубцах, воздушном зазоре между якорем и полюсными наконечниками, а также в сердечниках полюсов направлены радиально, а в ярме станины и якоря – по дугам, описанным из центра машины;

2) в любом сечении стальных участков поток распределен равномерно, а за расчетную магнитную линию принимают линию, проведенную посередине поперечного сечения участка;

3) выпучиванием магнитных линий на торцах машины на ее расчетной длине пренебрегают;

4) поверхности станины и якоря считают гладкими, а увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора, обусловленное зубчатым его строением, учитывают путем увеличения расчетной величины зазора.

На рисунке 3.3 приведены характерные участки магнитной цепи машины с числом полюсов $2p=4$. К ним относятся: δ - воздушный зазор; h_z - зубцы якоря; L_a – ярмо якоря; h_m – сердечник полюса; $L_{я}$ – ярмо станины. Суммарная МДС на полюс

$$F_{\text{в}} = U_{M\delta} + U_{Mz} + U_{Ma} + U_{Mm} + U_{Mя}, \quad (3-2)$$

где $U_{M\delta} = H_{\delta} \delta'$; $U_{Mz} = H_z h_z$; $U_{Ma} = H_a L_a$; $U_{Mя} = H_{я} L_{я}$; $U_{Mm} = H_m h_m$.

Здесь $\delta' = k_{\delta} \delta$ – эквивалентный воздушный зазор.

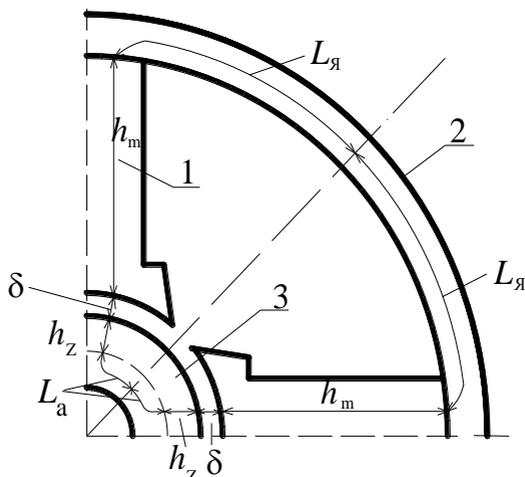


Рисунок 3.3 Магнитная цепь машины постоянного тока:
1 – главный полюс; 2 – станина; 3 – якорь

Расчет магнитной цепи выполняется в следующем порядке. Сначала определяется поток полюса Φ , а затем по известному сечению S_i i -того стального участка или зазора рассчитывается магнитная индукция данного участка $B_i = \Phi / S_i$. Имея B_i , по кривой намагничивания материала определяем напряженность поля H_i . Так как все геометрические размеры машины заранее известны, то можно теперь рассчитывать падение магнитного напряжения на i -том участке U_{mi} .

Напряженность магнитного поля H_δ воздушного зазора определяют по формуле

$$H_\delta = B_\delta / \mu_0, \quad (3-3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м), B_δ (Тл), H_δ (А/м).

3.1.4 Якорные обмотки машин постоянного тока

Якорные обмотки машин постоянного тока выполняются двухслойными и образуются из ряда изолированных секций, соединенных между собой на коллекторных пластинах. Секции состоят из одного ($w_c = 1$) или из нескольких ($w_c > 1$) витков. Стороны секции размещаются в пазах в два слоя: одна из сторон секции лежит в верхнем, обращенном к зазору, слое, другая

– в нижнем. Несколько секций, имеющих общую изоляцию от стенок паза, образуют катушку обмотки.

Число секций в катушке или в пазу обозначается через $u_{\text{п}}$. При составлении схемы обмотки пользуются понятием элементарного паза – частью паза якоря, содержащей две расположенные друг под другом секционные стороны.

Число элементарных пазов якоря $Z_{\text{э}}$ равно числу секций в обмотке S и числу коллекторных пластин K , т.е.

$$Z_{\text{э}} = S = K = \frac{N}{2w_c}, \quad (3-4)$$

где N – число эффективных проводников обмотки.

Число элементарных пазов в одном реальном пазу или число секций в катушке (пазу)

$$u_{\text{п}} = Z_{\text{э}} / Z,$$

где Z – число реальных пазов якоря.

Схемы обмоток изображаются графически, при этом цилиндрическая поверхность якоря вместе с обмоткой разворачивается на плоскость чертежа, образуя развернутую схему. На данной схеме верхние стороны секции представляются сплошными линиями, нижние – штриховыми.

Так как порядок соединения активных сторон секций не зависит от количества витков в секции w_c , то для простоты на схеме всегда изображаются одновитковые секции.

Порядок соединения секций между собой и коллектором устанавливается шагами обмотки и показывается на схеме.

Шаги обмотки измеряются в элементарных пазух: y_1 – первый шаг обмотки, равный ширине секции; выбирается близким к полюсному делению τ ($\tau = Z_{\text{э}} / 2p$); y_2 – второй шаг, равный расстоянию между нижней стороной одной из секций и верхней стороной следующей по обходу секции; y – результирующий шаг, равный сдвигу секций, следующих одна за другой по схеме обмотки.

Различают якорные обмотки трех основных типов: петлевые, волновые и комбинированные. На практике наибольшее распространение имеют простая петлевая и простая волновая обмотки.

В петлевой обмотке начало следующих друг за другом секций находятся под одним полюсом. Простой петлевой называется такая обмотка, в которой начало и конец секции присоединяются к рядом расположенным пластинам коллектора (рисунок 3.4, а).

а)

б)

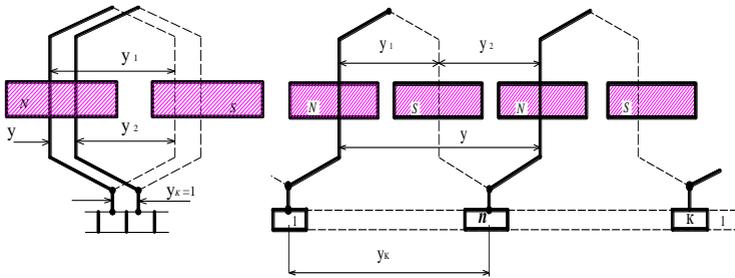


Рисунок 3.4 Соединение секций обмоток:
а- простой петлевой; б- простой волновой

Шаги простой петлевой обмотки:

$$y_1 = Z_s / (2p) \pm \varepsilon; \quad y = \pm 1; \quad y_2 = y_1 - y; \quad 2a = 2p, \quad (3-5)$$

где ε - укорочение или удлинение шага обмотки с целью получения целого y_1 ; p - число пар полюсов; a - число пар параллельных ветвей (щеток, касаясь коллектора, делят всю якорную обмотку на ряд параллельных ветвей).

При волновой обмотке начало следующих друг за другом секций по схеме находятся под разными полюсами, но одной и той же полярности. Простой волновой обмоткой называется такая обмотка, когда после одного обхода окружности якоря, т.е. последовательного соединения p секций, приходят к коллекторной пластине, расположенной рядом с исходной (рисунок 3.4, б).

Шаги простой волновой обмотки:

$$y = y_k = (Z_s \pm 1) / p; \quad y_1 = Z_s / (2p) \pm \varepsilon; \quad y_2 = y - y_1; \quad 2a = 2. \quad (3-6)$$

На развернутых схемах обмоток показываются места расположения щеток. Число щеток зависит от числа полюсов машины. При симметричных секциях щетки должны быть расположены против середины полюсов на расстоянии $y_{щ} = K / 2p$ коллекторных пластин. Все щетки одинаковой полярности соединяются друг с другом.

3.1.5 Основные уравнения машин постоянного тока

ЭДС якорной обмотки

$$E = E_{\text{ВЕТВИ}} = \frac{pN}{60a} n\Phi = c_v n\Phi, \quad (3-7)$$

где $E_{\text{ветви}}$ – ЭДС параллельной ветви обмотки якоря; c_E – коэффициент, определяемый конструктивными параметрами машины и не зависящий от режима ее работы, $c_E = \frac{pN}{60a}$; p – число пар полюсов; N – число эффективных проводников обмотки якоря; a – число пар параллельных ветвей; n – частота вращения якоря; Φ – магнитный поток на один полюс.

При работе машины постоянного тока под нагрузкой по проводникам ее якорной обмотки протекает ток. В результате на якорь действует электромагнитный момент

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = c_M \Phi I_a, \quad (3-8)$$

где p , N , a , Φ – имеют тот же смысл, что и в уравнении ЭДС якорной обмотки (3-7);

c_M – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров машины, $c_M = 9,55 c_E$; I_a – ток всей якорной обмотки.

Отмеченный момент в двигательном режиме является вращающим, в генераторном – тормозным.

Уравнение напряжения имеет вид:

– для генераторного режима $U_r = E - I_a R_a$; (3-9)

– для двигательного режима $U_d = E + I_a R_a$, (3-10)

где E – ЭДС якорной обмотки; R_a – сопротивление данной обмотки.

3.1.6 Двигатели постоянного тока

Как уже отмечалось ранее по способу включения обмотки возбуждения все двигатели постоянного тока делятся на следующие типы (рисунок 3.2):

- а) двигатели параллельного возбуждения;
- б) двигатели последовательного возбуждения;
- в) двигатели смешанного возбуждения.

Из основного уравнения напряжения для двигательного режима имеем

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - c_E n \Phi}{R_a} \quad (3-11)$$

При пуске двигателя $n = 0$ и $I_{a \text{ пуск}} = U / R_a \gg I_{a \text{ н}}$ (3-12)

С целью ограничения пускового тока последовательно с якорем включается пусковой реостат, величина сопротивления которого должна обеспечивать

$$I_{a \text{ пуск}} = \frac{U}{R_a + R_{\text{пуск}}} = (2 - 2,5)I_{a \text{ н}} \quad (3-13)$$

Из последнего уравнения получаем

$$R_{\text{пуск}} = \frac{U}{(2 - 2,5)I_{a \text{ н}}} - R_a \quad (3-14)$$

В процессе пуска двигателя по мере увеличения оборотов величина $R_{\text{пуск}}$ должна уменьшаться и после пуска она должна быть равна нулю.

Двигатель параллельного возбуждения

В этом двигателе (рисунок 3.5) обмотка возбуждения подключена параллельно с обмоткой якоря к сети. В цепь обмотки возбуждения включен регулировочный реостат $R_{\text{рег}}$, а в цепь якоря – пусковой реостат $R_{\text{пуск}}$.

Характерной особенностью двигателя является то, что ток возбуждения I_b не зависит от тока якоря I_a . Поэтому, пренебрегая размагничивающим действием реакции якоря, можно считать, что и поток двигателя не зависит от нагрузки. При этом условии моментная (рисунок 3.6) и скоростная

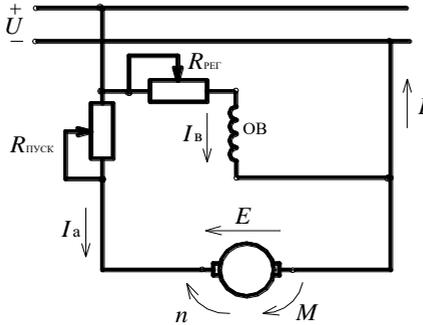


Рисунок 3.5 Схема двигателя параллельного возбуждения

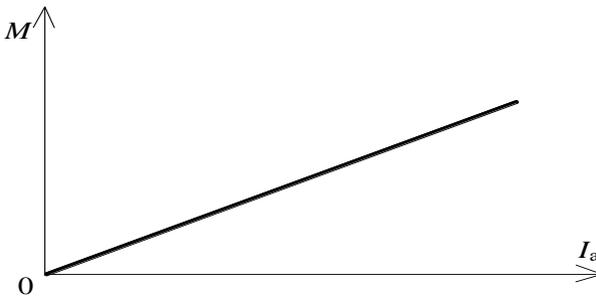


Рисунок 3.6 Зависимость $M = f(I_a)$ для двигателя параллельного

возбуждения

(рисунок 3.7) характеристики будут линейными. Следовательно, линейной будет и механическая характеристика двигателя $n = f(M)$ (рисунок 3.8).

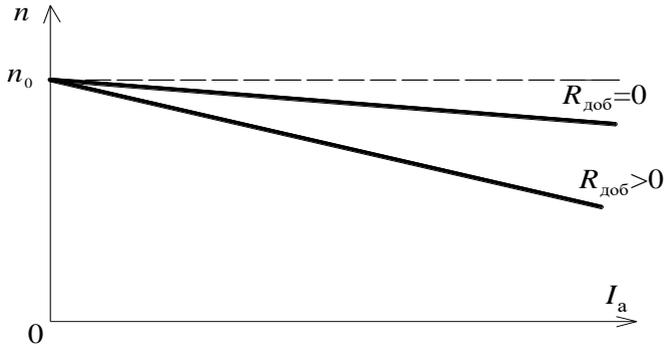


Рисунок 3.7 Скоростная характеристика двигателя параллельного возбуждения

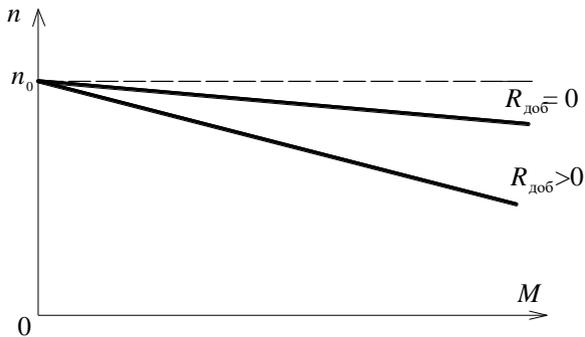


Рисунок 3.8 Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения

Моментная характеристика

$$M = c_M \Phi I_a = \kappa I_a \quad . \quad (3-15)$$

Из уравнения $U = c_E n \Phi + I_a \sum R$ имеем скоростную характеристику

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - I_a \frac{\sum R}{c_E \Phi} = n_0 - \Delta n \quad , \quad (3-16)$$

где $\Sigma R = R_a + R_{\text{доб}}$; $\Delta n = I_a \frac{\Sigma R}{c_E \Phi}$.

Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - M \frac{\Sigma R}{c_M c_E \Phi^2} \quad (3-17)$$

Регулировочный реостат $R_{\text{рег}}$ позволяет изменять ток возбуждения двигателя I_b и его магнитный поток Φ . При этом будет изменяться и частота вращения n .

На рисунке 3.9 изображены рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения. Они представляют собой зависимости потребляемой мощности P_1 , тока I_a , частоты вращения n , момента M и КПД η , от отдаваемой мощности P_2 на валу двигателя при $U = \text{const}$ и $I_b = \text{const}$. Характеристики $n = f(P_2)$ и $M = f(P_2)$, как следует из рассмотренных выше положений, являются линейными, а зависимости $P_1 = f(P_2)$, $I_a = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ имеют характер, общий для всех электрических машин.

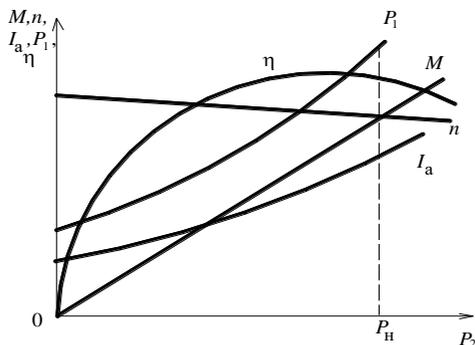


Рисунок 3.9 Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Двигатель последовательного возбуждения

В данном двигателе (рисунок 3.2,в) ток возбуждения $I_b = I_a$, поэтому магнитный поток Φ является функцией тока якоря I_a . При токе якоря $I_a < (0.8 \div 0.9) I_{aн}$ магнитная система машины не насыщена, поэтому $\Phi = k_{\Phi} I_a$ (рисунок 3.10).

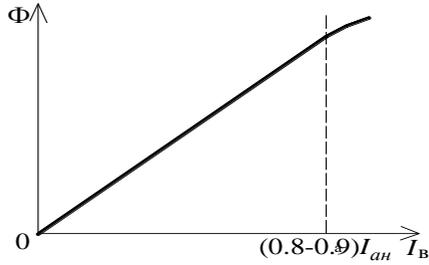


Рисунок 3.10 Зависимость $\Phi = f(I_b)$ для двигателя последовательного возбуждения

Уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{U - I_a \Sigma R}{c_E \Phi} = \frac{U}{c_E k_\Phi I_a} - \frac{I_a \Sigma R}{c_E k_\Phi I_a} = \frac{c_1 U}{I_a} - c_2, \quad (3-18)$$

где c_1, c_2 – постоянные.

Следовательно, скоростная характеристика $n = f(I_a)$ имеет вид гиперболы (рисунок 3.11).

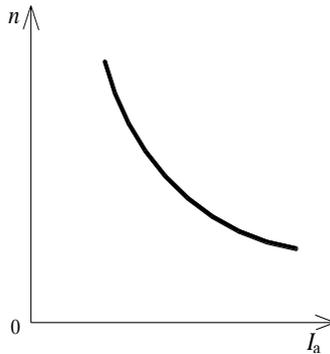


Рисунок 3.11 Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения

Аналогично может быть получена зависимость электромагнитного момента от тока якоря $M = f(I_a)$. При $I_a < (0,8 \div 0,9)I_{ан}$.

$$M = c_M \Phi I_a = c_M k_\Phi I_a^2 = c_3 I_a^2, \quad (3-19)$$

где c_3 – постоянная.

Зависимость $M = f(I_a)$ имеет форму параболы (рисунок 3.12).

Свойства двигателя развивать момент, приблизительно пропорциональный квадрату тока, имеет важное значение, особенно в тех случаях, когда нужен большой пусковой момент (краны, электровозы, тепловозы, и т.п.), и там, где необходима большая (до 300%) перегрузочная способность двигателя.

Следует при этом отметить характерную разницу между двигателями параллельного и последовательного возбуждения. При увеличении момента в два раза в двигателе параллельного возбуждения из-за $\Phi = \text{const}$ ток якоря I_a и мощность P_1 возрастают также в два раза при почти неизменной частоте вращения. У двигателя последовательного возбуждения дело обстоит иначе. Если двигатель не насыщен ($\Phi \equiv I_a$), то двойной момент создается за счет увеличения как тока I_a , так и потока Φ в $\sqrt{2}$ раз, мощность двигателя UI_1 , увеличивается тоже в $\sqrt{2}$ раз, а его частота вращения уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Следовательно, при изменении нагрузочного момента в широких пределах у данного двигателя мощность P_1 , ток I_a изменяются в меньших пределах, чем у двигателей параллельного возбуждения.

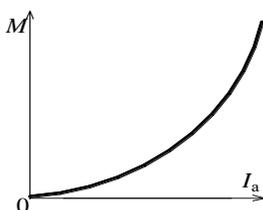


Рисунок 3.12 Зависимость $M = f(I_a)$ для двигателя последовательного возбуждения

Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения (рисунок 3.13) может быть построена на основании зависимости $n = f(I_a)$ и $M = f(I_a)$. При токе якоря, меньшем $(0,8 \div 0,9)I_{ан}$, частота вращения изменяется по закону

$$n = \frac{U}{c_E k_\phi \sqrt{M / (c_M k_\phi)}} - \frac{\Sigma R}{c_E k_\phi} = c_1'' \frac{U}{\sqrt{M}} - c_2 \quad , \quad (3-20)$$

где c_1'' – постоянная.

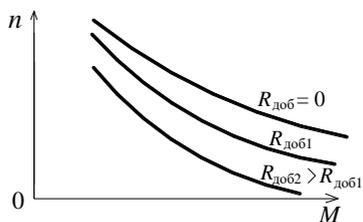


Рисунок 3.13 Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

При $R_{доб} = 0$ имеем естественную механическую характеристику, если $R_{доб} > 0$ – искусственные (реостатные). Механические характеристики являются «мягкими» и имеют, как и скоростные, также гиперболический характер. При малых нагрузках двигатель идет в «разнос». Поэтому такие двигатели нельзя применять для привода механизмов, работающих в режиме холостого хода и при небольшой нагрузке (различные станки, транспортеры и пр.). Обычно минимально допустимая нагрузка составляет $(0,2 \div 0,25) I_{ан}$.

На рисунке 3.14 приведены рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

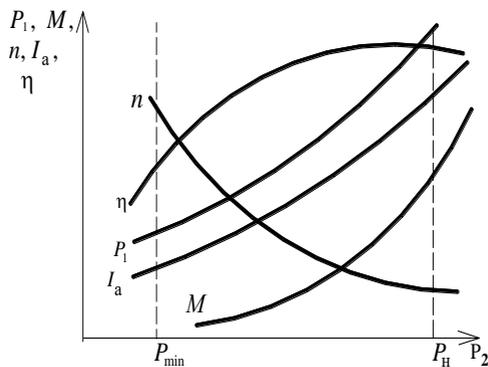


Рисунок 3.14 Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

3.2 Задания на выполнение курсовой и контрольной работ по разделу «Машины постоянного тока»

3.2.1 Задача 3 курсовой работы для студентов ЗТ-IV

Необходимо:

1. Вычертить эскиз магнитной цепи для одной пары полюсов и произвести поперечный расчет магнитной цепи при холостом ходе, построить кривую намагничивания $\Phi_{\delta} = f(F_{\text{в}})$, определить коэффициент насыщения магнитной цепи.

2. Рассчитать и вычертить схему - развертку обмотки якоря и схему ее параллельных ветвей, для чего следует:

а) определить параметры обмотки – число секций S , число витков в секции w_c , шаги y_1, y_2, y .

б) составить таблицу обмотки;

в) вычертить схему-развертку обмотки, нанести на нее контуры главных и дополнительных полюсов, задать направление вращения якоря и определить полярность щеток и дополнительных полюсов;

г) вычертить схему параллельных ветвей обмотки якоря, указав номера секций.

При выполнении работы принять, что сердечники якоря, главных и дополнительных полюсов набраны из листов электротехнической стали марок 1211 и 1212 толщиной 0,5 мм ($\kappa_c = 0,93$); материал станины – литая сталь. Паза якоря открытые, с параллельными стенками.

Числовые значения исходных величин берутся согласно двум последним цифрам учебного шифра студента по таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные к задаче 3 курсовой работы для студентов ЗТ-IV

Наименование величины	По предпоследней цифре шифра	Номера вариантов									
		По последней цифре шифра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число пар полюсов, p	0-9	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
Расчетный коэффициент полюсной дуги α_s	0,2,4,7,9	0,64	0,68	0,67	0,71	0,72	0,69	0,66	0,70	0,68	0,65
	1,3,5,6,8	0,68	0,72	0,65	0,70	0,69	0,65	0,68	0,72	0,70	0,67
Диаметр якоря D_a , мм	0,2,4,6,8	245	493	327	368	228	330	315	480	280	470
	1,3,5,7,9	261	450	294	380	220	320	340	493	210	420
Активная длина якоря l_a , мм	0,1	245	460	240	370	290	330	320	345	260	360
	2,3	240	330	230	360	320	340	310	340	250	370
	4,5	235	320	280	330	310	385	280	290	245	340
	6,7	230	240	245	260	300	335	276	330	240	350
	8,9	245	250	255	280	315	350	270	300	245	345
Отношение t_1/b_{z3}	0,3,5,7,8	3,0	2,5	2,9	2,7	3,2	2,7	2,8	2,5	3,0	2,5
	1,2,4,6,9	3,2	2,6	3,0	2,8	3,3	2,9	3,0	2,6	3,1	2,6
Воздушный зазор δ , мм	0-9	2,5	4,7	3,0	3,5	2,2	3,3	3,0	4,5	2,7	4,2

Высота паза h_z , мм	0-9	32	51	40	47	34	41	39	49	37	48
Высота главного полюса h_m , мм	0-9	65	110	73	92	71	82	70	108	84	79
Коэффициент магнитного рассеяния σ Тип обмотки	0-9	1,17	1,25	1,1	1,21	1,23	1,22	1,09	1,27	1,24	1,15
	0,2,4,6,8 1,3,5,7,9	петл волн									
Число пазов якоря Z	0,1,5,8	30	58	39	51	23	44	40	74	25	66
	2,3,7	31	59	40	52	24	45	41	75	26	67
	4,6,9	32	61	41	53	25	46	42	76	27	68
Напряжение питания U , В	0,1,2,3,4	220	165	330	150	220	220	330	220	220	165
	5,6,7,8,9	230	220	440	220	330	330	440	440	330	330
Частота вращения n , об/мин	0,2,4,6,8	1300	1150	1000	1100	1500	1200	1500	850	1200	750
	1,35,7,9	1300	600	1000	750	1500	1000	1500	600	1000	600
Режим работы машины	0,1,2,3,4	двиг.									
	5,6,7,8,9	ген.									

Примечания

1. Сердечник якоря выполнен без радиальных вентиляционных каналов, поэтому длина пакетов якоря l_c равна активной длине якоря l_a .

Осевая длина полюсного наконечника l_m на 5 мм меньше длины якоря l_a .

Расчетная длина якоря при этом $l_\delta = \frac{l_a + l_m}{2}$.

2. Высоту спинки якоря h_a , толщину станины (ярма) h_y и ширину сердечника главного полюса b_m необходимо выбрать так, чтобы при номинальном значении потока в воздушном зазоре $\Phi_{\delta n}$ значения магнитной индукции лежали в пределах :

в сердечнике якоря $B_{ан} = 1,2-1,5$ Тл;

в ярме $B_{ян} = 1,1-1,2$ Тл;

в сердечнике главных полюсов $B_{пнн} = 1,2-1,6$ Тл.

Осевая длина ярма равна $l_y = l_a + 0,4D_a$.

3.2.2 Задача 1 контрольной работы № 2 для студентов ЗЭТ-IV

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения характеризуется следующими номинальными величинами: мощность на валу P_n , напряжение на зажимах двигателя U_n , частота вращения n_n , потери мощности в цепях якоря $\Delta P_{ан}$, коэффициент полезного действия η_n , процентное значение тока возбуждения $i_{вн}\%$.

Определить:

1. При номинальном режиме работы момент на валу двигателя M_n , ток якоря $I_{ан}$, ток обмотки возбуждения $I_{вн}$ и ток, потребляемый из сети I_n .
2. Сопротивление цепи возбуждения R_v и цепи якоря R_a , сопротивление пускового реостата $R_{пуск}$, чтобы пусковой ток был в 2,5 раза больше номинального.
3. Рассчитать и построить графики зависимостей $n=f(I_a)$, $n=f(M)$, $\eta=f(I_a)$.
4. Определить пределы изменения частоты вращения двигателя при регулировании добавочного сопротивления в цепи якоря от 0 до $4 R_a$ и токе $I_a = I_{ан}$.

Числовые значения исходных величин берутся студентом из таблицы 3.2 по варианту, выданному преподавателем

Таблица 3.2 – Исходные данные к задаче 1 контрольной работы №2
для студентов ЗЭТ-IV

Номер варианта	Тип двигателя	U_n , В	P_n , кВт	n_n , об/мин	η_n , %	$i_{вн}$, %	$\Delta P_{ан}$, Вт
1	П11	110	0,7	3000	73,5	10	100
2	П11	220	0,3	1500	64	9	80
3	П11	110	0,13	1000	59	10	50
4	П12	110	1	3000	76	9	120
5	П12	220	0,45	1500	70	8	75
6	П12	110	0,2	1000	65,5	12	40
7	П21	110	1,5	3000	76	8	200
8	П21	220	0,7	1500	74	10	80
9	П21	110	0,3	1000	80,5	5	32
10	П22	110	2,2	3000	80	9	200
11	П22	220	1	1500	76,5	8	145
12	П22	110	0,45	1000	72	10	75
13	П31	110	3,2	3000	83	6	250
14	П31	220	1,5	1500	78,5	10	160
15	П31	110	0,7	1000	75	7	120
16	2ПН90МУ	110	1	3000	86	5	60
17	2ПН90МУ	220	0,37	1500	66	14	87
18	2ПН90МУ	110	0,25	1500	75	7	40
19	2ПН90МУ	110	0,17	750	73	8	28
20	2ПН100МУ	220	2	3000	75	10	250
21	2ПН100МУ	110	0,75	1500	64	8	150
22	2ПН100МУ	110	0,5	1000	62	12	100
23	2ПН90ЛУ	220	1,3	3000	71	10	200
24	2ПН90ЛУ	110	0,55	1500	76	9	70
25	2ПН90ЛУ	220	0,34	1000	77	10	35
26	2ПН90ЛУ	110	0,2	750	67	7	34
27	Д12	220	2,5	1140	85	8	180
28	Д21	220	4,5	1030	82,5	5	400
29	Д21	220	5,5	1440	83	5	450
30	Д22	220	6	1100	85	4	470

3.2.3 Задача 2 контрольной работы №2 для студентов ЗЭТ – IV

Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения при номинальном режиме работы имеет: напряжение на зажимах двигателя U_n , мощность на валу P_n , частоту вращения n_n , потери мощности в обмотке якоря $\Delta P_{ан}$ и в обмотке возбуждения $\Delta P_{вн}$, прочие потери мощности ΔP_m .

Определить:

1. Мощность, потребляемую из сети $P_{1н}$, ток двигателя I_n , момент на валу M_n .
2. Сопротивление якорной обмотки R_a и обмотки возбуждения R_b .
3. Построить зависимости частоты вращения якоря и момента от тока якоря, т.е. $n = f(I_a)$ и $M = f(I_a)$. Используя указанные зависимости, рассчитать и построить механическую характеристику двигателя $n = f(M)$.

Примечание. При выполнении пункта 3 воспользоваться зависимостью $\phi\% = f(i_B\%)$, приведенной в таблице

ϕ %	5	26	48	70	90	100
i_B %	0	20	40	60	80	100

Числовые значения исходных величин берутся студентом из таблицы 3.3 по варианту, выданному преподавателем.

Таблица 3.3 – Исходные данные к задаче 2 контрольной работы №2 для студентов ЗЭТ-IV

Номер варианта	Тип двигателя	P_n , Вт	U_n , В	n , об/мин	$\Delta P_{ан}$, Вт	$\Delta P_{вн}$, Вт	$\Delta P_{м}$, Вт
1	МСП-0,25	250	30	1460	37	34	44
2	МСП-0,25	250	100	1700	29	15	56
3	МСП-0,25	550	200	3600	33	17	87
4	МСП-0,25	250	160	1700	44	24	32
5	МСП-0,15	150	30	850	27	21	62
6	МСП-0,15	150	110	850	35	22	65
7	МСП-0,15	150	160	850	27	25	65
8	МСП-0,1	100	30	1300	50	47	23
9	МСП-0,1	100	100	1500	26	26	18
10	МСП-0,1	100	160	1500	26	33	12
11	Д12	2500	220	1100	310	300	50
12	Д21	4500	220	900	650	560	90
13	Д22	6000	220	850	600	580	120
14	Д21	5500	220	1200	620	47	110
15	Д21	4000	440	1050	500	420	80
16	Д31	6700	440	800	650	620	130
17	Д22	7000	440	1180	660	600	140
18	Д31	8000	220	800	740	700	160
19	Д32	12000	220	675	650	550	240
20	Д41	16000	220	650	800	760	320
21	Д31	12000	220	1100	600	590	240
22	Д32	18000	220	960	1520	1480	360
23	Д41	15000	440	660	1400	1300	300
24,	Д32	17000	440	970	1360	1300	340
25	Д806	22000	220	575	1660	1600	440
26	Д41	14000	220	970	1770	1680	480
27	Д806	32000	220	900	2160	2000	640
28	Д808	37000	220	525	2560	2200	740
29	Д808	37000	440	500	2500	2300	700
30	Д806	32000	440	950	1800	1780	650

3.3 Методические указания к решению задач

3.3.1 Методические указания к решению задачи 3 курсовой работы для студентов 3Т-IV

Эскиз магнитной системы машины постоянного тока для одной пары полюсов (рисунок 3.3) следует начертить на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1 или 1:2, указав размеры и границы участков магнитной цепи. Окончательно все необходимые размеры определяются после расчета высоты спинки якоря h_a , толщины ярма $h_{я}$, и ширины сердечника главного полюса b_m .

Поверочный расчет магнитной цепи заключается в определении МДС обмотки возбуждения на полюс $F_B = w_B I_B$, необходимой для создания заданного основного потока $\Phi_{\delta H}$. Расчет производится на основе закона полного тока

$$\oint (\bar{H}d\bar{l}) = \sum i, \quad (3-21)$$

согласно которому линейный интеграл по замкнутому контуру от вектора напряженности магнитного поля \bar{H} равен сумме токов, охваченных контуром интегрирования.

Для расчета магнитную цепь разбивают на отдельные участки: воздушный зазор δ , зубцовый слой якоря h_z , сердечник главного полюса с полюсным наконечником h_m , спинка якоря L_a , и ярмо станины $L_{я}$.

Принимая значение напряженности поля на каждом участке (кроме зубцов) H_j неизменной вдоль магнитной линии длиной L_j и учитывая, что направление обхода контура на указанных участках совпадает с вектором напряженности поля, интеграл в левой части уравнения заменяют суммой

$$\sum U_{Mj} = F_B, \quad (3-22)$$

где U_{Mj} – магнитное напряжение j -го участка, H_j – расчетное значение напряженности поля на j -ом участке.

С учетом принятых обозначений рисунка 3.3 получим

$$U_{M\delta} + U_{Mz} + U_{Ma} + U_{Mm} + U_{Mya} = F_B = w_B I_B, \quad (3-23)$$

где $U_{M\delta} = \delta' H_{\delta} = \delta' B_{\delta} / \mu_0$; $U_{Mz} = h_z H_{zр}$;

$$U_{Mm} = h_m H_m; \quad U_{Ma} = L_a H_a; \quad U_{Mya} = L_{я} H_{я}.$$

Напряженности поля H_m , H_a и $H_{я}$ находят с помощью кривых намагничивания сталей по значениям индукции на соответствующих участках:

$$B_a = \Phi_a / S_a; \quad B_m = \Phi_m / S_m; \quad B_{я} = \Phi_{я} / S_{я};$$

где $\Phi_a = \Phi_{\delta} / 2$; $\Phi_m = \sigma \Phi_{\delta}$; $\Phi_{я} = \Phi_m / 2$; $\Phi_{\delta} = B_{\delta} S_{\delta} = B_{\delta} l_{\delta} b_{\delta}$.

Для определения значений H_a , H_m и H_y необходимо воспользоваться кривыми намагничивания, приведенными в таблицах П1 и П2 приложения.

Для расчета магнитного напряжения зубцового слоя якоря находят значения магнитной индукции в нижнем ($B_z'3$), среднем ($B_z'2$) и верхнем ($B_z'1$) сечениях зубца.

При $B_z'i \leq 1,8$ Тл значения H_{zi} находят по табл. П1 приложения, а при $B_z'i > 1,8$ Тл – по кривым рисунка 3.15, учитывающим вытеснение поля в паз.

Расчет магнитной цепи необходимо выполнить для четырех значений основного магнитного потока: $0,5\Phi_{\delta H}$; $0,75\Phi_{\delta H}$; $\Phi_{\delta H}$; $1,25\Phi_{\delta H}$.

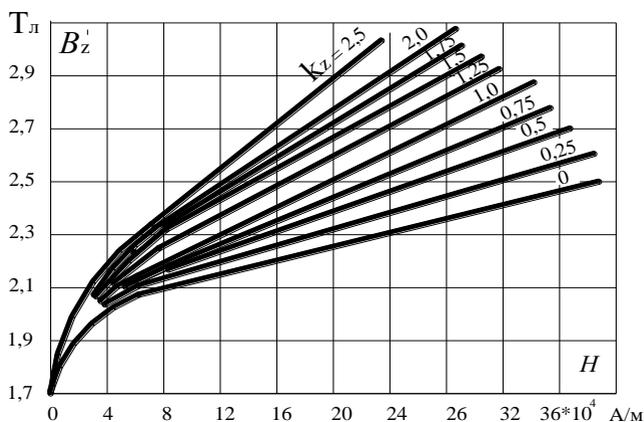


Рисунок 3.15 Кривые намагничивания сталей 1211, 1212 (к определению магнитного напряжения зубцов машин постоянного тока)

Номинальное значение магнитной индукции в зазоре $B_{\delta H}$ выбирается согласно рисунка 3.16.

При решении задачи целесообразно вычислить исходные данные по форме таблицы 3.4, а затем произвести расчет магнитной цепи по форме таблицы 3.5. Расчет рекомендуется сначала произвести для номинального значения потока, а затем для остальных значений Φ_{δ} . При этом следует учесть и то, что значения индукции в различных участках пропорциональны потоку ($B_j = B_{jH} \Phi_{\delta} / \Phi_{\delta H}$), в то время как напряженности H_j в стальных частях не пропорциональны из-за нелинейности кривых намагничивания ферромагнитных материалов.

Таблица 3.4 - Данные для расчета магнитной цепи

Длина участка l_j , мм	Ширина участка b_j , мм	Площадь участка S_{jz} , мм ²	Средняя (расчетная) длина магнитной линии L_j , м	Магнитная индукция B_j , Тл
1. Воздушный зазор под главным полюсом				
$l_\delta = (l_a + l_m)/2$ $l_m = l_a - 5$	$b_\delta = a_\delta \tau$ $\tau = \pi D_a / (2p)$	$S_\delta = l_\delta b_\delta$	$L_\delta = \delta' = \delta k_\delta$ $k_\delta = t_1 / (t_1 - \gamma_1 \delta)$ $\gamma_1 = (b_{II} / \delta)^2 / (5 + b_{II} / \delta)$	$B_{\delta ном}$ - по рисунку 3.16 $\Phi_{\delta ном} = B_{\delta ном} S_\delta$
2. Зубцовый слой якоря				
$l_Z = l_a K_{CT}$ $K_{CT} = 0,93$	$t_1 = \pi D_a / z$ $t_3 = \pi (D_a - 2h_z) / z$ $b_{Z3} = t_1 / (t_1 / b_{Z3})$ $b_{II} = t_3 - b_{Z3}$ $b_{Z1} = t_1 - b_{II}$ $b_{Z2} = (b_{Z1} + b_{Z3}) / 2$ $t_2 = (t_1 + t_3) / 2$	$S_{Zi} = b_{Zi} l_{Zi}$	$L_Z = h_Z$	$B_{Zi} = \frac{\Phi_{\delta i}}{S_{Zi}}$ $i = 1, 2, 3$ $K_{Zi} = \frac{t_i l_\delta}{S_{Zi}}$ $\Phi_{\delta i} = B_{\delta ном} t_i l_\delta$
3. Сердечник главного полюса				
$l_{mp} = l_m K_{CT}$	$b_m = \frac{\Phi_{m ном}}{l_{mp} B_{m ном}}$	$S_m = b_m l_{mp}$	$L_m = h_m$	$B_{m ном} = 1, 2 - 1, 6$ Тл (задаться) $\Phi_{пном} = \sigma \Phi_{\delta ном}$
4. Спинка якоря				
$l_{ap} = l_Z$	$h_a = \Phi_{\delta ном} / l_{ap} B_{a ном}$	$S_a = l_Z h_a$	$L_a = \frac{\pi (D_a - h_a - 2h_z)}{4p} + 0,5 h_a$	$B_{a ном} = 1, 3 - 1, 5$ Тл (задаться) $\Phi_{a ном} = \Phi_{\delta ном} / 2$
5. Ярмо				
$l_y = l_m + 0,4 D_a$	$h_y = \Phi_{y ном} / l_y B_{y ном}$	$S_y = l_y h_y$	$L_y = \pi [D_a + (\delta + h_m + h_y) 2] / 4p + 0,5 h_y$	$B_{y ном} = 1, 1 - 1, 2$ Тл (задаться) $\Phi_{y ном} = \Phi_{m ном} / 2$

Таблица 3.5 – Расчет магнитной цепи

Наименование величин	Значения при			
	0,5 $\Phi_{\delta H}$	0,75 $\Phi_{\delta H}$	$\Phi_{\delta H}$	1,25 $\Phi_{\delta H}$
Основной магнитный поток Φ_{δ} , Вб				
Магнитная индукция в воздушном зазоре B_{δ} , Тл				
Магнитная индукция, Тл:				
в верхней части зуба B'_{Z1}				
в средней части зуба B'_{Z2}				
в нижней части зуба B'_{Z3}				
Магнитная индукция, Тл:				
в сердечнике главного полюса B_m				
в спинке якоря B_a				
в спинке ярма $B_{я}$				
Напряженность магнитного поля в зубцовой зоне, А/см:				
H_{Z1} (по П.1 или по рисунку 3.15)				
H_{Z2} (по П.1 или по рисунку 3.15)				
H_{Z3} (по П.1 или по рисунку 3.15)				
$H_{ZP}=(H_{Z1}+4H_{Z2}+H_{Z3})/6$				
Напряженность магнитного поля стальных участков, А/см:				
H_m (по П.1)				
H_a (по П.1)				
$H_{я}$ (по П.1)				
Магнитное напряжение, А:				
воздушного зазора, $U_{M\delta}=\delta' B_{\delta}/\mu_0$				
зубцовой зоны якоря $U_{MZ}=h_z H_{ZP}$				
полюсов $U_{mm}=h_m H_m$				
спинки якоря $U_{Ma}=L_a H_a$				
спинки ярма $U_{My}=L_{я} H_{я}$				
МДС обмотки возбуждения на полюс, А,				
$F_B=\sum_{(K)} U_{MK}$				

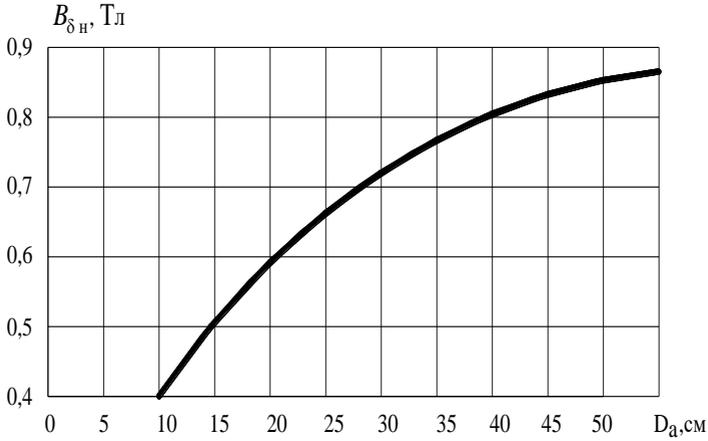


Рисунок 3.16 Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре от диаметра якоря

По данным таблицы 3.5 строится кривая намагничивания (рисунок 3.17) и определяется коэффициент насыщения κ_H , который равен отношению МДС обмотки возбуждения F_B при $\Phi_{\delta} = \Phi_{\delta н}$ к магнитному напряжению $U_{M\delta}$, т.е.

$$\kappa_H = F_B / U_{M\delta} = ac/ab \quad (3-24)$$

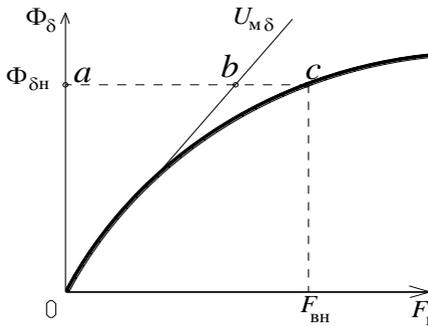


Рисунок 3.17 Характеристика намагничивания машины

После расчета магнитной цепи выполняется расчет параметров обмотки якоря, который рекомендуется начинать с выбора числа элементарных пазов

в одном реальном $u_{\pi}=K/Z$ и определения числа коллекторных пластин

$$K=u_{\pi}Z, \quad (3-25)$$

где Z – число пазов (зубцов) якоря, представлено в задании.

Число коллекторных пластин K выбирается из условия, чтобы среднее значение межламельного напряжения $u_{\text{ксп}}$ при холостом ходе не превышало 18-22 В. Приняв $u_{\text{ксп}}=18$ В, получим минимальное число коллекторных пластин

$$K_{\min} = \frac{2pU_{\text{H}}}{u_{\text{ксп}}} = \frac{pU_{\text{H}}}{9}, \quad (3-26)$$

где U_{H} – номинальное напряжение машины постоянного тока, приведено в исходных данных.

С другой стороны, максимальное число коллекторных пластин K_{\max} определится диаметром коллектора $D_{\text{к}}$ и минимально допустимым значением коллекторного деления $t_{\text{кmin}}$,

$$t_{\text{кmin}} = b_{\text{кmin}} + \Delta_{\text{киз}},$$

где $b_{\text{кmin}}$ – минимальная ширина коллекторной пластины;

$\Delta_{\text{киз}}$ – толщина межламельной изоляции.

Приняв $D_{\text{к}} = 0,7D_{\text{а}}$, $t_{\text{кmin}} = 5$ мм ($b_{\text{кmin}} = 4$ мм, $\Delta_{\text{киз}} = 1$ мм), найдем

$$K_{\max} = \frac{0,7\pi D_{\text{а}}}{t_{\text{кmin}}}. \quad (3-27)$$

Таким образом, целые числа u_{π} и K должны удовлетворять условию

$$K_{\min} \leq K = u_{\pi}Z \leq K_{\max} \quad (3-28)$$

Определив по (3-26) и (3-27) значения K_{\min} и K_{\max} , выбирают числа u_{π} и K согласно условию (3-28), где $u_{\pi}=1,2,3$.

Зная $K = Z_{\text{з}} = S$, определяют число витков в секции

$$W_{\text{с}} = \frac{60a}{K\pi D_{\text{а}}} \frac{E_{\text{с}}}{\alpha_{\delta} B_{\delta\text{H}}} \frac{1}{l_{\delta} n}, \quad (3-29)$$

где n – частота вращения машины (задана); $E_{\text{с}} = U_{\text{H}}(1 \mp R_{\text{а}}^*) = c_{\text{E}} n \Phi_{\delta\text{H}}$;

a – число пар параллельных ветвей якорной обмотки;

$R_{\text{а}}^*$ – сопротивление цепи якоря в относительных единицах (знак минус – для двигателя, знак плюс – для генератора); $R_{\text{а}}^* = 0,05$.

Полученное значение w_c следует округлить до ближайшего целого числа. Если полученное значение w_c не превышает 4, то на этом выбор чисел u_{II} и K следует считать законченным. В противном случае необходимо взять другие значения u_{II} и K , удовлетворяющие указанным выше требованиям.

Далее определяются шаги обмотки (y_1, y_2, y) в зависимости от ее заданного типа. Методика определения шагов уже представлена в п.3.1.4.

При $u_{II} > 1$ рекомендуется по технологическим соображениям обмотку выполнять равносекционной, для которой

$$y_1 = u_{II} y_{1II} ; \quad (3-30)$$

$$y_{1II} = \frac{Z}{2p} \pm \Delta \epsilon_{II} = \text{ц.ч.}, \quad (3-31)$$

где *ц.ч.* – целое число;

$\Delta \epsilon_{II}$ – укорочение или удлинение шага в долях пазового деления.

Предпочтительными, с точки зрения расхода меди, являются так называемые не перекрещенные обмотки, для которых у простой петлевой обмотки

$$y = y_K = +1, \quad (3-32)$$

а у простой волновой

$$y = y_K = \frac{Z_{\text{э}} - 1}{p} \quad (3-33)$$

Определив шаги, составляют таблицу обмотки, которая состоит из Z_p столбцов и двух строк: верхние цифры (без штрихов) указывают порядковые номера секций и номера элементарных пазов, в которых лежат верхние стороны секций; нижние цифры (со штрихами) указывают номера элементарных пазов, в которых лежат нижние стороны тех же секций.

В тех случаях, когда формула (3-33) дает нецелое значение y_K для простой волновой обмотки, прибегают к следующим искусственным приёмам:

$$\text{а) если } \frac{u_{II} Z \mp 1}{p} \neq \text{ц.ч.} \text{ и } \frac{u_{II} Z}{p} \neq \text{ц.ч.},$$

$$\text{то принимают } K = u_{II} Z - 1 \quad (3-34)$$

Одна секция такой обмотки не присоединяется к коллектору, поэтому она называется обмоткой с «мертвой» секцией;

б) если $\frac{u_{II}Z \mp 1}{p} \neq \text{ц.ч.}$, но $\frac{u_{II}Z}{p} = \text{ц.ч.}$,

то для $(p-1)$ идущих друг за другом секций принимают шаг по коллектору равным

$$y_{K1} = y_{K2} = \dots = y_{K(p-1)} = K/p$$

и одну секцию выполняют с шагом

$$y_{KP} = \frac{K}{p} \mp 1. \quad (3-35)$$

Это означает, что после одного обхода коллектора, т.е. после p шагов, происходит сдвиг на одно коллекторное деление влево или вправо от исходной коллекторной пластины, как и у обычной простой волновой обмотки. Такие обмотки называются искусственно замкнутыми. После соединения всех

$S = K = Z_s$ секций такой обмотки конец последней секции оказывается сдвинутым относительно начала первой секции на расстояние двойного полюсного деления. Поэтому для замыкания обмотки применяют специальную перемычку, соединяющую конец последней секции с началом первой.

Пример искусственно замкнутой простой волновой обмотки приведён на рисунке 3.18.

Схема-развертка якорной обмотки представляет собой вид на якорь сверху (полюса находятся над якорем) после разрезания цилиндрической поверхности якоря по образующей и развертывания ее на плоскость.

Рекомендуется схему-развертку выполнять в следующем порядке:

1. На листе миллиметровой или клетчатой бумаги изображают Z_s элементарных пазов в виде отрезков вертикальных линий – сплошного (слева), который изображает верхнюю сторону, и пунктирного (справа), изображающего нижнюю активную сторону.

Расстояние между элементарными пазами t_1 рекомендуется принять равным 10 мм.

Слева от первого элементарного паза и справа от последнего на расстоянии $t_1/2$ проводят линии разреза, ограничивающие схему-развертку слева и справа.

2. Нумеруют элементарные пазы по порядку, начиная с первого и кончая последним (Z_s). Эта нумерация является основной нумерацией всех элементов обмотки: номер паза присваивается номеру секции, начало которой лежит в верхнем слое паза, и коллекторной пластине, с которой соединено начало секции. Так как в каждом пазу лежат две активные стороны, то верхнюю сторону обозначают номером паза без штриха, а нижнюю – номером паза со штрихом.

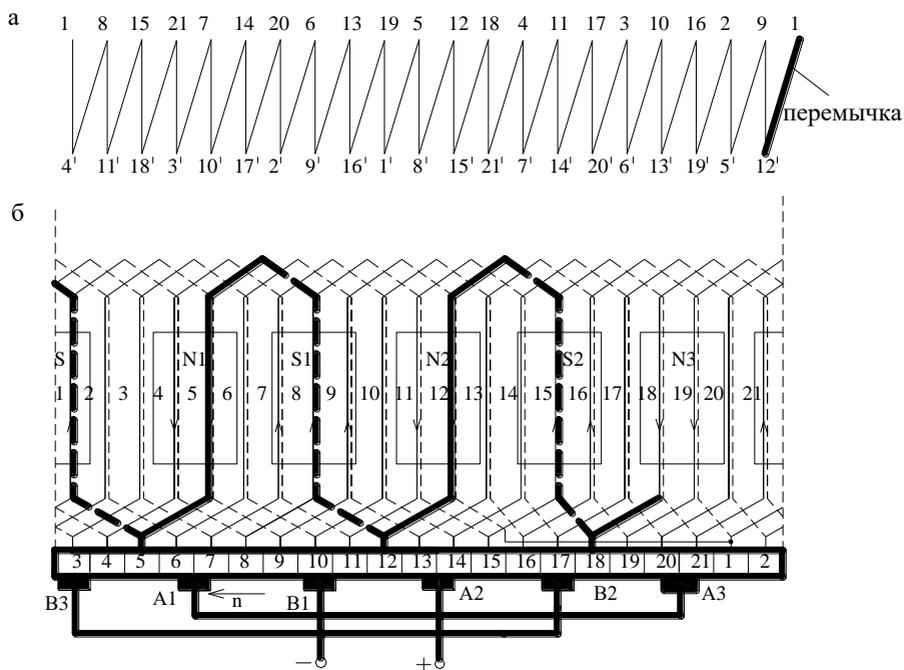


Рисунок 3.18 Таблица (а) и схема-развертка (б) простой искусственно замкнутой волновой обмотки при $Z_{\Omega} = S = K = 21$;
 $y_{k1} = y_{k2} = 7$; $y_{k3} = 6$; $y_1 = 3$; $p = 3$

3. Производят разметку положения и нумерацию коллекторных пластин. Для этого посередине между элементарными пазами $N_1=1$ и $N_n=1+y_1$ (рисунки 3.19 и 3.20) проводят вертикальную линию ab , на которой находится вершина верхней лобовой части секции №1.

В случае простой не перекрещенной петлевой обмотки (рисунок 3.19) на этой же линии ab находится граница (изоляционный промежуток) между коллекторными пластинами 1 и 2. Найдя положение пластин 1 и 2, размечают остальные пластины, приняв их ширину t_k равной расстоянию между элементарными пазами. В случае простой волновой обмотки для разметки пластин коллектора необходимо найти элементарный паз N_n , в котором лежит начало следующей за первой секции ($N_n = N_1 + y_k = 1 + y_k$).

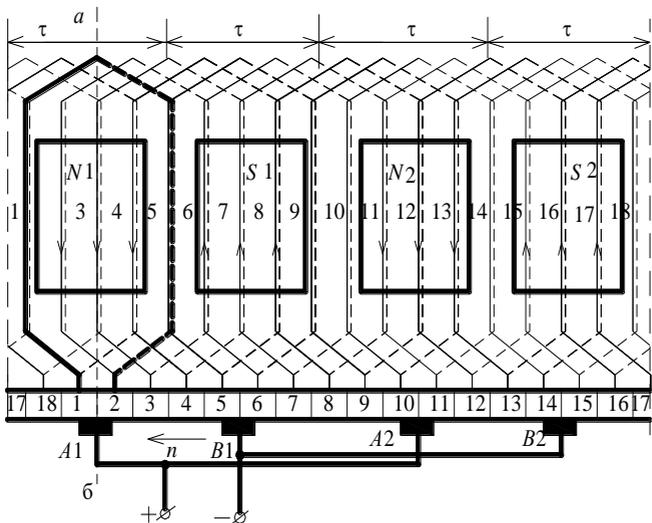


Рисунок 3.19 Схема-развертка простой петлевой обмотки при $Z_0 = S = K = 18; p = 2; y_1 = 4; y_k = 1$

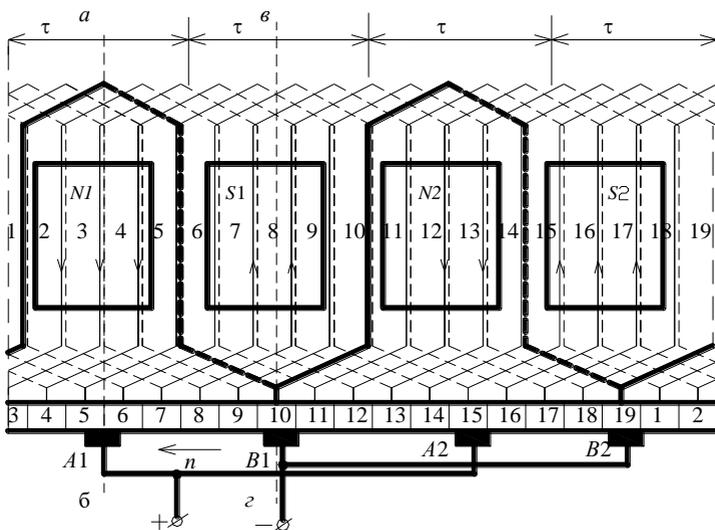


Рисунок 3.20 Схема-развертка простой волновой обмотки при $Z_0 = S = K = 19; p = 2; y_1 = 4; y_k = 9$

Посредине между пазами $(1+y_1)$ и $(1+y_k)$ (рисунок 3.20) проводят линию $6z$, которая делит коллекторную пластину с номером N_n пополам. Найдя положение коллекторной пластины N_n , размечают остальные пластины

Далее соединяют секции друг с другом и с коллекторными пластинами согласно таблице обмотки, изображая восходящие части лобовых частей сплошными линиями и нисходящие – пунктирными. Линии лобовых частей должны заканчиваться на границах развертки. Можно ограничиться изображением лобовых частей лишь для двух полных обходов по коллектору.

В случае простой волновой обмотки с «мертвой» секцией на развернутой схеме изображают, как обычно, все Z_3 элементарных пазов и нумеруют их с первого по последний.

Далее изображают на схеме «мертвую» секцию шириной y_1 , отступив несколько вправо от первого паза. Затем нумеруют верхние активные стороны, пропустив паз N_1 , в котором лежит начало «мертвой» секции, и нижние активные стороны, пропустив паз $N_n = N_1 + y_1$, в котором лежит конец «мертвой» секции.

После этого соединяют активные стороны в соответствии с таблицей обмотки. Разметку коллекторных пластин производят так, как указано выше, при этом следует учесть, что число коллекторных пластин K на единицу меньше числа элементарных пазов, а коллекторное деление $t_k = t_1 Z_3 / (Z_3 - 1)$.

4. Наносят на схему-развертку контуры главных и дополнительных полюсов, определяют положение щеток (на оси главных полюсов), т.е. на расстоянии $K/2p$ коллекторных делений друг от друга. Задавшись направлением вращения (рекомендуется взять против вращения часовой стрелки) и полярностью главных полюсов, определяют полярность щеток и дополнительных полюсов (с учетом режима работы машины).

Для определения полярности щеток необходимо выявить направление ЭДС в какой-либо секции и перенести это направление на схему параллельных ветвей (см. рисунок 3.21). Схема параллельных ветвей представляет собой электрическую схему соединения секций, которые изображаются в виде полуокружностей. Схема показывается для того момента времени, для которого выполнена схема-развертка. Щетки образуют $2a$ параллельных ветвей и замыкают накоротко секции, нисходящие коммутацию.

На рисунке 3.21 а, б для примера показаны схемы параллельных ветвей обмоток, развернутые схемы которых приведены на рисунках 3.19 и 3.20 соответственно.

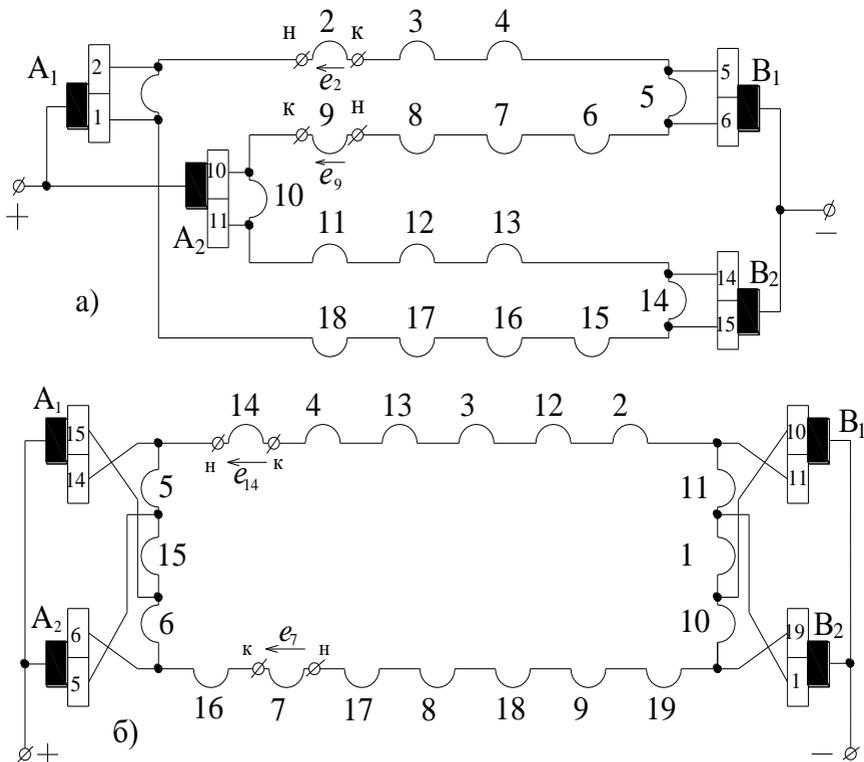


Рисунок 3.21 Схема параллельных ветвей простых петлевой (а) и волновой (б) обмоток, показанных соответственно на рисунках 3.19 и 3.20

3.3.2 Методические указания к решению задач 1, 2 контрольной работы №2 для студентов ЗЭТ – IV

По задаче 1. Перед началом расчета необходимо начертить схему двигателя с обозначением всех элементов

Номинальный момент на валу двигателя определяется по заданным величинам P_H и n_H ,

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H}, \text{ где } P_H [\text{Вт}]. \quad (3-36)$$

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (3-37)$$

где P_2 – полезная мощность на валу двигателя;

P_1 – мощность, потребляемая двигателем из сети, $P_1 = U_H I_1$.

Для номинального режима работы ток двигателя $I_H = P_H / \eta_H U_H$.
Так как $i_{вн}\% = (I_{вн}/I_H)100\%$ и величина $i_{вн}\%$ задана, то можно определить номинальный ток возбуждения $I_{вн}$.

Имея I_H и $I_{вн}$, по первому закону Кирхгофа определяем номинальный ток якорной обмотки $I_{ан}$.

$$\text{Сопrotивления цепи якоря } R_a = \Delta P_{ан} / I_{ан}^2; \quad (3-38)$$

$$\text{цепи возбуждения } R_B = U_H / I_{вн}. \quad (3-39)$$

Пренебрегая размагничивающим действием реакции якоря, рассчитать и построить скоростную характеристику $n = f(I_a)$ для значений тока якоря $I_a = (0,25; 0,5; 0,75; 1,25)I_{ан}$. Расчет выполняется по формуле

$$n = \frac{U_H - I_a R_a}{C_E \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (3-40)$$

где $\Phi = \Phi_H$, а $c_E \Phi_H$ определяется из этого же уравнения для номинального режима работы. Частота вращения холостого хода

$$n_0 = U_H / c_E \Phi_H. \quad (3-41)$$

По данным n_0 , n_H и M_H построить график естественной механической характеристики $n = f(M)$ (см. п. 3.1.6).

$$\text{КПД двигателя } \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_H I_a - \sum \Delta P}{U_H I_a} \quad (3-42)$$

Суммарные потери в двигателе $\sum \Delta P = \Delta P_a + \Delta P_B + \Delta P_{\text{мех, доб}}$,

где ΔP_a – потери в якорной обмотке, $\Delta P_a = I_a^2 R_a$;

ΔP_B – потери на возбуждение, $\Delta P_B = \Delta P_{вн} = U_H I_{вн} = \text{const}$;

$\Delta P_{\text{мех, доб}}$ – механические и добавочные потери, $\Delta P_{\text{мех, доб}} = \text{const}$.

Принимая механические и добавочные потери неизменными, определить их из условия номинального режима работы двигателя:

$$\sum \Delta P_H = \frac{P_H}{\eta_H} - P_H \quad (3-43)$$

$$\Delta P_{\text{мех, доб}} = \sum \Delta P_H - I_{ан}^2 R_a - I_{вн}^2 R_B. \quad (3-44)$$

Расчет $\eta = f(I_a)$ выполняется по формуле

$$\eta = \frac{U_H I_a - I_a^2 R_a - \Delta P_{BH} - \Delta P_{\text{мех.доб}}}{U_H I_a} \quad (3-45)$$

Построить график $\eta = f(I_a)$

Пределы изменения частоты вращения двигателя при токе $I_a = I_{ан}$ и изменении добавочного сопротивления от 0 до $4R_a$ определяются из условия

$$n = \frac{U_H - I_a \sum R}{C_E \Phi_H},$$

где $\sum R = R_a + R_{\text{доб}}$.

По задаче 2. Начертить схему двигателя с обозначением всех элементов.

Мощность, потребляемая двигателем из сети, при номинальном режиме работы

$$P_{\text{IH}} = P_{\text{H}} + \Delta P_{\text{ан}} + \Delta P_{\text{вн}} + \Delta P_{\text{M}} \quad (3-46)$$

$$\text{Номинальный ток двигателя } I_{\text{H}} = P_{\text{IH}} / U_{\text{H}} \quad (3-47)$$

По величинам P_{H} и n_{H} можно определить номинальный момент двигателя

$$M_{\text{H}} = 9,55 P_{\text{H}} / n_{\text{H}}, \quad (3-48)$$

где P_{H} (Вт), n_{H} (об/мин).

$$\text{Сопротивления обмоток : якоря } R_a = \frac{\Delta P_{\text{ан}}}{I_{\text{H}}^2}; \quad (3-49)$$

$$\text{возбуждения } R_g = \frac{\Delta P_{\text{вн}}}{I_{\text{H}}^2}. \quad (3-50)$$

Для определения частоты вращения якоря при токах $I_a = (0,2; 0,4; 0,6; 0,8)I_{\text{H}}$ необходимо воспользоваться заданной зависимостью $\phi \% = f(i_{\text{B}}\%)$,

где $i_{\text{B}}\% = \frac{I_a}{I_{\text{H}}} 100\%$, $\phi \% = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{H}}} 100\%$, откуда $I_{\text{B}} = i_{\text{B}}\% I_{\text{H}} / 100$, $\Phi = \phi \% \Phi_{\text{H}} / 100$.

Учитывая, что у двигателя последовательного возбуждения $I_a = I_{\text{B}}$, для заданных значений тока определить частоты вращения по уравнению

$$n = \frac{U_{\text{H}} - I_a (R_a + R_g)}{C_E \Phi} = \frac{U_{\text{H}} - \left(\frac{i_{\text{B}}\%}{100} I_{\text{H}}\right) (R_a + R_g)}{C_E \left(\frac{\phi\%}{100} \Phi_{\text{H}}\right)}, \quad (3-51)$$

где каждое значение потока возбуждения $\phi\%$ соответствует своему значению тока $i_B\%$; $c_E\Phi_H$ определяется из номинального режима,

$$c_E\Phi_H = \frac{U_H - I_H(R_a + R_e)}{n_H}.$$

По результатам расчета построить скоростную характеристику $n = f(I_a)$. Используя заданную зависимость $\phi\% = f(i_B\%)$, построить график $M = f(I_a)$ для следующих значений тока $I_a = (0,2; 0,4; 0,6; 0,8)I_H$.

Принимая $M_H = c_M\Phi_H I_H$, получим $c_M\Phi_H = M_H/I_H$. Тогда при любом режиме работы двигателя (при любом токе I_a)

$$M = c_M\Phi I_a = c_M \left(\frac{\phi\%}{100} \Phi_H \right) \left(\frac{i_a\%}{100} I_H \right). \quad (3-52)$$

Имея графики $n = f(I_a)$ и $M = f(I_a)$, можно построить график механической характеристики $n = f(M)$.

4 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ»

4.1 Общие сведения о курсе и методические указания по самостоятельной работе над ним

В результате изучения курса «Электрические машины и преобразователи» студенты должны:

знать устройство, принцип действия, теорию работы и рабочие характеристики электрических машин, трансформаторов и вентильных преобразователей, применяемых на существующих и перспективных тепловозах или в устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте;

уметь правильно эксплуатировать отмеченные машины и преобразователи, проводить их испытания и определять необходимые параметры.

Основной формой изучения дисциплины является самостоятельная работа над рекомендованной литературой. Эта работа организуется и направляется настоящей рабочей программой.

При этом рекомендуется изучать в следующем порядке:

1. Ознакомиться с содержанием главы (или параграфа), стараясь в первую очередь понять физическую сущность явлений и процессов. ([1, 6] или другой аналогичный учебник).

2. Уяснить методику математического описания процессов, освоить вывод уравнений.

3. Законспектировать материал главы (параграфа), осветив соответствующий вопрос (вопросы) рабочей программы.

Наличие хорошего конспекта является обязательным условием успешного усвоения курса.

В настоящей рабочей программе раскрывается содержание вопросов, которые необходимо изучить, а также объем и уровень этих вопросов на итоговом контроле (экзамен, зачет).

Формулировка вопросов экзаменационных билетов или вопросов на защите по курсу полностью совпадает с формулировкой соответствующих пунктов данной программы.

4.2 Вопросы рабочей программы для ЗТ-IV и ЗЭТ-IV

4.2.1 Введение

Значение электрических машин, трансформаторов и вентильных преобразователей в электроэнергетике, устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте, на тепловозах с электрической передачей мощности.

Общие сведения об электрических машинах. Классификация электрических машин.

4.2.2 Трансформаторы

Принцип действия и устройство трансформаторов. Основные элементы конструкции и их назначение. Классификация и условные обозначения.

Холостой ход трансформатора. Теория рабочего процесса. Уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмотки. Приведение параметров вторичной обмотки трансформатора к числу витков первичной. Схема замещения. Опыты холостого хода и короткого замыкания. Изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке. Внешние характеристики. Потери и КПД трансформатора. Трехфазные трансформаторы. Группа соединения. Параллельная работа трансформаторов.

Измерительные трансформаторы.

Дополнение для студентов ЗЭТ-IV

Импульсные трансформаторы и пик-трансформаторы (назначение, принцип действия, устройство).

4.2.3 Асинхронные машины

Принцип образования вращающегося магнитного поля. Направление и частота вращения.

Устройство, теория рабочего процесса асинхронной машины к рабочему процессу трансформатора. Векторная диаграмма, схемы замещения, энергетическая диаграмма. Потери и КПД. Электромагнитный момент, механическая характеристика. Рабочие характеристики асинхронного двигателя. Пуск и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Тормозные режимы. Однофазный асинхронный двигатель.

Дополнение для студентов ЗТ-IV

Тяговые и вспомогательные асинхронные машины тепловозов. Частотное управление тяговыми асинхронными двигателями.

Дополнение для студентов ЗЭТ-IV

Асинхронный двигатель стрелочного привода Фазорегулятор и индукционный регулятор напряжения (принцип действия, области применения).

Назначение, принцип действия и устройство сельсинов.

4.2.4 Машины постоянного тока

Принцип действия и устройство машин постоянного тока, области применения.

Якорные обмотки, их особенности.

Реакция якоря. ЭДС и электромагнитный момент. Коммутация в машинах постоянного тока.

Классификация генераторов постоянного тока по способу возбуждения, электрические схемы соответствующих генераторов.

Сущность процесса самовозбуждения и его условия.

Внешние и регулировочные характеристики генераторов постоянного тока с различными способами возбуждения.

Двигатели постоянного тока различных топов возбуждения. Скоростные и механические характеристики двигателей.

Пуск в ход и регулирование частоты вращения двигателей.

Универсальный коллекторный двигатель.

Дополнение для студентов ЗТ-IV

Магнитная цепь машины постоянного тока. Расчет магнитной цепи. Магнитная характеристика машины.

Расчетные соотношения для якорных обмоток. Схемы якорной обмотки – развернутая и параллельных ветвей.

Способы улучшения коммутации. Дополнительные полюса, их назначение и устройство, настройка дополнительных полюсов.

Тормозные режимы двигателей постоянного тока.

4.2.5 Синхронные машины

Устройство и принцип действия синхронной машины. Реакция якоря явнополюсного генератора при различном характере нагрузки. Уравнение электрического состояния цепи якоря ненасыщенного явнополюсного синхронного генератора. Характеристики генератора.

Электромагнитный момент синхронной машины, угловая характеристика.

Синхронный двигатель: особенности характеристик, способы пуска.

Дополнение для студентов ЗТ-IV

Тяговые и вспомогательные тепловозные синхронные генераторы.

Понятие о параллельной работе синхронных машин. Регулирование коэффициента мощности синхронных машин.

Регулирование активной и реактивной мощностей синхронного генератора при параллельной его работе с сетью.

Дополнение для студентов ЗЭТ-IV

Синхронный реактивный двигатель: принцип действия, особенности устройства, области применения.

Синхронный гистерезисный двигатель, шаговый двигатель: принцип действия, устройство, области применения.

4.2.6 Вентильные преобразователи

Классификация и назначение вентильных преобразователей. Неуправляемые выпрямители. Управляемые выпрямители. Автономные инверторы.

Дополнение для студентов ЗТ-IV

Особенности работы тепловозных синхронных генераторов на выпрямительную нагрузку.

Использование преобразовательных установок на современных и перспективных тепловозах.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1 Кривая намагничивания листовой электротехнической стали марок 1211, 1212

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	1,40	1,43	1,46	1,49	1,52	1,53	1,58	1,61	1,64	1,67
0,5	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
0,8	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,6	3,69	3,78	3,87
0,9	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91
1,0	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,00	6,15	6,31
1,1	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	7,59	7,79	8,00	8,21
1,2	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0
1,3	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3
1,4	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
1,5	25,0	26,4	27,9	29,5	31,1	32,8	34,6	36,6	38,8	41,2
1,6	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66,0	69,8	73,7
1,7	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122
1,8	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188
1,9	197	206	216	226	236	246	256	268	282	296
2,0	310	325	343	365	390	420	455	495	545	595
2,1	655	725	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760
2,5	3840	3920	4000	4080	4160	4240	4320	4400	4480	4560

Таблица П.2 Кривая намагничивания литой стали

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72
0,1	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20	1,28	1,36	1,44	1,52
0,2	1,6	1,68	1,76	1,84	1,92	2,0	2,08	2,16	2,24	2,32
0,3	2,40	2,48	2,50	2,64	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12
0,4	3,20	3,28	3,36	3,44	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84	3,92
0,5	4,00	4,04	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,70	4,79
0,6	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,7	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
0,8	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,9	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,50	8,73	8,85	8,98	9,11
1,0	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,04	10,22	10,39	10,56	10,76
1,1	10,90	11,08	11,27	11,47	11,67	11,87	12,07	12,27	12,48	12,69
1,2	12,9	13,15	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,55
1,3	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3
1,4	20,9	21,6	22,3	23,0	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	28,0
1,5	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,3	35,6	37,0	38,3	39,6
1,6	41,0	42,5	44,0	45,5	47,0	48,7	50,0	51,5	53,0	55,0

Список литературы

1. Брускин Д.Е., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. М.: Высшая школа. Ч.1, 1979. 288 с. Ч.2, 1979. 304 с.
2. Попов Д.А. Электрические машины. Задания на контрольную работу с методическими указаниями. М.: ВЗИИТ, 1986. 22 с.
3. Межлумов Г.А. Электротехника. Задания на контрольные работы № 3 и 4 с методическими указаниями. М.: ВЗИИТ, 1990. 63 с.
4. Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова.- М.: Энергия, 1980.495 с.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. 728 с.
6. Копылов И.П. Электрические машины.-М.:Высшая школа,2000.606с.

Содержание

Введение	3
1 ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	5
1.1 Теоретические сведения, необходимые для выполнения курсовой и контрольных работ	5
1.2 Задания на выполнение курсовой и контрольной работ по разделу «Трансформаторы».....	10
1.2.1 Задача 1 курсовой работы для студентов ЗТ-IV	10
1.2.2 Задача 1 контрольной работы №1 для студентов ЗЭТ-IV	13
1.3 Методические указания к решению задач.....	14
1.3.1 Методические указания к решению задачи 1 курсовой работы для студентов ЗТ-IV	15
1.3.2 Методические указания к решению задачи 1 контрольной работы №1 для студентов ЗЭТ – IV	15
2 АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ	16
2.1 Теоретические сведения, необходимые для выполнения курсовой и контрольной работ.....	16
2.1.1 Принцип действия асинхронного двигателя	16
2.1.2 Асинхронный двигатель при неподвижном роторе	18
2.1.3 Работа асинхронной машины при вращающемся роторе.....	19
2.1.4 Вращающий момент асинхронного двигателя	21
2.2 Задания на выполнение курсовой и контрольной работ по разделу «Асинхронные двигатели»	24
2.2.1 Задача 2 курсовой работы для студентов ЗТ – IV «Расчет характеристик асинхронного двигателя»	24
2.2.2 Задача 2 контрольной работы №1 для студентов ЗЭТ – IV	25
2.3 Методические указания к решению задач.....	28
2.3.1 Методические указания к решению задачи 2 курсовой работы для студентов ЗТ – IV	28
2.3.2 Методические указания к решению задачи 2 контрольной работы №1 для студентов ЗЭТ – IV	30
3 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	31
3.1 Теоретические сведения, необходимые для выполнения курсовой и контрольной работ.....	31
3.1.1 Конструкция и принцип действия машины постоянного тока	31
3.1.2 Схемы включения машин постоянного тока	32
3.1.3 Магнитный поток и магнитная цепь машины постоянного тока	33
3.1.4 Якорные обмотки машин постоянного тока.....	35
3.1.5 Основные уравнения машин постоянного тока.....	37
3.1.6 Двигатели постоянного тока.....	38

3.2 Задания на выполнение курсовой и контрольной работ по разделу «Машины постоянного тока».....	44
3.2.1 Задача 3 курсовой работы для студентов ЗТ-IV.....	44
3.2.2 Задача 1 контрольной работы № 2 для студентов ЗЭТ-IV.....	47
3.2.3 Задача 2 контрольной работы №2 для студентов ЗЭТ – IV.....	49
3.3 Методические указания к решению задач.....	51
3.3.1 Методические указания к решению задачи 3 курсовой работы для студентов ЗТ-IV.....	51
3.3.2 Методические указания к решению задач 1, 2 контрольной работы №2 для студентов ЗЭТ – IV.....	62
4 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	
«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ».....	65
4.1 Общие сведения о курсе и методические указания по самостоятельной работе над ним.....	65
4.2 Вопросы рабочей программы для ЗТ, У-IV и ЗЭТ-IV.....	66
4.2.1 Введение.....	66
4.2.2 Трансформаторы.....	66
4.2.3 Асинхронные машины.....	67
4.2.4 Машины постоянного тока.....	67
4.2.5 Синхронные машины.....	68
4.2.6 Вентильные преобразователи.....	68
Список литературы.....	70