



Электротехника
(Практические занятия)

Москва
2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Кафедра электротехники, электроники и автоматики

Электротехника

*Методические указания к выполнению
практических занятий*

Москва
2017

УДК 621.3

Электротехника: метод. указ. к выполнению практических занятий / сост. В.И.Аверцев. – М.:ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", 2017. - с. 24.

В данных методических указаниях изложены методики расчета и исследования электромагнитных устройств постоянного и переменного тока и расчета статических и динамических характеристик электрических машин.

Предназначены для студентов 2 курса дневного отделения направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

УДК 621.3

© Аверцев В.И., составление, 2017
© ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", 2017

Учебное издание

Составитель
Аверцев Вадим Иванович

Электротехника

Методические указания к выполнению практических занятий

СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие 1. Расчёт электромагнитного устройства постоянного тока.....	3
Практическое занятие 2. Расчёт параметров линейной модели однофазного двухобмоточного трансформатора (Т-образной схемы) по результатам экспериментов или по паспортным данным	9
Практическое занятие 3. Статические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением	13
Практическое занятие 4. Исследование уравнения динамики машины постоянного тока с независимым возбуждением	16
Практическое занятие 5. Исследование механической характеристики асинхронной машины.....	19
Приложение 1.....	22
Приложение 2.....	23
Список рекомендуемой литературы.....	25

Раздел курса "Электромагнитные устройства и электрические машины"

Практическое занятие 1.

Расчёт электромагнитного устройства постоянного тока

Цель семинара: освоение методики проектирования электромагнитного устройства постоянного тока.

Проектирование состоит из нескольких этапов:

- разработка формы деталей устройства и их размеров;
- выбор ферромагнитных материалов для сердечника и якоря и рабочих точек на характеристиках $B(H)$;
- расчёт длин средних линий и площадей поперечных сечений участков магнитной цепи, составление уравнения для расчёта намагничивающей силы катушки;
- расчёт полного тока при наличии воздушного зазора (тока срабатывания) и при отсутствии зазора (тока удержания якоря без учёта веса якоря и упругой силы возвратной пружины).

Этап 1. Разработка формы деталей устройства

В качестве задания для индивидуального расчёта выбираем простейшую конструкцию, состоящую из двух деталей - сердечника и якоря (подвижной части устройства).

Устройство с прямоугольными контурами показано на рис.1.

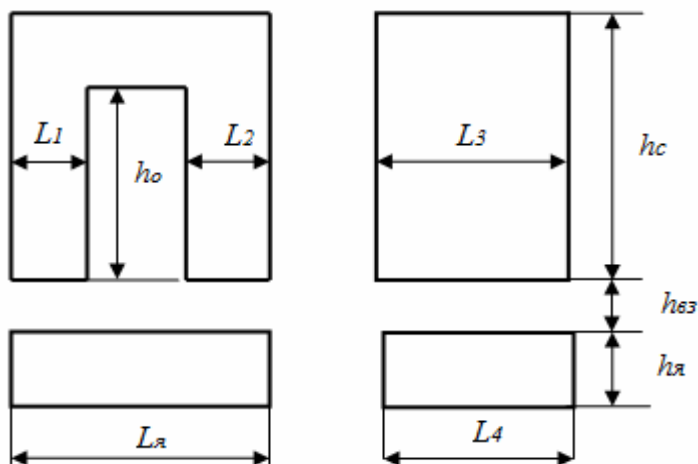


Рис.1. Форма и размеры ферромагнитных деталей устройства

На рис.1 показаны обозначения размеров деталей, численные величины которых для пяти вариантов заданы в табл.1 для индивидуальных заданий.

Этап 2. Выбор ферромагнитных материалов для сердечника и якоря и рабочих точек на характеристиках $B(H)$

Выбирать материалы для сердечника и якоря необходимо из группы магнитномягких материалов, к которым относятся материалы с узкой предельной петлёй гистерезиса и имеют параметры: коэрцитивная сила $H_c < 4$ кА/м и остаточная индукция $B_r = 0,3$ Тл.

Для устройств, работающих на постоянном токе, можно использовать относительно дешёвые магнитномягкие материалы, такие как технически чистое железо или конструкционные стали.

Технически чистое железо содержит не более 0,04 % углерода и не более 0,6 % других примесей. Коэрцитивная сила $H_c = 60$ А/м. Недостатком этой группы материалов является низкое электрическое сопротивление, но для устройств постоянного тока это не важно, так как вихревые токи не наводятся.

Конструкционные стали имеют лучшие механические характеристики и большее сопротивление, но одновременно значительно большее значение коэрцитивной силы H_c , порядка 200 А/м.

Обе группы материалов рекомендуются для изготовления деталей реле, магнитопроводов, сердечников, полюсных башмаков электромагнитов.

Таблица 1

Варианты размеров ферромагнитных деталей устройства

Элементы размеров	Обозначение размеров деталей	Номера вариантов				
		1	2	3	4	5
Толщина сердечника, мм	L_1 и L_2	10	10	12	15	20
Ширина сердечника в боковой проекции, мм	L_3	25	22	30	40	60
Ширина якоря в боковой проекции, мм	L_4	23	17,5	28	38	56
Ширина якоря в главной проекции, мм	$L_{\text{я}}$	50	80	64	70	70
Высота окна для размещения катушки, мм	h_o	60	70	40	50	60
Высота сердечника, мм	h_c	70	80	52	65	80
Высота воздушного зазора, мм	$h_{\text{вз}}$	5	4	6	8	8
Толщина якоря, мм	$h_{\text{я}}$	10	10	12	15	20

Варианты магнитных материалов для изготовления сердечников и якорей задаются таблицами 2,3,4,5 и 6 зависимостей индукции от напряжённости магнитного поля $B(H)$. Из группы магнитных конструкционных сталей выбираем углеродистую сталь марки Ст.10, магнитная характеристика которой задана в табл. 2. В рассматриваемом ниже примере этот материал используется для изготовления сердечника.

Таблица 2

B_c	Тл	0,1	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,55	1,6	1,7
H_c	А/м	100	500	600	800	1100	1600	2500	3000	3500	4700

Хромомарганцевая углеродистая сталь 30 ХГСА имеет характеристику, заданную в табл.3. Эта сталь рекомендуется для изготовления малонагруженных деталей электромагнитных устройств и в примере расчёта используется для изготовления якоря.

Таблица 3

B_y	Тл	0,05	0,1	0,7	1,2	1,4	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7
H_y	А/м	400	500	1000	1400	2100	3000	4000	5300	8000	11000

Кривые намагничивания трёх типов низкоуглеродистых электротехнических сталей с различным содержанием углерода заданы в табл. 4 (с содержанием углерода 0,001%), 5 (с содержанием углерода 0,02%) и 6 (с содержанием углерода 0,2%).

Таблица 4

$B, \text{Тл}$	1,0	1,15	1,28	1,33	1,35	1,38	1,4	1,43	1,45	1,47	1,48	1,50
$H, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	8	40	80	160	240	320	400	480	560	640	720	960

Таблица 5

$B, \text{Тл}$	0,02	0,20	0,40	1,05	1,20	1,30	1,37	1,44	1,47	1,50	1,53	1,60
$H, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	8	40	80	160	240	320	400	480	560	640	720	960

Таблица 6

$B, \text{Тл}$	0	0,02	0,07	0,28	0,60	0,88	1,08	1,20	1,30	1,34	1,38	1,43
$H, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	8	40	80	160	240	320	400	480	560	640	720	960

Этап 3. Расчёт длин средних линий и площадей поперечных сечений участков магнитной цепи, составление уравнения для расчёта намагничивающей силы катушки

Для уравнения равновесия магнитных напряжений устройства необходимо сначала определить длины средних линий участков магнитопровода. Длина средней линии сердечника $L_{\text{ср}}$ равна:

$$L_{\text{ср}} = L_{\text{я}} - L_1 + 2(h_o + (h_c - h_o)/2) \text{ мм.}$$

Длина средней линии якоря:

$$L_{\text{яср}} = L_{\text{я}} - L_1 + 2(h_{\text{я}}/2) \text{ мм.}$$

Зная длины средних линий, можно записать уравнение равновесия магнитных напряжений:

$$IW = H_c \cdot L_{\text{ср}} + H_{\text{я}} \cdot L_{\text{яср}} + B_{\text{я}} \cdot 2 \cdot h_{\text{вз}} / \mu_0 \text{ А,}$$

где H_c и $H_{\text{я}}$ соответственно напряжённости магнитного поля в сердечнике и в якоре; $B_{\text{я}}$ - индукция магнитного поля на двух участках воздушного зазора, шириной $h_{\text{вз}}$; μ_0 - физическая константа (магнитная проницаемость вакуума), равная $4\pi 10^{-7}$ Гн/м.

Этап 4. Расчёт полного тока при наличии воздушного зазора (тока срабатывания) и при отсутствии зазора (тока удержания якоря без учёта веса якоря и упругой силы возвратной пружины)

В результате вычисления правой части уравнения (3) получаем намагничивающую силу в ампервитках, то есть величину полного тока катушки. Выбор величины тока, протекающего по катушке от источника, определяет величину площади поперечного сечения обмоточного провода по допустимой плотности тока для подобного рода устройств и количество витков катушки. Последние два фактора при использовании рекомендуемого значения коэффициента заполнения окна $K_{\text{зок}}$ позволяют проверить, уместится ли катушка с каркасом и изоляцией в окне устройства или понадобится изменение размеров деталей устройства и повторение этапов 3 и 4 проектирования. Характеристики магнитных материалов $B(H)$ нелинейные, поэтому дальнейшее объяснение следует проводить с конкретными числовыми величинами, так как в зависимости от получаемых результатов придётся корректировать исходные данные, принятые вначале.

Пример расчёта устройства

Определяем возможное число витков катушки W .

1. Вычисляем площадь окна сердечника при притянutom якоре:

$$S_{\text{ок}} = h_o \cdot (L_{\text{я}} - L_1 - L_2) = 70 \cdot (80 - 10 - 10) = 4200 \text{ мм}^2.$$

2. С учётом изоляции провода, изоляции катушки, неплотности намотки катушки, каркаса, на котором наматывается катушка и затем надевается на сердечник, по рекомендациям отраслевых справочников принимаем величину коэффициента заполнения окна $K_{\text{зок}}$ проводом, равную 0,36. Вычисляем "полезное" сечение обмотки:

$$S_{\text{об}} = S_{\text{ок}} \cdot K_{\text{зок}} = 4200 \cdot 0,36 = 1510 \text{ мм}^2.$$

3. Предполагая использовать провод с сечением проводника 1 мм^2 , получаем число витков катушки W , равное 1510.

4. Определяем длины средних линий участков, состоящих из одного материала и имеющих одинаковое сечение.

5. Вычисляем длину средней линии сердечника:

$$L_{\text{ср}} = L_{\text{я}} - L_1 + 2(h_0 + (h_c - h_0)/2) = 80 - 10 + 2(70 + (80 - 70)/2) = 220 \text{ мм} = 220 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

6. Вычисляем длину средней магнитной линии в якоре устройства:

$$L_{\text{яср}} = L_{\text{я}} - L_1 + 2(h_{\text{я}}/2) = 80 - 10 + 2(10/2) = 80 \text{ мм} = 80 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

7. Определяем площади поперечных сечений участков сердечника и якоря.

Примечание: так как якорь является подвижной частью аппарата, то он перемещается в направляющих с необходимым техническим зазором. Поэтому ширина сердечника L_3 в боковой проекции принимается большей, чем ширина якоря L_4 .

8. Площадь поперечного сечения сердечника:

$$S_c = L_2 \cdot L_3 = 10 \cdot 22 = 220 \text{ мм}^2 = 220 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

9. Площадь поперечного сечения якоря:

$$S_{\text{я}} = L_2 \cdot L_4 = 10 \cdot 17,5 = 175 \text{ мм}^2 = 175 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

10. Выбор материалов для сердечника и якоря, расчёт магнитного потока, индукций и напряжённостей магнитного поля.

Для изготовления сердечника устройства используем углеродистую сталь марки Ст.10 с кривой намагничивания, заданной в табл.2. Для якоря используем сталь 30ХГСА (хромомарганцевую углеродистую) с характеристикой, заданной в табл.3.

Так как магнитная цепь является неразветвлённой, то магнитный поток Φ по всему контуру имеет одно и то же значение. Расчёт потока проводится по участку с меньшим сечением, то есть по якорю. Из табл. 3 выбирается рабочая точка на перегибе кривой намагничивания, чтобы не заходить на участок насыщения. Принимаем величину индукции $B_{\text{я}}$, равной 1,5 Тл. Вычисляем величину магнитного потока:

$$\Phi = B_{\text{я}} \cdot S_{\text{я}} = 1,5 \cdot 175 \cdot 10^{-6} = 2,62 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

По величине потока Φ и площади сечения сердечника S_c определяется индукция магнитного поля в сердечнике:

$$B_c = \Phi / S_c = 2,62 \cdot 10^{-4} / 220 \cdot 10^{-6} = 1,19 \text{ Тл}.$$

Несмотря на близость полученной величины к значению одной из точек в табл. 2 ($B_c = 1,2 \text{ Тл}$) стремимся на каждом этапе расчёта получать максимально точные результаты. Поэтому, используя линеаризацию кривой намагничивания на интервале значений индукции $[1,1 \dots 1,2]$, получаем более строго требуемое значение напряжённости магнитного поля H_c в сердечнике, решив уравнение:

$$\frac{H_c - 600}{800 - 600} = \frac{1,191 - 1,1}{1,2 - 1,1}.$$

В результате получаем $H_c = 780 \text{ А/м}$.

11.Расчёт требуемой намагничивающей силы:

$$\begin{aligned} IW &= H_c \cdot L_{\text{ср}} + H_{\text{я}} \cdot L_{\text{яср}} + B_{\text{я}} \cdot 2 \cdot h_{\text{вз}} / \mu_0 = \\ &= 780 \cdot 220 \cdot 10^{-3} + 3000 \cdot 80 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} / 4\pi \cdot 10^{-7} = \\ &= 171,6 + 240 + 9554 = 9965,6 \text{ А.} \end{aligned}$$

12.Расчёт величины тока включения устройства.

Полученная величина полного тока 9965,6 А создаётся катушкой с количеством витков, равным 1510. Следовательно, ток включения будет равен:

$$I_{\text{вкл}} = 9965,6 / 1510 = 6,5997 = 6,6 \text{ А.}$$

13.Расчёт величины полного тока удержания якоря, то есть при притянутах якоря, проводим по уравнению (3) при отсутствии последнего слагаемого:

$$I_{\text{уд}} W = H_c \cdot L_{\text{ср}} + H_{\text{я}} \cdot L_{\text{яср}} = 411,6 \text{ А.}$$

Необходимая величина тока в катушке для удержания якоря значительно меньше тока срабатывания и равна: $I_{\text{уд}} = 0,274 \text{ А}$. В расчёте не учитывается рабочее положение устройства, вес якоря и сила упругости возвратной пружины.

Контрольные вопросы:

1. По какому критерию различаются магнитномягкие и магнитнотвёрдые электротехнические стали?
2. Критерии при выборе материалов для устройств постоянного и переменного токов.
3. На какие потери влияет повышенная частота переменного тока?
4. Причина различия токов срабатывания и удержания в электромагнитных устройствах.
5. От какого параметра зависит нагрев катушки устройства и в конечном результате допустимая плотность тока в ней?
6. Понятие коэффициента возврата релейно-контактной аппаратуры.
7. Каким образом конструктивно формируется требуемый коэффициент возврата защитных аппаратов?

Практическое занятие 2.

Расчёт параметров линейной модели однофазного двухобмоточного трансформатора (Т-образной схемы) по результатам экспериментов или по паспортным данным

Цель семинара: приобрести навыки использования паспортных или экспериментально полученных данных электротехнического устройства для построения компьютерной модели и оценки принимаемых допущений при построении модели на примере одного из массовых электротехнических устройств переменного тока - однофазного двухобмоточного трансформатора.

На семинаре дополнительно к лекции рассматриваются особенности режимов холостого хода и короткого замыкания при исследовании однофазного двухобмоточного трансформатора и выполняются расчёты параметров исследуемого устройства. Каждый студент выполняет свой вариант задания по исходным данным, приведённым в таблице приложения 1. Навыки расчёта параметров используются в последующей лабораторной работе.

В Т-образной схеме трансформатора действительная магнитная связь между обмотками заменяется электрической связью с сохранением энергетических соотношений цепей. Поток взаимной индукции моделируется индуктивностью L_{12} с протекающим по ней намагничивающим током $i_{1xx} = i_\mu$. Потери в сердечнике P_c также обусловлены током намагничивания и не зависят от нагрузки: $p_c = i_{1xx}^2 \cdot R_{12}$. Так как вторичная цепь подключается параллельно цепи намагничивания, то ток проходит в неё из первичной обмотки непосредственно и в соответствии с законом Кирхгофа для токов равен: $i_2^* = (i_1 - i_\mu) = \frac{i_2}{K_{тр}}$ (см. подробнее в [1]).

Соответственно пересчитываются все параметры вторичной цепи:

$$U_2^* = U_2 \cdot K_{тр} \quad ; \quad R_2^* = R_2 \cdot K_{тр}^2 \quad ; \quad L_2^* = L_2 \cdot K_{тр}^2 \quad .$$

Исходные данные для использования в качестве паспортных данных или расчёта параметров Т-образной схемы получают измерением токов в обмотках, напряжений и активной мощности, потребляемой трансформатором от источника, для двух режимов работы: режима холостого хода и режима короткого замыкания.

В Т-образной схеме режиму холостого хода соответствует цепь, показанная на рис.1.

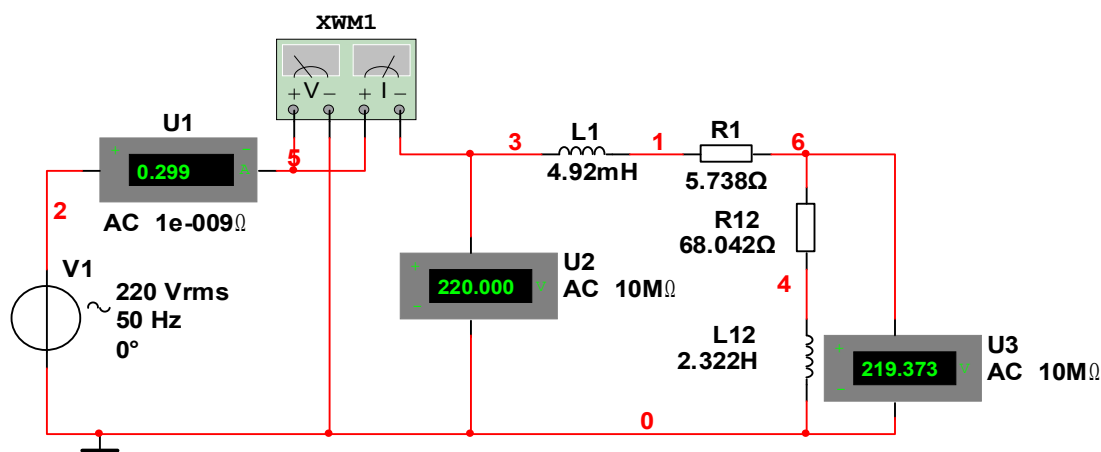


Рис.1. Схема опыта холостого хода

В опыте холостого хода определяем реальные значения тока намагничивания $I_{\text{лх}}$, напряжение на вторичной обмотке $U_{2\text{ном}}$, коэффициент трансформации $K_{\text{тр}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}}$ и мощность холостого хода, которая расходуется в первичной обмотке и в стали сердечника $P_{\text{хх}}$.

В Т-образной схеме режиму короткого замыкания соответствует цепь, показанная на рис.2.

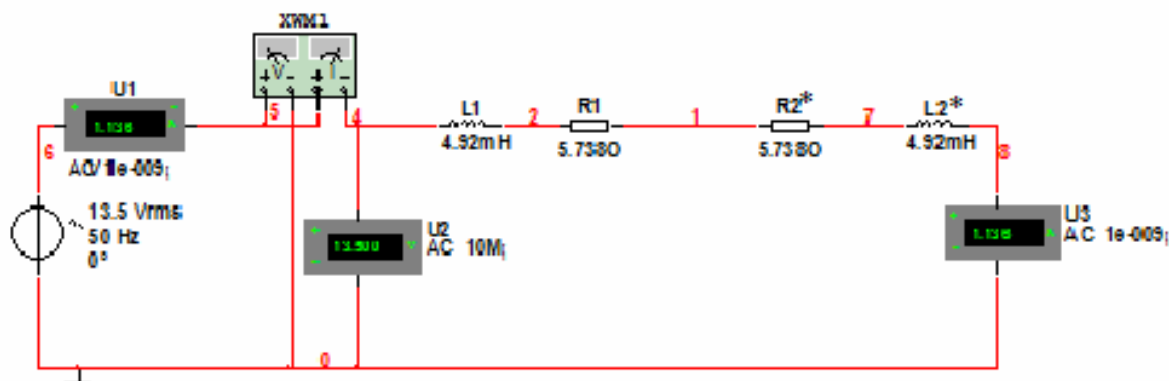


Рис.2. Схема опыта короткого замыкания для Т-образной модели трансформатора

В опыте короткого замыкания задаём номинальные значения токов $I_{1\text{ном}} = I_{2\text{ном}}^*$ регулируя напряжение на первичной обмотке до величины $U_{1\text{кз}}$. Измеряется активная мощность $P_{1\text{кз}}$ Вт.

Пример расчёта параметров Т-образной схемы замещения однофазного трансформатора

Расчёт выполняем по исходным данным, полученным при исследовании серийного трансформатора, а также по известным паспортным данным:

$S=250$ ВА, $U_{1\text{ном}}=220$ В, $I_{1\text{ном}}=1,14$ А, $I_{\text{лх}}=0,31$ А, $P_{\text{хх}}=6,99$ Вт, $U_{2\text{ном}}=140$ В, $U_{1\text{кз}}=13,5$ В, $P_{\text{кз}}=14,99$ Вт.

1. Расчёт номинальных токов первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$I_{1\text{ном}} = S / U_{1\text{ном}} = 250 / 220 = 1,14 \text{ А}; \quad I_{2\text{ном}} = S / U_{2\text{ном}} = 250 / 140 = 1,786 \text{ А}.$$

2. Расчёт суммы сопротивления первичной обмотки и приведённого сопротивления вторичной обмотки по данным опыта короткого замыкания:

$$R_{\text{кз}} = R_1 + R_2^* = P_{\text{кз}} / I_{1\text{ном}}^2 = 14,99 / 1,306 = 11,476 \text{ Ом}.$$

3. Расчёт сопротивления первичной обмотки и приведённого сопротивления вторичной обмотки:

$$R_1 = R_2^* = 0,5 R_{\text{кз}} = 5,738 \text{ Ом}.$$

4. Расчёт модуля комплексного сопротивления контура модели режима короткого замыкания:

$$|Z_{\text{кз}}| = U_{1\text{кз}} / I_{1\text{ном}} = 13,5 / 1,14 = 11,842 \text{ Ом}.$$

5. Расчёт модуля реактивного индуктивного сопротивления контура модели режима короткого замыкания:

$$X_{\text{кз}} = \sqrt[2]{(Z_{\text{кз}}^2 - R_{\text{кз}}^2)} = \sqrt[2]{(11,842^2 - 11,476^2)} = 3,03 \text{ Ом}.$$

6. Расчёт суммы индуктивности рассеяния первичной обмотки и приведённого значения вторичной обмотки:

$$L_{\text{кз}} = L_1 + L_2^* = X_{\text{кз}} / 2\pi f = 3,03 / 314 = 0,00984 \text{ Гн}.$$

7. Расчёт индуктивности рассеяния первичной обмотки и приведённого значения индуктивности рассеяния вторичной обмотки:

$$L_1 = L_2^* = 0,5 L_{\text{кз}} = 0,5 \cdot 0,00984 = 4,92 \text{ мГн}.$$

По исходным данным, полученным в опыте холостого хода, вычисляем параметры контура намагничивания.

8. Расчёт суммы сопротивления первичной обмотки и сопротивления, моделирующего потери в сердечнике трансформатора:

$$R_{\text{xx}} = R_1 + R_{12} = P_{\text{xx}} / I_{1\text{xx}}^2 = 6,99 / 0,31^2 = 73,78 \text{ Ом}.$$

9. Вычисление сопротивления, моделирующего потери в сердечнике трансформатора:

$$R_{12} = R_{\text{xx}} - R_1 = 73,78 - 5,738 = 68,042 \text{ Ом}.$$

10. Расчёт модуля сопротивления контура холостого хода:

$$|Z_{\text{xx}}| = U_{1\text{ном}} / I_{1\text{xx}} = 220 / 0,31 = 709,68 \text{ Ом}.$$

11. Расчёт модуля реактивного индуктивного сопротивления контура холостого хода:

$$X_{\text{xx}} = \sqrt[2]{(|Z_{\text{xx}}|^2 - R_{\text{xx}}^2)} = \sqrt[2]{(709,68^2 - 73,78^2)} = 706,54 \text{ Ом}.$$

12. Расчёт суммы индуктивности рассеяния первичной обмотки и индуктивности, соответствующей потоку взаимной индукции:

$$L_{\text{xx}} = L_1 + L_{12} = X_{\text{xx}} / 2\pi f = 706,54 / 314 = 2,269 \text{ Гн}.$$

13. Расчёт индуктивности, соответствующей потоку взаимной индукции:

$$L_{12} = L_{xx} - L_1 = 2,3269 - 0,00492 = 2,322 \text{ Гн.}$$

В результате расчётов по данным, полученным в опытах рис.1 и рис.2 , получаем параметры сердечника и обмоток для Т-образной схемы трансформатора, показанной на рис.3.

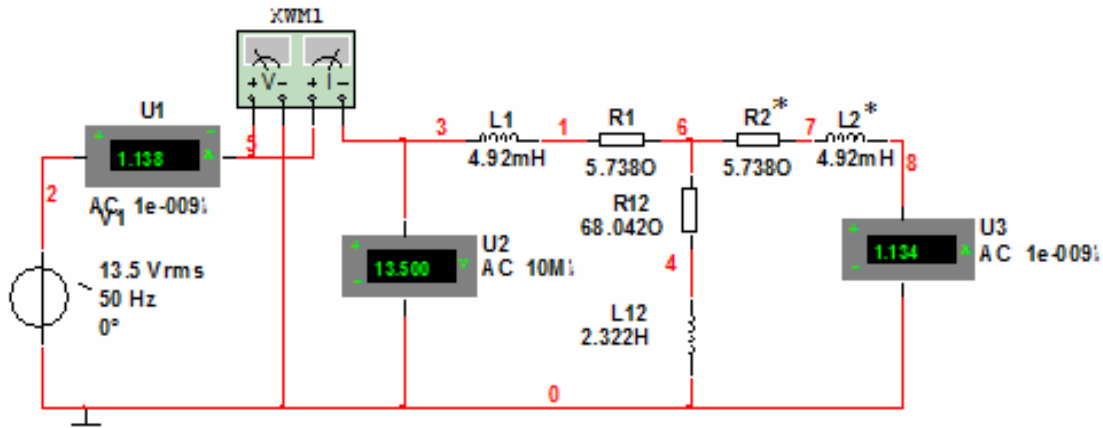


Рис.3. Схема Т-образной модели трансформатора со всеми параметрами в режиме опыта короткого замыкания

Контрольные вопросы

1. Определение трансформатора, как устройства.
2. Понятие обратимости трансформатора.
3. Назначение сердечника и его устройство.
4. Как преобразуются напряжения и токи в трансформаторе?
5. Понятие идеального трансформатора.
6. Какие свойства и параметры учитываются в реальном трансформаторе?
7. Условия проведения опыта холостого хода.
8. Условия проведения опыта короткого замыкания.
9. В чём нарушен принцип работы трансформатора в Т-образной схеме замещения?
10. Как достигается соответствие процессов в Т-образной модели и в реальном трансформаторе?
11. Понятие намагничивающего тока.
12. Строгое определение коэффициента трансформации трансформатора.
13. Приближённое определение коэффициента трансформации трансформатора.
14. Почему отношение токов первичной и вторичной обмоток не соответствует коэффициенту трансформации трансформатора?
15. Как снизить потери в трансформаторе?
16. Объяснить физические причины низкого КПД маломощных трансформаторов.
17. Почему при одинаковом условном направлении напряжений на обмотках трансформатора токи в обмотках текут в разных направлениях?

Практическое занятие 3.

Статические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Цель семинара: приобретение навыков расчёта и построения скоростных и механических (статических) характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением по каталожным данным.

В каталогах или справочниках для серий электрических машин могут приводиться различные наборы паспортных данных, позволяющих вычислить другие параметры, нужные для расчёта (см. [4]). В настоящей работе в качестве вариантов заданий используются двигатели постоянного тока, приведённые в таблице приложения 2.

Для вычисления точек скоростной характеристики (1) или механической характеристики (2) необходимо знать величины номинального напряжения на якоре $U_{яном}$, полного активного сопротивления якорной цепи $R_{я\Sigma}$, номинального тока якоря $I_{яном}$, номинальной скорости вращения вала двигателя $\Omega_{ном}$ и коэффициента ЭДС и электромагнитного момента двигателя $K_E = K_M = C \cdot \Phi_0$.

Уравнение скоростной характеристики:

$$\Omega = \frac{U_{я}}{C \cdot \Phi_0} - \frac{R_{я}}{C \cdot \Phi_0} \cdot I_{я} \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (1)$$

Уравнение механической характеристики:

$$\Omega = \frac{U_{я}}{C \cdot \Phi_0} - \frac{R_{я}}{(C \cdot \Phi_0)^2} \cdot M_{эм} \text{ рад/с}. \quad (2)$$

Расчёт исходных данных для построения скоростной (1) и механической (2) характеристик.

1. Расчёт полного активного сопротивления цепи якоря при наличии добавочных полюсов:

$$R_{я\Sigma} = R_{яном} + R_{доб}.$$

2. Расчёт номинальной скорости вращения вала двигателя:

$$\Omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n}{30} \text{ рад/с}.$$

3. Расчёт номинального момента в [Н·м] на валу двигателя:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\Omega_{ном}} \text{ Вт/(рад/с)}.$$

4. Расчёт мощности, потребляемой из сети якорем и обмоткой возбуждения в номинальном режиме:

$$P_{\text{IНОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta} \text{ Вт.}$$

5. Расчёт мощности, потребляемой из сети обмоткой возбуждения в номинальном режиме:

$$P_{\text{ВНОМ}} = \frac{U_{\text{ВНОМ}}^2}{R_{\text{В}}} \text{ Вт.}$$

6. Расчёт мощности, потребляемой из сети обмоткой якоря в номинальном режиме:

$$P_{\text{ЯНОМ}} = P_{\text{IНОМ}} - P_{\text{ВНОМ}} \text{ Вт.}$$

7. Расчёт номинального тока якоря:

$$I_{\text{ЯНОМ}} = \frac{P_{\text{ЯНОМ}}}{U_{\text{ЯНОМ}}} \text{ А.}$$

8. Расчёт значения ЭДС обмотки якоря в статическом номинальном режиме:

$$E_{\text{НОМ}} = U_{\text{ЯНОМ}} - R_{\Sigma} \cdot I_{\text{ЯНОМ}} \text{ В.}$$

9. Расчёт коэффициента ЭДС двигателя при номинальном потоке и коэффициента электромагнитного момента:

$$K_E = \frac{E_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}; \quad K_M = K_E \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}.$$

10. Задание на расчёт и построение статических характеристик.

По указанию преподавателя студент должен вычислить по 2 точки статических характеристик (по уравнениям (1) и (2)) и построить графики $\Omega(I_{\text{я}})$ и $\Omega(M_{\text{эм}})$ естественной и искусственных характеристик.

При расчёте искусственной характеристики с напряжением на якоре, меньшим номинального напряжения, и с номинальным напряжением на обмотке возбуждения следует выбирать напряжение на якоре $U_{\text{я}} = (0,3 \dots 0,9) \cdot U_{\text{ян}}$.

При расчёте искусственной характеристики с номинальным напряжением на якоре и с пониженным напряжением на обмотке возбуждения следует выбирать напряжение на обмотке возбуждения в интервале $U_{\text{в}} = (0,5 \dots 0,9) \cdot U_{\text{вн}}$.

Пример расчёта параметров для построения статических характеристик

1. В качестве примера рассмотрим расчёт статических характеристик для двигателя закрытого исполнения, пригодного для работы в зоне шлифования, где он подвержен брызгам охлаждающей жидкости, отработанного абразива и мелкой металлической стружки.

2. Паспортные данные двигателя ДИ-22: $P_{\text{н}} = 2,8 \text{ кВт}$; $U_{\text{ян}} = 110 \text{ В}$; $I_{\text{ян}} = 31 \text{ А}$; $n_{\text{н}} = 4500 \text{ об/мин}$; $U_{\text{вн}} = 300 \text{ В}$; $R_{\text{ян}} = 0,060 \text{ Ом}$; $R_{\text{доб пол}} = 2 \cdot 0,014 \text{ Ом}$.

3. Учёт изменения сопротивления обмоток от нагрева при длительной работе.

С учётом рекомендаций проектных организаций увеличиваем сопротивление якорной цепи машины на 20 %:

$$R_{\Sigma} = 1,2 \cdot (0,06 + 0,028) = 0,105 \text{ Ом}.$$

4. Определяем номинальную скорость вращения через заданное значение номинальной частоты вращения:

$$\Omega_n = \pi \cdot n / 30 = 3,14 \cdot 4500 / 30 = 471 \text{ рад/с}.$$

5. Вычисляем константу двигателя из уравнения статики для номинального режима:

$$K_E = \frac{U_{\text{ян}} - I_{\text{ян}} \cdot R_{\Sigma}}{\Omega} = \frac{110 - 31 \cdot 0,105}{471} = 0,227 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

6. Вычисление моментов машины:

определяем момент электромагнитный номинальный

$$M_{\Sigma} = K_M \cdot I_{\text{ян}} = 0,227 \cdot 31 = 7,037 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

определяем момент номинальный на валу двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\Omega_n} = \frac{2800}{471} = 5,945 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Контрольные вопросы

1. Понятие статической скоростной характеристики.

2. Понятие статической механической характеристики.

3. При каком условии константа по ЭДС при номинальном потоке будет численно равна константе для электромагнитного момента?

4. При каком потоке можно регулировать скорость вращения двигателя изменением напряжения на якоре?

5. При каком напряжении на якоре можно регулировать скорость вращения двигателя ослаблением потока?

6. Понятие электромагнитного и номинального моментов.

7. Влияние величины момента инерции на вид статической характеристики.

Практическое занятие 4.

Исследование уравнения динамики машины постоянного тока с независимым возбуждением

Цель семинара: исследовать передаточную функцию машины постоянного тока как электромеханического преобразователя. Обратить внимание на то, что общее уравнение машины включает две передаточные функции: по управляющему воздействию (напряжению на якоре) и по возмущающему воздействию (моменту статической нагрузки).

Уравнение динамики машины:

$$\Omega = \frac{1}{K(T_{\text{э}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1)}U_{\text{я}} - \frac{R_{\text{я}}(1 + T_{\text{э}}p)}{K^2(T_{\text{э}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1)}M_{\text{с}} \text{ рад/с.} \quad (1)$$

В знаменатели обеих передаточных функций входит одно и то же выражение, представляющее собой характеристическое уравнение общего уравнения (1):

$$T_{\text{м}}T_{\text{э}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1 = 0. \quad (2)$$

Для анализа характеристического уравнения (2) необходимо вычислить постоянные времени машины:

электромагнитная постоянная времени: $T_{\text{э}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}\Sigma} \text{ с};$

электромеханическая постоянная времени: $T_{\text{м}} = R_{\text{я}\Sigma} \cdot J / K^2 \text{ с}.$

После вычисления значений постоянных времени вычисляем корни характеристического уравнения (2). По виду корней определяем вид переходного процесса и оцениваем его длительность. Оценка длительности переходного процесса позволяет грамотно задать длительность расчёта при моделировании на компьютере.

Корни уравнения (2) вычисляют по формуле:

$$p_{1,2} = \frac{-T_{\text{м}} \pm \sqrt{T_{\text{м}}^2 - 4T_{\text{м}}T_{\text{э}}}}{2T_{\text{м}}T_{\text{э}}}.$$

Соотношение постоянных времени влияет на вид переходного процесса. Различают три возможных случая.

1. Оба корня отрицательные действительные различные:

$$p_1 = -\alpha_1; p_2 = -\alpha_2, \text{ если } T_{\text{м}}^2 > 4T_{\text{м}}T_{\text{э}}.$$

В этом случае получаем апериодический процесс второго порядка изменения скорости от времени. В выражение свободной составляющей входят два слагаемых с экспоненциальными функциями. Перерегулирования в переходном процессе нет.

2. Оба корня отрицательные действительные равные.

$$p_1 = p_2 = -\alpha, \text{ если } T_{\text{м}}^2 = 4T_{\text{м}}T_{\text{э}}.$$

Предельный случай аperiodического процесса, возникающий при равенстве подкоренного выражения нулю.

3. Два сопряжённых комплексных корня

$$p_1 = -\alpha + j\beta; \quad p_2 = -\alpha - j\beta, \quad \text{если } T_m^2 < 4T_m T_\Sigma.$$

В этом случае получаем колебательный переходный процесс с угловой частотой собственных колебаний, равной $\beta = 2\pi f$ рад/с, то есть периодом T , равным $2\pi/\beta$ с (см. [1 и 2]).

Примечание. Необходимо оговорить понятие нуля для случая 2. Математически нуля никогда не будет: на каком-то разряде появится значащая цифра. Поэтому для качественной оценки вида процесса за нуль можно принять величину подкоренного выражения, если она будет меньше меньшей постоянной времени в 10 и более раз.

Пример определения корней характеристического уравнения и анализ переходного процесса

1. Определение корней характеристического уравнения проведём для двигателя типа 2ПН112МУХЛ4. Используем только необходимые каталожные данные. Суммарное сопротивление обмотки якоря и добавочных полюсов R_{Σ} равно 1,47 Ом. Индуктивность якорной цепи L_{Σ} равна 0,0093 Гн. Следовательно, электромагнитная постоянная времени равна:

$$T_\Sigma = L_{\Sigma} / R_{\Sigma} = 0,0093 / 1,47 = 6,33 \text{ мс.}$$

Момент инерции якоря машины J равен 0,015 кг·м². Константа двигателя определяется по формулам семинара 3 и равна 0,868 В·с/рад или Н·м/А. Следовательно, электромеханическая постоянная времени равна: $T_m = R_{\Sigma} \cdot J / K^2 = 1,47 \cdot 0,015 / 868^2 = 29,3 \text{ мс.}$

2. Вычисляем детерминант квадратного уравнения:

$$T_m^2 - 4T_m T_\Sigma = 29,3^2 - 4 \cdot 29,3 \cdot 6,33 = 116,614.$$

3. Корень квадратный из положительного числа равен 10,8. Следовательно, имеем два действительных корня:

$$p = \frac{-T_m \pm \sqrt{T_m^2 - 4T_m T_\Sigma}}{2T_m T_\Sigma} = \frac{-29,3 + 10,8}{2 \cdot 29,3 \cdot 6,33} \cdot 10^3 = -49,87 \frac{1}{\text{с}};$$

$$p = \frac{-T_m \pm \sqrt{T_m^2 - 4T_m T_\Sigma}}{2T_m T_\Sigma} = \frac{-29,3 - 10,8}{2 \cdot 29,3 \cdot 6,33} \cdot 10^3 = -108,1 \frac{1}{\text{с}}.$$

4. Анализ корней и длительности переходного процесса.

Для первого корня, имеющего меньшую величину, получаем большее значение показателя экспоненты, равное обратной величине корня и составляющее 20,05 мс. Так как второй корень имеет вдвое большую величину,

то длительность процесса определяется первым корнем с более медленным затуханием экспоненты. Длительность переходного процесса определяем как в цепи первого порядка по первому корню $t_{\text{пн}} = 5 \cdot 20,05 = 100 \text{ мс}$.

5.Правильность расчёта подтверждается моделированием процесса на компьютере. График изменения частоты вращения показан на рис.1. Двигатель пускается на номинальную частоту вращения 2200 об/мин с номинальной нагрузкой 11,74 Н·м.

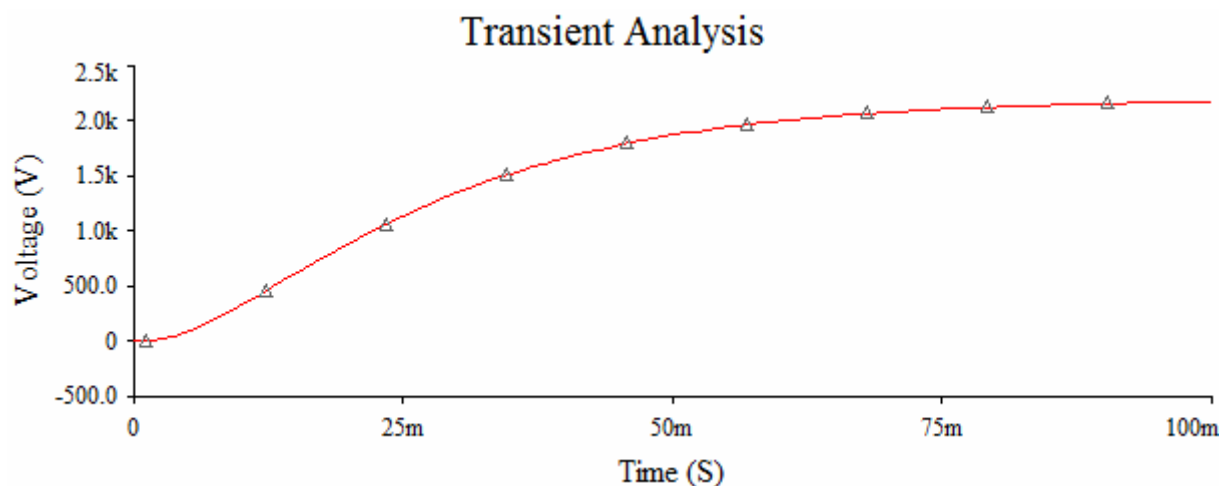


Рис.1. График изменения частоты вращения при пуске на номинальную частоту вращения 2200 об/мин с номинальной нагрузкой 11,74 Н·м

Контрольные вопросы

- 1.Как влияет величина приведённого к валу двигателя момента инерции механизма на переходный процесс?
- 2.Влияет на длительность переходного процесса нагрев машины или нет?
- 3.Какие внешние воздействия на двигатель учитываются в передаточной функции?
- 4.Понятие частоты собственных колебаний двигателя.
- 5.Виды возможных переходных процессов в двигателе.
- 6.Вид характеристического уравнения двигателя.
- 7.Почему при компьютерном исследовании процессов в технической системе с двигателем необходимо провести ряд предварительных расчётов?
- 8.Возможные комбинации корней характеристического уравнения.

Практическое занятие 5.

Исследование механической характеристики асинхронной машины

Цель семинара: приобретение навыков работы с каталогами и методики выбора машин по ряду характеристик.

Машины подразделяются прежде всего по исполнению: закрытые, защищённые, открытые, взрывозащищённые двигатели и др.

По способу монтажа двигателя выпускаются: на лапах; на плитах; с одним или двумя фланцами и др.

Внутри серии двигатели подразделяются по синхронной частоте вращения поля и в группе для данной частоты вращения поля по величине мощности или момента на валу двигателя (см. подробнее [4]).

Для асинхронных машин общего назначения в каталогах приводятся данные, позволяющие определить 5 точек естественной механической характеристики:

- синхронная частота вращения поля статора (с которой мог бы вращаться ротор машины при величине момента сопротивления, равном нулю);
- номинальная частота вращения ротора при номинальном моменте на валу двигателя;
- частота вращения ротора при максимальном моменте, заданном в каталоге кратностью максимального момента к номинальному моменту;
- частота вращения ротора при минимальном моменте, заданном в каталоге кратностью минимального момента к номинальному моменту;
- частота вращения ротора, равная 0 при пусковом моменте, заданном в каталоге кратностью пускового момента к номинальному моменту.

Каждый студент для своего варианта машины вычисляет и строит естественную механическую характеристику и искусственную для повышенного или пониженного напряжения сети в пределах допустимых отклонений (от +10 % до -15 %).

Регулирование скорости изменением напряжения на статоре

На рис.1 показано семейство механических характеристик при номинальном напряжении и напряжениях, меньших номинального.

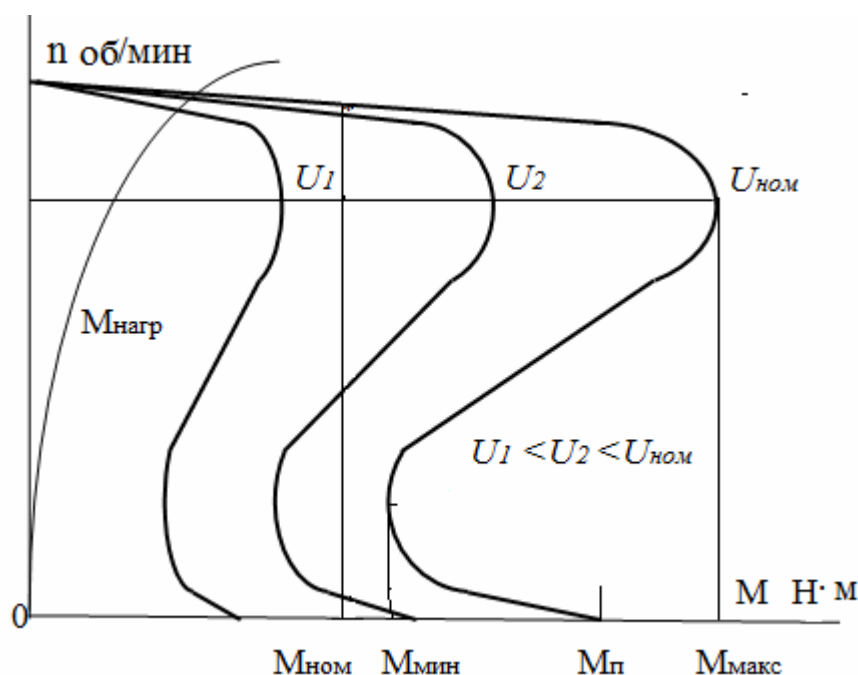


Рис.1. Семейство механических характеристик при изменении напряжения на обмотке статора

Даже при таком первичном анализе двигателя, выбранного по требуемой мощности и с желаемой номинальной частотой вращения ротора, иногда информация оказывается достаточной, чтобы продолжить более глубокий анализ по регулировочным свойствам и совместимости конструкции двигателя с конструкцией станка (масса двигателя на подвижных узлах станка, наличие или отсутствие фланца, наличие или отсутствие встроенных датчиков, способ подвода энергии при перемещениях двигателя и др.) или отвергнуть двигатель уже на этом этапе, как не удовлетворяющий требованиям.

В качестве примера на рис.1 на семейство механических характеристик нанесена вентиляторная характеристика, которая свойственна таким устройствам, как вентиляторы и компрессоры. На первый взгляд диапазон регулирования очень мал. Но одновременно уменьшаются и момент и скорость, то есть существенно уменьшается мощность, иногда в несколько раз в зависимости от сочетания характеристик. Это самый простой способ регулирования, дающий значительную экономию электроэнергии при снижении нагрузки.

Анализ механических характеристик позволяет определить возможность пуска двигателя под нагрузкой. Нельзя использовать двигатель с моментом номинальным близким или равным моменту минимальному. В случае понижения напряжения сети, даже нормированного, не говоря о перегрузке сети, двигатель может застрять на нижнем участке характеристики и устойчиво работать с токами, близкими к пусковым. В результате он быстро перегреется и может сгореть, так как тепловая защита инерционная и рассчитана на медленный нагрев при небольших перегрузках, а максимальная

быстродействующая защита настраивается на токи, большие пусковых в 1,5-2 раза, чтобы не мешать нормальному пуску и просто не будет реагировать.

Контрольные вопросы

1. Устройство асинхронного двигателя.
2. Почему двигатель называется асинхронным?
3. Понятие синхронной частоты вращения.
4. Понятие скольжения. Номинальное скольжение.
5. Типы конструкций роторов асинхронных двигателей.
6. Целесообразность регулирования скорости двигателей переменного тока изменением напряжения.
7. Вид искусственной характеристики двигателя при снижении напряжения.
8. Назначение максимальной защиты двигателей.
9. Назначение тепловой защиты двигателей.
10. Условие настройки максимальной защиты двигателей.
11. Понятие о конструктивном исполнении двигателей.

**Варианты заданий для семинара по теме:
"Электромагнитные устройства переменного тока"**

Данные варианты используются, если семинар по расписанию предшествует лабораторной работе. Если лабораторная работа предшествует семинару, то расчёты проводятся для реального устройства, исследованного в лабораторной работе.

№ п/п	Полная мощность, ВА	$U_{2ном}$, В	$U_{1кз}$, %	$P_{кз}$, Вт	$I_{1хх}$, %	$P_{хх}$, Вт
1	10	5	12	1	35	0,8
2	10	10	12	1	35	0,8
3	10	15	12	1	35	0,8
4	10	30	12	1	35	0,8
5	10	50	12	1	35	0,8
6	20	5	10	1,8	33	1,2
7	20	10	10	1,8	33	1,2
8	20	15	10	1,9	33	1,3
9	20	30	10	1,9	33	1,4
10	20	50	10	1,9	33	1,5
11	50	10	8	3	32	2,0
12	50	15	8	3	32	2,0
13	50	20	8	3	32	2,0
14	50	30	8	3,5	32	2,5
15	50	50	8	3,5	32	2,5
16	100	10	7	4	30	3,5
17	100	20	7	4	30	3,5
18	100	30	7	4,5	30	3,2
19	100	40	7	4,5	30	3,2
20	100	50	7	4,5	30	3,2
21	200	25	6	7	28	4,5
22	200	50	6	7	28	4,5
23	200	80	6	8	28	4,0
24	200	100	6	8	28	4,0
25	200	127	6	8	28	4,0
26	250	50	5	12	25	6,0
27	250	80	5	11	25	6,0
28	250	100	5	10	25	6,0
29	250	130	4.5	8	25	5,5
30	250	140	4.5	11	26,3	6,5

Напряжение первичной обмотки всех трансформаторов равно 220В.

Приложение 2

Технические данные исследуемого двигателя

Тип двигателя	Мощность	Напряжение питания на обм. якоря	Частота вращения		КПД	Сопротивление обмотки при 15 ⁰ С			Индуктивн. цепи якоря	Момент инерции
			но-мин.	максим.		якоря	добав. полюсов	возбуждения		
	кВт	В	об/мин.		%	Ом			Гн	кг·м ² (Н·м·с ² /рад)
	$P_{ном.}$	$U_{аном}$	$n_{ном.}$	n_{max}	$\eta_{ном}$	R_a	$R_{доб.}$	R_f	L_a	J
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ПН90 Мухл4	0,25	220	1120	2000	57,0	15,47	11,20	610 162	297	0,004
2ПН90 Мухл4	0,37	220	1500	2250	61,5	10,61	6,66	610 162	190	0,004
2ПН90 Мухл4	0,71	220	2360	3540	70,0	3,99	2,55	470 123	79	0,004
2Мухл4 ПН90	1,00	220	3000	4000	72,5	2,52	1,47	365 92	48	0,004
2ПН112 Лухл4	1,25	220	1000	3500	68,0	2,34	2,040	202 52	34,0	0,018
2ПН112 Мухл4	1,50	220	1500	4000	70,0	1,770	1,550	181 44	19,5	0,015
2ПБ112 Лухл4	1,50	220	2240	4000	80,0	0,740	0,740	303 80	12,0	0,018
2ПБ112 Лухл4	2,00	220	3150	4000	81,0	0,413	0,411	303 80	7,1	0,018
2ПН100 Лухл4	2,20	220	3150	4000	81,0	0,52	0,510	295 81	21,0	0,012
2ПН112 Лухл4	2,20	220	1500	4000	75,0	0,968	0,848	168 44	14,0	0,018
2ПН112 Мухл4	2,50	220	2200	4000	76,0	0,788	0,682	156 39,4	9,3	0,015
2ПН112 Лухл4	3,40	220	2200	4000	78,0	0,413	0,411	125 33,5	6,2	0,018
2ПН112 Мухл4	3,60	220	3000	4000	79,0	0,420	0,356	129 33,6	4,8	0,015
2ПН132 Мухл4	4,0	220	1500	4000	79,0	0,564	0,336	134 35	11,0	0,038
2ПБ132 Мухл4	4,50	220	3150	4000	81,5	0,185	0,148	202 54,5	4,2	0,038
2ПН112 Лухл4	5,30	220	3000	4000	80,0	0,242	0,195	96,3 25,3	3,5	0,018
2ПН132	5,5	220	1500	4000	80,5	0,322	0,270	101	7,0	0,048

Лухл4								27,8		
2ПН132 Мухл4	7,0	220	2240	4000	83,0	0,226	0,166	111 25,6	4,6	0,038
Окончание приложения 2										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2ПН132 Лухл4	8,5	220	2200	4000	84,0	0,167	0,124	89 25	3,5	0,048
2ПН132 Мухл4	10,5	220	3000	4000	84,0	0,140	0,094	111 25,6	2,8	0,038
2ПФ160 Лухл4	11,0	220	1500	4200	84,5	0,096	0,073	49,4 13,4	3,1	0,10
2ПФ160 Мухл4	13,0	220	2240	4000	87,0	0,081	0,056	82 21,9	2,2	0,083
2ПН132 Лухл4	14,0	220	3150	4000	86,0	0,080	0,066	76 20,6	1,8	0,048
2ПФ160 Мухл4	16,0	220	3150	4000	87,0	0,037	0,024	53,1 12,6	0,99	0,083
2ПФ160 Лухл4	16,0	220	2360	4000	87,0	0,044	0,031	49,4 13,4	1,4	0,10
2ПФ160 Лухл4	18,5	220	3150	4000	87,5	0,024	0,017	49,4 13,4	0,78	0,10

Список рекомендуемой литературы

1. Кузовкин В.А. Моделирование процессов в электрических цепях / В.А. Кузовкин, В.В. Филатов.- М.: Изд "Станкин," 2006.-212с.
2. Кузовкин В.А. Электротехника и электроника: учебник для бакалавров / В.А. Кузовкин, В.В. Филатов.- М.: Юрайт, 2013. - 431с. (Серия: Бакалавр. Углублённый курс).
3. Кузовкин В.А., Филатов В.В., Чумаева М.В. Практическая электротехника. Основные принципы описания и моделирования электрических устройств: учебное пособие / В.А. Кузовкин, В.В. Филатов, М.В. Чумаева. - Старый Оскол: ТНТ, 2016. - 372с.
4. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам.: Учеб. пособие для студентов. М.: "Академия", 2005.- 480с.