

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. И. РАЗЗАКОВА**

**«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ОБЩАЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОПРИВОД

**Методическое пособие к выполнению лабораторных работ
для студентов неэнергетических специальностей.**

Бишкек 2018 г.

«Рассмотрено»
и одобрено на заседании
кафедры «ТОЭ и ОЭ»
пр. № 5 от 29.01. 2018г.

«Рекомендовано»
к изданию методической комиссией ЭФ
пр.№ 7 от 19.03. 2018г.

Составители: к.т.н., доцент Э.Б. Исакеева, ст.препод. Самсалиева Р.Ж.,
препод. Аскарбек уулу Нурлан, препод. Бекбоев А.Б.

УДК 621.311

Электротехника, электроника и электропривод: Методическое пособие к выполнению лабораторных работ по курсу «Электротехника, электроника и электропривод» для студентов неэнергетических специальностей КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек, 2018.г. –88с.

Излагается методика выполнения лабораторных работ, даны схемы установок, краткие теоретические сведения по физическим процессам, наблюдаемым в электрических цепях, глоссарий.

Рецензент к.т.н., доцент Дикамбаев Ш.Б.
к.т.н., доцент Самсалиев А.А.
к. т.н., с.н.с. Аккозов А.Дж.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр
Введение.....	4
Правила техники безопасности и правила работы в лабораториях кафедры.....	4
Порядок выполнения лабораторных работ.....	5
Лабораторная работа 1. Исследование активного 2-х полюсника и линии электропередачи постоянного тока.....	6
Лабораторная работа 2. Опытная проверка законов Кирхгофа и Ома...	10
Лабораторная работа 3. Пассивный двухполюсник в цепи синусоидального тока и простейшие векторные диаграммы.....	15
Лабораторная работа 4. Исследование неразветвленных цепей переменного тока. Резонанс напряжений.....	23
Лабораторная работа 5. Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой.....	28
Лабораторная работа 6. Исследование трехфазной цепи, соединенной треугольником.....	36
Лабораторная работа 7. Изучение способов включения и регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока	39
Лабораторная работа 8. Изучение способов пуска и снятие основных характеристик трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	48
Глоссарий	66

Выполнение лабораторных работ по «Электротехнике, электронике и электроприводу» предполагается осуществлять в два этапа: на первом (подготовительном) изучается теория и выполняется расчетная часть работы, на втором (заключительном) - выполняется экспериментальная часть и производится окончательная обработка результатов. Для выполнения расчетной части всех лабораторных работ составлены программы для персональных ЭВМ. Экспериментальная часть лабораторных работ выполняется на универсальных лабораторных стендах.

**ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА РАБОТЫ
В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ**

1. К работе в лаборатории студенты допускаются только после инструктажа по технике безопасности.

2. Напряжения источников, используемые в лаборатории, являются опасными для жизни, поэтому при работе в лаборатории необходимо быть предельно собранным, внимательным и строго выполнять правила работы на универсальных лабораторных стендах.

3. Перед началом работы необходимо убедиться в том, что все элементы стенда не находятся под напряжением, а рабочее место освобождено от посторонних предметов.

4. Сборку электрической цепи рекомендуется производить в следующей последовательности: в первую очередь следует собирать токовые цепи, а затем - цепи напряжения. Рекомендуется избегать излишнего перекрещивания проводов на рабочем столе и соединений нескольких проводов в одной точке.

5. Прежде чем включить источник питания, необходимо его регулятор вывести в нулевое положение, а на регулируемых элементах (резисторах, конденсаторах, катушках индуктивностей) установить заданные значения параметров.

6. Включение цепи под напряжение можно производить только с разрешения руководителя работ (преподавателя или лаборанта) после проверки правильности ее сборки.

7. Любые изменения в структуре цепи можно производить только при отключенном источнике питания. Повторное включение цепи под напряжение производится с разрешения руководителя работ.

8. При выполнении экспериментальной части работы нельзя прикасаться к открытым токоведущим элементам цепи, а также к трубам и радиаторам отопительной системы.

9. После завершения экспериментальных исследований результаты работы должны быть предъявлены руководителю для их проверки и утверждения.

10. Запрещается выполнение лабораторных работ при отсутствии преподавателя или лаборанта.

11. При обнаружении на рабочем месте неисправностей, способных вызвать поражение электрическим током, или порчу оборудования, следует немедленно отключить источник питания и поставить в известность преподавателя или лаборанта.

12. При несчастном случае следует немедленно отключить источник питания, поставить в известность руководителя работ и принять меры по оказанию первой медицинской помощи пострадавшему.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Выполнение лабораторной работы предполагается в два этапа.

Первый этап (подготовительный) выполняется заранее во время, предусмотренное для самостоятельной работы. На этом этапе студент обязан:

- 1) уяснить цель и содержание работы;
- 2) изучить теоретический материал по учебнику или конспекту;
- 3) оформить расчетную часть отчета по работе, а именно, заполнить титульный лист, зарисовать схемы цепей и таблицы.

Без подготовленного отчета по расчетной части студент не допускается к выполнению экспериментальной части работы.

Второй этап работы (экспериментальная часть и анализ результатов) выполняется непосредственно на рабочем месте в учебной лаборатории во время занятий по расписанию.

Получив разрешение от руководителя работ на выполнение экспериментальной части, бригада студентов (2-3 человека) выполняет сборку исследуемой цепи и проводит в ней измерения физических величин согласно заданию. Результаты измерений обрабатываются и вносятся в соответствующие таблицы. При проведении экспериментов следует соблюдать правила техники безопасности и правила работы в электроустановках.

По окончании экспериментальных исследований проводится анализ результатов работы, экспериментальные результаты сопоставляются с расчетными, в письменной форме делается заключение по работе.

Полностью оформленный отчет по работе в конце текущего занятия предъявляется преподавателю для проверки и получения зачета по работе. При защите отчета студенту могут быть заданы контрольные вопросы по теоретической или экспериментальной части работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на отдельных листах или в отдельной тетради и должен содержать следующие элементы:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) исходные данные (эквивалентные схемы и параметры их элементов);
- 4) основные формулы и уравнения, применяемые в расчетах;
- 5) таблицы результатов расчетов и измерений;
- 6) предусмотренные заданием графические и векторные диаграммы;
- 7) выводы по работе.

Лабораторные работы по «Общей электротехнике и электронике» выполняются на универсальных стендах фронтальным методом, при котором вся группа студентов (до 30 человек) выполняет одно и то же задание. Наличие на стендах регулируемых элементов позволяет задавать каждой бригаде студентов (2-3 человека) свой индивидуальный вариант исходных данных к каждой работе.

Оборудование универсального стенда позволяет проводить комплексные исследования различных по структуре и параметрам электрических цепей и обеспечивает материальную базу для выполнения всех лабораторных работ по теоретическим основам электротехники.

Лабораторная работа № 1

Исследование активного 2-хполюсника и линии электропередачи постоянного тока.

1. Цель работы

Исследование линии передачи постоянного тока с нагрузкой в конце линии. В результате выполнения работы студент должен изучить режимы работы электрической цепи, уметь рассчитать потерю напряжения и мощность потерь энергии в линии, КПД линии.

2. Основные теоретические положения

При передаче электрической энергии постоянного тока от источника к приемнику по проводам достаточно большой протяженности происходит потеря напряжения на сопротивлении линии передачи. В схеме замещения на рис. 1 сопротивление R_l имитирует сопротивление проводов линии передачи, R_n – сопротивление нагрузки.

Потеря напряжения равна

$$\Delta U = U_1 - U_2 = R_l I , \quad (1)$$

где U_1 и U_2 – напряжения в начале и в конце линии.

Мощность определяется формулой

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \Delta UI = I^2 R_l , \quad (2)$$

где P_1 – мощность источника или мощность в начале линии, которая равна

$$P_1 = U_1 I = (R_l + R_n) I^2 , \quad (3)$$

P_2 – мощность потребления энергии нагрузкой или мощность в конце линии

$$P_2 = U_2 I = RI^2 = \frac{RU_1^2}{(R_l + R_n)^2} \quad (4)$$

$$\text{КПД} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I}{U_1 I} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_n I}{(R_l + R_n) I} = \frac{R_n}{R_l + R_n} \quad (5)$$

Чтобы повысить КПД линии передачи, нужно уменьшить мощность потерь энергии на линии. При условии постоянства мощности источника P_1 , найдем из (3) ток в цепи и подставим в (2).

$$\Delta P = R_l I^2 = \frac{P_1^2 R_l}{U_1^2} \quad (6)$$

Очевидно, что для уменьшения величины ΔP напряжение U_1 в начале линии нужно увеличить. Поэтому при передаче электрической энергии на большие расстояния по линии электропередачи напряжение в начале линии должно быть повышено.

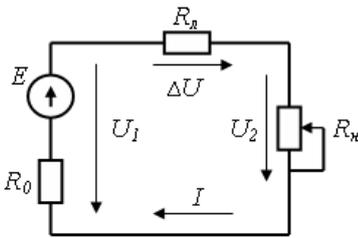


Рис. 1

Режимы работы электрической цепи (рис.1)

будет определять сопротивление нагрузки R_n . В режиме холостого хода тока в цепи нет, т.к. $R \rightarrow \infty$ (цепь разомкнута), а в режиме короткого замыкания $R=0$. При согласованном режиме мощность потребления энергии приемником P_2 должна быть максимальной. Это происходит при определенном согласовании параметров цепи.

Для определения величины сопротивления R_n , при котором мощность P_2 будет максимальной, нужно выражение (4) продифференцировать по R_n и приравнять к нулю.

$$\frac{dP_2}{dR} = \frac{U_1^2}{(R_l + R_n)^2} - \frac{2U_1^2 R}{(R_l + R_n)^3} = \frac{U_1^2 (R_l + R_n - 2R_n)}{(R_l + R_n)^3} = \frac{U_1^2 (R_l - R_n)}{(R_l + R_n)^3}$$

Полученное выражение равно нулю, если $R_l - R_n = 0$, откуда

$$R_l = R_n \quad (7)$$

Таким образом, мощность потребления энергии приемником будет максимальной, когда сопротивление нагрузки R_n равно сопротивлению линии R_l

$$P_2 = P_{2\max} = \frac{U_1^2}{4R} \quad (8)$$

При согласованном режиме мощность потерь равна

$$\Delta P = \Delta UI = \frac{U_1 I}{2} = \frac{P_1}{2} \quad (9)$$

а КПД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I}{U_1 I} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_n I}{(R_l + R_n) I} = \frac{R_n}{R_l + R_n} = \frac{R}{2R} = 0,5 \quad (10)$$

С энергетической точки зрения согласованный режим является нерациональным ($\eta = 0,5$), но он находит применение там, где важно получить максимальную мощность, а низкий КПД имеет второстепенное значение из-за малых абсолютных значений мощности. Например, в некоторых радиотехнических устройствах, в автоматике и измерительной технике.

Характер зависимостей $U_1, U_2, \Delta U, P_1, P_2, \eta$ от тока I представлен на рисунке 2.

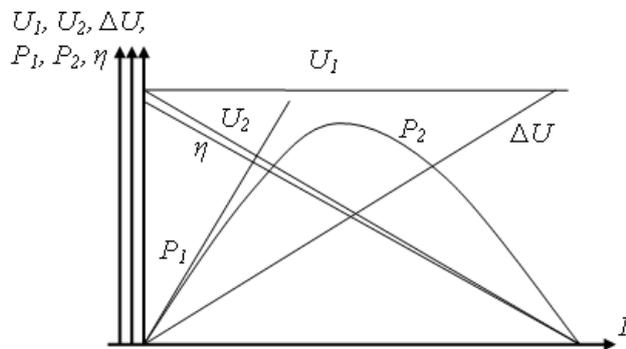


Рис. 2.

Напряжение, подаваемое на двухполюсник, т.е. напряжение в начале линии остается неизменным ($U_1 = \text{const}$) при любом значении сопротивления нагрузки. При холостом ходе, когда $R \rightarrow \infty$, ток в линии равен нулю, потери напряжения ΔU и мощности ΔP

также равны нулю, а КПД линии $\eta = \frac{U_2}{U_1} = 1$.

При включении нагрузки R_n ток в линии будет зависеть от величины R_n

$$I = \frac{U}{R_l + R_n}.$$

С уменьшением сопротивления R_n ток в линии будет увеличиваться, напряжение в конце линии U_2 и КПД η уменьшаться, а мощность энергии, потребляемой нагрузкой будет сначала увеличиваться, а затем уменьшаться, достигая своего наибольшего значения $P_{2 \max}$ при согласованном режиме.

При коротком замыкании нагрузки, когда сопротивление равно нулю $R=0$, ток в линии достигает максимального значения $I_{к.з} = \frac{U_1}{R_l}$, тогда напряжение на зажимах нагрузки U_2 , мощность P_2 и КПД η будут равны нулю.

3. Описание лабораторной работы

Элементы электрической цепи и измерительные приборы для исследования линии передачи постоянного тока расположены на панели универсального стенда.

Питание цепи осуществляется от стабилизированного источника постоянного напряжения 12В, который рассчитан на максимальный ток нагрузки 200мА. Резистор R_1 , используемый в работе, состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений. Первое, которое будет имитировать сопротивление линии передачи R_l – нерегулируемое, а второе, которое будет служить нагрузкой в конце линии передачи R_n – регулируемое сопротивление.

Для измерения напряжения используется вольтметр В7-26, а для измерения тока – миллиамперметр с центральным расположением нулевого деления.

4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис.3)
2. Изменяя сопротивление нагрузки R_n от бесконечности до нуля, сделать 7-8 измерений напряжения U_1 - в начале линии, U_2 – в конце ее и тока I .
3. Рассчитать при какой нагрузке будет согласованный режим.
4. Результаты всех измерений внести в таблицу.
5. По полученным данным построить в масштабе зависимости $U_1(I)$, $U_2(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\Delta U(I)$, $\eta(I)$.

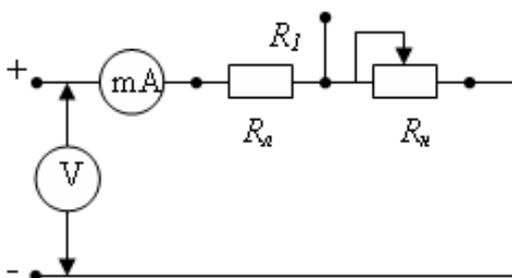


Рис. 3

Таблица.

№	измерено			вычислено					
	U_1	U_2	I	ΔU	P_1	P_2	ΔP	R_n	η
	В	В	А	В	Вт	Вт	Вт	Ом	%
1									
2..									

5. Содержание отчета

В отчете приводится рабочая схема, заполненная таблица, в масштабе построенные кривые зависимости $U_1(I)$, $U_2(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\Delta U(I)$, $\eta(I)$, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Как уменьшить мощность потерь в проводах линии передачи постоянного тока при неизменной мощности источника?
2. Как увеличить КПД линии передачи?
3. Какой режим работы электротехнического устройства называется номинальным?
4. Какой режим работы электрической цепи называется согласованным?
5. Дать определение 2-х полюсника?
6. Начертить схему активного и пассивного 2-х полюсников, объяснить.
7. Сформулировать условие передачи по линии максимальной мощности и записать это условие.
8. Что называется электрическим током, в каких единицах он измеряется?
9. Что называется электрическим напряжением, в чем оно измеряется?
10. Что называется потенциалом, в каких единицах он измеряется?
11. Что называется падением напряжения, в чем оно измеряется?
12. Что такое положительное направление тока, напряжения и источника?
Поясните свой ответ примером.

Лабораторная работа № 2

Опытная проверка законов Кирхгофа и Ома.

1. Цель работы

Экспериментальная проверка законов Ома и Кирхгофа. Исследование соотношений между токами и напряжениями в простейших цепях постоянного тока.

2. Основные теоретические положения.

Электрической цепью называют совокупность электрических устройств, предназначенных для генерирования, передачи, преобразования и использования электрической энергии, электромагнитные процессы в которых описываются с помощью понятий об электрическом токе, напряжении и ЭДС.

Схемой электрической цепи называют графическое изображение электрической цепи, содержащее условное обозначение ее элементов и показывающее соединения этих элементов.

Для упрощения анализа процессов в реальной электрической цепи ее обычно представляют в виде математической модели, состоящей из идеальных элементов. Идеальный элемент отличается от реального тем, что обладает одним свойством, т.е. одним параметром.

Схемой замещения цепи называют графическое изображение цепи с помощью идеальных элементов.

Участок цепи, заключенный между двумя узлами, с последовательным соединением электрических элементов вдоль которого в любой момент времени ток имеет одно и то же значение, называют ветвью, а место соединения трех и более ветвей – узлом. Любой замкнутый путь, проходящий по участкам электрической цепи, называют контуром.

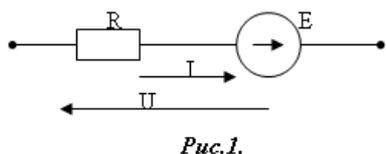


Рис.1.

По закону Ома для участка цепи (рис.1) величина тока определяется выражением (1)

$$I = \frac{U + E}{R} \quad (1)$$

Первый закон Кирхгофа: $\sum_k I_k = 0$, алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в любом узле электрической схемы, равна нулю (рис.2). Этот закон является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в любом узле заряд одного знака не может ни накапливаться, ни убывать.

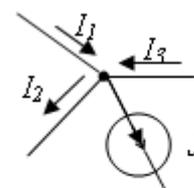


Рис.2

Принято, токи, направленные к узлу записывать со знаком «+», а токи, направленные от узла, со знаком «-» (2). Число независимых уравнений,

записанных по первому закону Кирхгофа, на одно уравнение меньше числа узлов, т.е. $(U-1)$, где U - количество узлов электрической схемы замещения.

$$I_1 - I_2 + I_3 - J = 0 \quad (2)$$

Второй закон Кирхгофа: $\sum_k E_k = \sum_k I_k R_k$, алгебраическая сумма ЭДС в

любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжений на элементах вдоль этого же контура (рис. 3). Этот закон

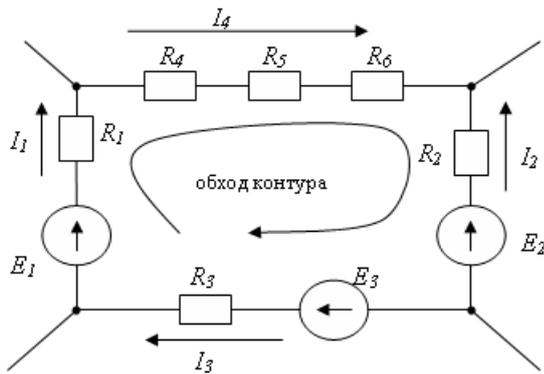


Рис. 3

является следствием закона сохранения энергии, в силу которого изменение потенциала в замкнутом контуре равно нулю. Принято, что ЭДС и падения напряжения на элементах контура совпадающие с направлением обхода контура, записываются со знаком «+», если не совпадают, наоборот, со знаком «-» (3).

Число независимых уравнений равно числу независимых контуров, т.е. $(B-B_J - U+1)$, где B - число ветвей электрической схемы, B_J – число ветвей с источниками тока, U - количество узлов электрической схемы.

$$E_1 - E_2 + E_3 = I_1 \cdot R_1 + I_4 \cdot (R_4 + R_5 + R_6) - I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 \quad (3)$$

Направление обхода контура выбирается произвольно. Условно положительные направления неизвестных токов указываются так же произвольно.

3. Описание лабораторной работы

Элементы электрической цепи и измерительные приборы для исследования законов Кирхгофа и Ома расположены на панели универсального стенда. Питание цепи осуществляется от стабилизированного источника постоянного напряжения 12В, который рассчитан на максимальный ток нагрузки 200mA.

В работе используются переменные резисторы R_1 , R_2 , R_3 , каждый из которых состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений - R_l и R_n и группы соединенных друг с другом штепсельных гнезд, применяемых в качестве узлов электрической цепи.

Для измерения напряжения используется вольтметр В7-26, а для измерения тока – три миллиамперметра с центральным расположением нулевого деления, что позволяет визуально определять направление тока в измеряемой ветви.

4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис.4.)
2. Измерить напряжения на элементах и ток в цепи при любых значениях сопротивлений R_1, R_2, R_3 .

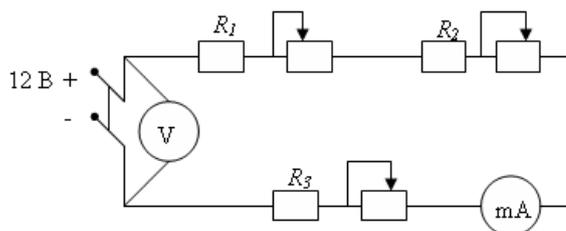


Рис. 4

3. Результаты измерений внести в таблицу 1.

Таблица 1

№	измерено					вычислено				
	I	U	U_1	U_2	U_3	R_1	R_2	R_3	$R_{э\text{кв}}$	$P_{э\text{кв}}$
	А	В	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Вт

4. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 5)

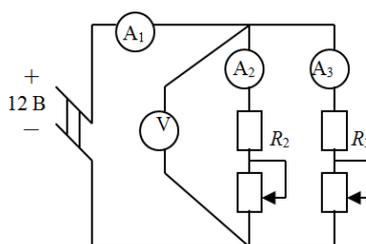


Рис. 5

5. Измерить напряжение и токи в цепи при любых значениях сопротивлений R_1, R_3 .
6. Результаты измерений внести в таблицу 2.

Таблица 2

№	измерено				вычислено				
	U	I_1	I_2	I_3	R_2	R_3	$R_{э\text{кв}}$	$G_{э\text{кв}}$	$P_{э\text{кв}}$

	В	А	А	А	Ом	Ом	Ом	Сим	Вт

7. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 6)

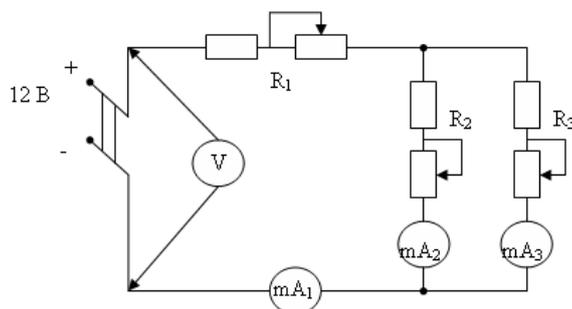


Рис.6

8. Измерить падения напряжений на элементах и токи в цепи при любых значениях сопротивлений R_1, R_2, R_3 .

9. Результаты измерений внести в таблицу 3.

Таблица 3

№	измерено							вычислено						
	U	U_1	U_2	U_3	I_1	I_2	I_3	R_1	R_2	R_3	$R_{эkv}$	$G_{эkv}$	$P_{эkv}$	
	В	В	В	В	А	А	А	Ом	Ом	Ом	Ом	Сим	Вт	

10. По результатам измерений пунктов 2, 5 и 8 проверить законы Ома и Кирхгофа.

11. Вычислить токи по законам Кирхгофа при заданных сопротивлениях.

Результаты расчета сравнить с экспериментом.

5. Содержание отчета

В отчете приводятся рабочие схемы, заполненные таблицы, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Что называется электрической цепью, контуром, узлом, ветвью электрической цепи?
2. Какие контуры называются взаимно независимыми?
3. Что значит «рассчитать» электрическую цепь?
4. Сколько всего уравнений нужно составить по законам Кирхгофа для расчета электрической схемы?

5. Почему в формулировке законов Кирхгофа употребляется слово «алгебраическая сумма»?
6. В каком случае элементы электрической цепи считаются соединенными последовательно?
7. В каком случае элементы электрической цепи считаются соединенными параллельно?

Лабораторная работа № 3

Пассивный двухполюсник в цепи синусоидального тока и простейшие векторные диаграммы.

1. Цель работы

Исследование режимов в последовательной цепи при различных сочетаниях пассивных элементов изменении частоты источника питания. Определение величины и характера сопротивлений приемников по данным измерений и построение векторных диаграмм.

2. Основные теоретические положения.

Фундаментальную роль в современной электротехнике играют гармонические, т.е. синусоидальные или косинусоидальные колебания. Переменным током называется ток, изменяющийся во времени. Мгновенное значение синусоидального тока определяется выражением

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

где I_m – амплитуда тока (максимальное значение), А;

$(\omega t + \psi_i)$ - полная фаза (фазовый угол, фаза), рад;

t - время, с;

ψ_i - начальная фаза

В электрических цепях переменного тока необходимо указывать положительные направления и для ЭДС, и для тока, и для напряжений (рис.1). Мгновенные значения ЭДС,

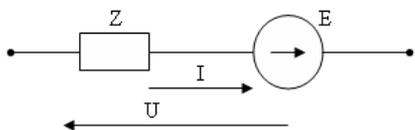


Рис.1

тока и напряжения выражаются следующими формулами:

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_e), \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$$

Кривые мгновенных значений напряжений можно наблюдать с помощью осциллографа (рис.2).

При совместном рассмотрении двух синусоидальных сигналов одной частоты разность их фаз, равную разности их начальных фаз, часто называют сдвигом фаз и обозначают φ (рис. 3).

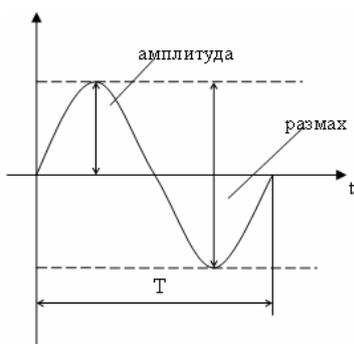


Рис.2

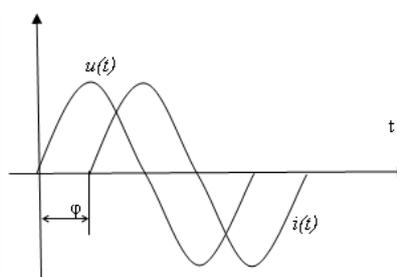


Рис.3

Так разность фаз напряжения $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ и тока $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ равна $\varphi = \psi_u - \psi_i$: если $\varphi = 0$, то говорят, что напряжение и ток совпадают по фазе; если $\varphi = \pm\pi$, то они противоположны по фазе; если $\varphi = \pm\pi/2$, то они находятся в квадратуре.

Разность фаз двух колебаний не зависит от начала отсчета, так как изменения последнего приводит к изменению значений начальных фаз обоих колебаний на одну и ту же величину: если $\varphi > 0$, то ток $i(t)$ отстает от напряжения $u(t)$ по фазе на угол φ ; если $\varphi < 0$, то ток $i(t)$ опережает напряжение $u(t)$ по фазе на угол $|\varphi|$.

Электрическое состояние цепей синусоидального тока, так же как и цепей постоянного тока, описываются уравнениями Кирхгофа, однако вычисления становятся более громоздкими, так как уравнения содержат тригонометрические функции. Для упрощения решения уравнений в электротехнике широко используется математический аппарат комплексных чисел.

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = Z e^{j\varphi} = R + jX,$$

где \underline{U} - комплексное значение напряжения, В; \underline{I} - комплексный ток, А;

$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \geq 0$ - полное сопротивление, Ом;

R - активное сопротивление, Ом; X - реактивное сопротивление, Ом.

Комплексное число может быть записано в двух формах – алгебраической и показательной. Любое комплексное число, записанное в алгебраической форме $\underline{A}=a+jb$, имеет вещественную a и мнимую jb составляющие, а число, записанное в показательной форме $\underline{A}=Ae^{j\varphi}$, - модуль A и аргумент φ . Выбор той или иной формы в каждом конкретном случае диктует удобством осуществления нужной математической операции с комплексными числами: при суммировании удобна алгебраическая форма, при умножении ил делении – показательная.

Сопротивление в цепи синусоидального тока.

Резистивный элемент, характеризуемый активным сопротивлением, представляет собой идеализированный элемент, в котором происходит только необратимый процесс преобразования электромагнитной энергии в другой вид энергии.

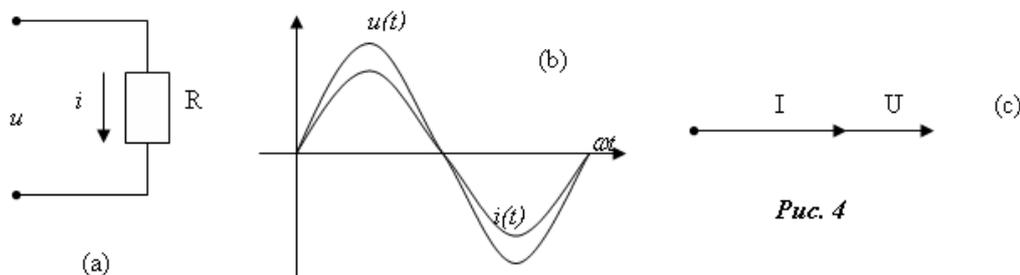


Рис. 4

Если синусоидальное напряжение $u(t) = U_m \sin \omega t$ подвести к сопротивлению R (рис. 4,а), то выражение для тока определяется из закона Ома для мгновенных значений $i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t$.

Следовательно, напряжение и ток, проходящий через сопротивление R , имеют одинаковую начальную частоту, или, как говорят, совпадают по фазе: они одновременно достигают своих максимальных значений и соответственно одновременно проходят через нуль (рис. 4, б). Векторная диаграмма представлена на рисунке 4(с). Т.е. форма напряжения на резистивном сопротивлении точно повторяет форму тока.

Мгновенная мощность, поступающая в резистивное сопротивление изменяется с удвоенной частотой и колеблется в пределах от 0 до $2UI$,

$$p = u \cdot i = U_m I_m \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t)$$

Индуктивность в цепи синусоидального тока.

Индуктивные элементы представляют собой идеализированные элементы, аналогичные по свойствам индуктивной катушке, в которой возбуждается магнитное поле, характеризуемое магнитным потоком Φ и соответствующим ему потокосцеплением ψ . В индуктивном элементе происходит запасание энергии магнитного поля.

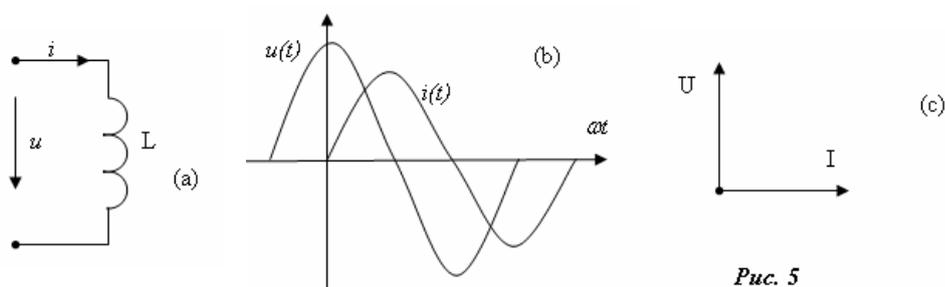


Рис. 5

Пусть через индуктивность L (рис. 5,а) проходит ток $i(t) = I_m \sin \omega t$. Напряжения на индуктивности опережает ток на угол 90° ,

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_{mL} \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Следовательно, в данном случае угол сдвига фаз между напряжением и током составляет $\varphi = \psi_u - \psi_i = 90^\circ$. Из рисунка и выражения следует, что начальная фаза напряжения на 90° больше начальной фазы тока, т.е ток отстает по фазе от напряжения четверть периода. Временная и векторная диаграммы приведены на рис. 5(б,с) .

Амплитуда, так же как и действующие значения напряжения и тока, связаны соотношениями $U_L = \omega L \cdot I = I \cdot X_L$.

Величину $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$ – связывающую амплитуды напряжения и тока называют реактивно-индуктивным сопротивлением катушки индуктивности.

Мгновенная мощность, поступающая в индуктивность:

$$p = u_L \cdot i = U_{Lm} I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = UI \sin 2\omega t ,$$

она колеблется по синусоидальному закону с угловой частотой 2ω , имея амплитуду UI .

Таким образом, в цепи с индуктивностью происходит колебание энергии между источником и индуктивностью, причем активная мощность цепи равна нулю.

Емкость в цепи синусоидального тока.

Емкостной элемент представляет собой идеализированный конденсатор, в котором накапливается энергия электрического поля. Конденсатор при низких частотах, когда можно пренебречь потерями в диэлектрике и пластинах, можно рассматривать как емкостной элемент, характеризуемый одним параметром – емкостью $C = \frac{q}{u_C}$ (рис. 6, а).

При напряжении на емкости $u(t) = U_m \sin \omega t$, тогда

$$i_C = C \frac{du}{dt} = \omega C U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_{mC} \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Последнее выражение показывает, что ток i опережает приложенное напряжение u на угол $\pi/2$.

Здесь $\omega C U_m = I_{mC}$ или $I = \frac{U}{X_C}$, где X_C – реактивно-емкостное сопротивление. Из рисунка и выражения следует, что начальная фаза тока на 90° больше начальной фазы напряжения, т.е вектор тока опережает по фазе вектор напряжения на четверть периода.

Временная и векторная диаграммы приведены на рисунке 6 (b,c).

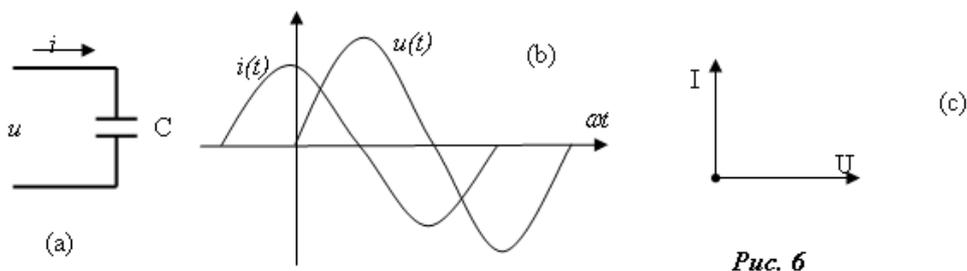


Рис. 6

Мгновенная мощность, поступающая в емкость:

$$p = u \cdot i = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = UI \sin 2\omega t,$$

колеблется синусоидально с угловой частотой 2ω , имея амплитуду равную UI .

3. Описание лабораторной работы

На стенде находятся: генератор сигналов специальной формы Г6-15, прибор комбинированный цифровой Щ4300, который используется в данной работе в качестве миллиамперметра, вольтметр универсальный В7-26, панель с элементами электрической схемы.

В качестве приемников энергии в данной работе применяются: резистор с сопротивлением R ; пассивный двухполюсник с параметрами R_C, C ; катушка индуктивности с параметрами R_L, L . Кроме указанных элементов, на панели имеется катушка индуктивности L , переключение числа витков которой осуществляется тумблерами, а также батарея конденсаторов C , емкость которой изменяется ступенями с помощью тумблеров.

4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь, состоящую из двух последовательно соединенных приемников: резистора R и катушки индуктивности (R_L, L) по схеме (рис. 7). Для такой схемы записать в таблицу 1 показание приборов. Определить параметры катушки индуктивности приемника по известным трем напряжениям U_Γ, U_R и U_K , так называемым *методом трех вольтметров*.

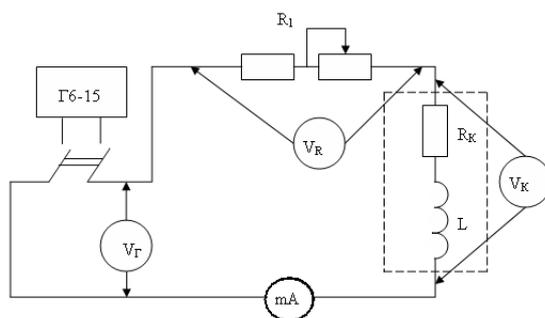


Рис. 7

Таблица 1

измерено					вычислено				
U_Γ	U_R	U_K	I	f	R_l	R_K	X_L	L	Z
В	В	В	А	Гц	Ом	Ом	Ом	Гн	Ом

2. Собрать цепь рис.7 для определения параметров катушки индуктивности (R_L , L) на основании измерений, выполненных вольтметром и миллиамперметром при фиксированных частотах генератора. Записать показания приборов в таблицу 2. Определить параметры приемника так называемым *методом двух частот*.

Таблица 2

цепь R-L	измерено			вычислено			
	f	U_K	I	R_K	X_L	L	Z
	Гц	В	А	Ом	Ом	Гн	Ом

3. Собрать электрическую цепь, состоящую из двух последовательно соединенных приемников: резистора R и пассивного двухполюсника с параметрами (R_C , C) по схеме (рис. 8). Для такой схемы записать в таблицу 3 показание приборов. Определить параметры приемника по известным трем напряжениям U_1 , U_2 и U_3 , так называемым *методом трех вольтметров*.

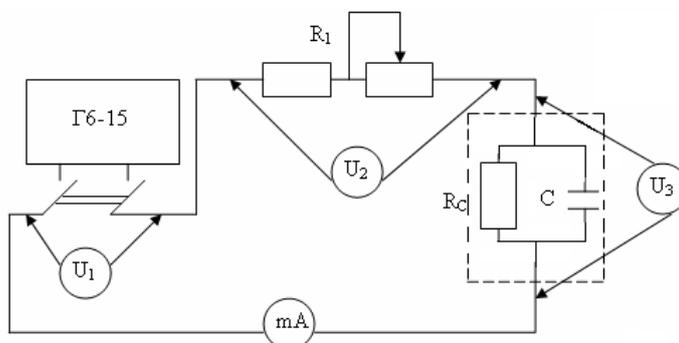


Рис. 8

Таблица 3

измерено					вычислено				
U_1	U_2	U_3	I	f	R_1	R_C	X_C	C	Z
В	В	В	А	Гц	Ом	Ом	Ом	Ф	Ом

4. Собрать цепь рис.8 для определения параметров катушки индуктивности (R_C , C) на основании измерений, выполненных вольтметром и миллиамперметром при фиксированных частотах генератора. Записать показания приборов в

таблицу 4. Определить параметры приемника так называемым *методом двух частот*.

Таблица 4.

цепь R-C	измерено			вычислено			
	f	U_C	I	R_C	X_C	C	Z
	Гц	В	А	Ом	Ом	Ф	Ом

- По данным измерений пунктов заполнить таблицы опытных и расчетных данных.
- Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и треугольники сопротивлений.
- Сравнить результаты экспериментального определения параметров катушки и несовершенного конденсатора двумя способами. Объяснить возможные расхождения окончательных результатов.

5. Содержание отчета

В отчете приводятся схемы исследуемых электрических цепей, заполненные таблицы, расчет параметров катушки и несовершенного конденсатора, векторные диаграммы напряжений и треугольники сопротивлений, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

- Какие колебания называются гармоническими?
- Что называется переменным током, амплитудой, фазой, угловой частотой? Нарисуйте кривую гармонического сигнала.
- Как связаны частота, угловая частота и период гармонических сигналов?
- Докажите, что при гармоническом воздействии с частотой ω индуктивное сопротивление равно $X = \omega L$, а емкостное $X = 1/\omega C$.
- Покажите, каким образом складывают, вычитают, умножают, делят комплексные числа.
- Покажите алгебраическую, показательную и тригонометрическую формы комплексного числа.

7. Как по методу трех вольтметров определить параметры катушки?
8. Как по методу трех вольтметров определить параметры несовершенного конденсатора?
9. Как по методу двух частот определить параметры катушки?
10. Как по методу двух частот определить параметры несовершенного конденсатора?

Лабораторная работа № 4

Исследование неразветвленных цепей переменного тока.

Резонанс напряжений.

1. Цель работы

Изучение резонансных свойств и частотных характеристик последовательного контура с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью, приобретение навыков по настройке цепи и по производству измерений, освоение методики и практики вычислений и построения векторных диаграмм по данным измерений.

2. Основные теоретические положения.

Колебательные контуры – это широко распространенные радиотехнические

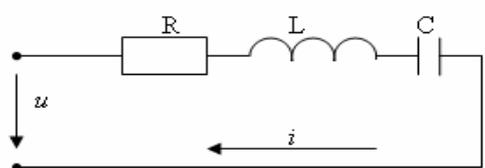


Рис. 1

устройства, его используют в радиоприемниках для настройки на частоту желаемой радиостанции, в радиопередатчиках для излучения радиосигнала в пространство, в

генераторах, где они включаются в цепь усилительного элемента – транзистора или электронной лампы, в резонансных усилителях, электрических фильтрах, корректорах – т.е. везде, где есть электрические колебания, а контур должен откликаться на них. Наличие в колебательных контурах резонансных явлений делает их незаменимым при проектировании многих радиотехнических устройств.

Режим, при котором в цепи с последовательным соединением индуктивного и емкостного элементов напряжение на входе совпадает по фазе с током, называют резонансом напряжений (рис.1). Условием резонанса напряжений является равенство нулю мнимой части уравнения полного сопротивления.

$$Z = R + jX_L - jX_C, \quad \text{т.е.} \quad X_L - X_C = 0$$

Из равенства $X_L = X_C$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, где $\omega = 2\pi \cdot f$, можно определить частоту резонанса $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ или $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Следовательно, режим резонанса может быть достигнут при изменении L , C или ω .

Значение сопротивления каждого из реактивных элементов на резонансной частоте называют характеристическим $\rho = 2\pi \cdot f_p L = \frac{1}{2\pi \cdot f_p C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

В случае гармонического воздействия модуль входного сопротивления $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$. Аргумент этого сопротивления, равный по величине разности фаз приложенного напряжения и тока в контуре, определяется как $\text{tg } \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$.

Для мгновенных значений напряжений можно записать в соответствии с рис. 1

$$u = u_R + u_L + u_C.$$

Тогда

$$u = RI_m \sin \omega t + \omega LI_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Здесь

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Напряжения в рассматриваемой цепи так же связаны соотношением $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$, тогда амплитуда тока в контуре

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

В режиме резонанса ток в цепи приобретает максимальное значение и становится равным $I_p = \frac{U}{R}$ и совпадает по фазе с приложенным напряжением. Векторная диаграмма для режима резонанса приведена на рис.2.

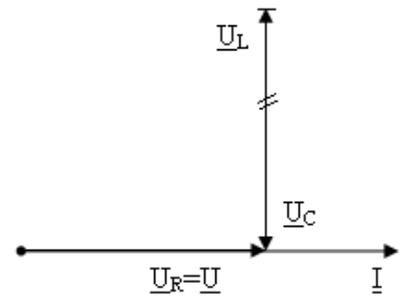


Рис. 2

При этом напряжение на конденсаторе U_{CP} и катушке U_{LP} $U_{CP} = U_{LP} = I_p \omega_p L = \frac{I_p}{\omega_p C}$ и превышают напряжение на зажимах цепи, если $\frac{1}{\omega_p C} > R$ и $\omega_p L > R$.

Когда резистивное сопротивление R контура равно нулю (идеальный контур без потерь), рассеивание энергии в контуре (превращение ее в тепло при нагревании током резистора) не происходит, в контуре осуществляется только обмен электрической энергией, запасаемой конденсатором, и магнитной энергией, запасаемой катушкой.

При наличии резистивного сопротивления такие потери неизбежны, и чем больше значение R , тем больше эти потери. Однако важным является не само значение резистивного сопротивления R , а его соотношение с сопротивлением любого реактивного элемента на резонансной частоте, т.е. с характеристическим сопротивлением ρ .

Это соотношение измеряется величиной $\frac{\omega_p L}{R} = \frac{1/\omega_p C}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R} = Q$

называется добротностью контура. Величина добротности показывает, во сколько раз падение напряжения на индуктивности или емкости превышает напряжение, приложенное к цепи. Чем меньше резистивное сопротивление контура, тем больше его добротность при заданных значениях элементов L и C . Добротность и резонансная частота контура, нагруженного на резистивное сопротивление, могут существенно отличаться от добротности и резонансной частоты ненагруженного контура. С помощью добротности можно оценивать избирательность контура –

способность контура ослаблять напряжение на различных частотах в неодинаковое число раз. На избирательность контура оказывает влияние значения его элементов. Чем выше избирательность контура, тем круче идет кривая соответствующей частотной зависимости и больше добротность. Контур с высокой избирательностью ослабляет гармонические колебания с частотами, отстоящими от резонансной в большее число раз, чем контур с низкой избирательностью.

Еще одной важной характеристикой контура является полоса пропускания – тот диапазон частот, в котором коэффициент передачи по напряжению уменьшается не более чем в $\sqrt{2} = 1,71$ раз по сравнению с его максимальным значением и обозначается Δf . Очевидно, у контуров с большей добротностью полоса пропускания меньше, т.к. $\Delta f = \frac{f_P}{Q}$.

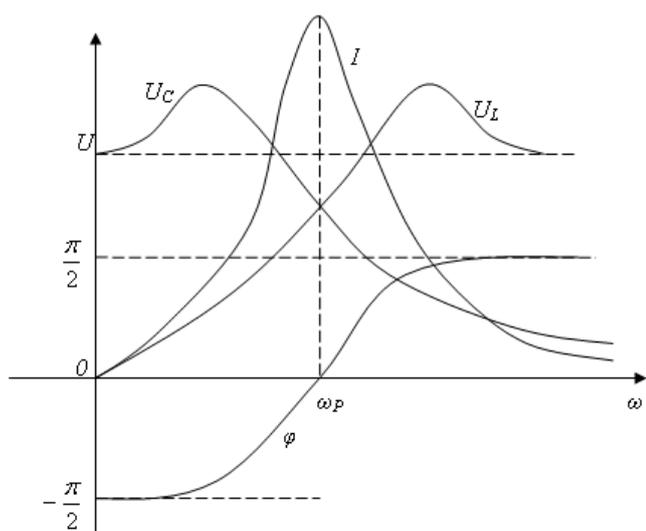


Рис.3

Резонансная частота, полоса пропускания и добротность контура являются именно теми параметрами, которые широко используют радиоинженеры.

Частотная характеристика показывает, как ведет себя контур на разных частотах. Для изучения резонанса напряжения наибольший интерес представляют частотные зависимости

$I(\omega)$, $UL(\omega)$ и $UC(\omega)$, разность фаз приложенного напряжения и тока $\varphi(\omega)$. Такие кривые представлены на рисунке 3.

Влияние параметров цепи на вид резонансной кривой $I(\omega)$ можно учитывать, используя величины добротности Q .

3. Описание лабораторной работы

На стенде находятся: генератор сигналов специальной формы Г6-15, прибор комбинированный цифровой Щ4300, который используется в данной работе в

качестве миллиамперметра, вольтметр универсальный В7-26, панель с элементами электрической схемы.

В качестве приемников энергии в данной работе применяются: резистор с сопротивлением R ; пассивный двухполюсник с параметрами R_C, C ; катушка индуктивности с параметрами R_L, L . Кроме указанных элементов, на панели имеется катушка индуктивности L , переключение числа витков которой осуществляется тумблерами, а также батарея конденсаторов C , емкость которой изменяется ступенями с помощью тумблеров.

4. Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь согласно рис.4.
2. Изменением частоты генератора при фиксированных L и C добиться резонанса напряжений $X_L=X_C$, при этом ток I_P в цепи будет максимальным, а угол $\varphi=0$. Результаты свести в таблицу.
3. Изменяя частоту генератора, установить $X_L < X_C$ и повторить замеры, результаты свести в таблицу.
4. Изменяя частоту генератора, установить $X_L > X_C$ и повторить замеры, результаты свести в таблицу.

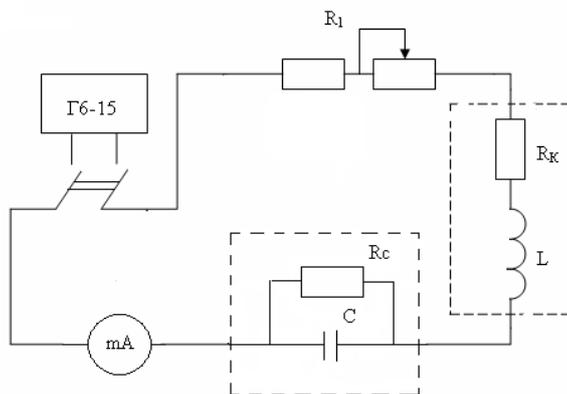


Рис. 4

Таблица

№	измерено						вычислено									
	U	U_K	U_C	U_R	I	f	b_C	C	X_L	L	R_K	R_I	$Z_{экв}$	Z_K	Y_C	g_C
	В	В	В	В	А	Гц	См	Ф	Ом	Гн	Ом	Ом	Ом	Ом	См	См
$X_L=X_C$																
$X_L < X_C$																
$X_L > X_C$																

5. Содержание отчета

В отчете приводится схема исследуемой электрической цепи, заполненная таблица, расчеты параметров катушки и несовершенного конденсатора, построенные в масштабе векторные диаграммы напряжений, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Какие необходимо сделать измерения для определения параметров катушки индуктивности и конденсатора в настоящей лабораторной работе?
2. Какие характерные признаки наступления резонанса напряжений можно определить по показаниям приборов?
3. Что следует понимать под термином «активная», «реактивная» составляющие тока и напряжения?
4. Как определяется знак угла сдвига фаз φ ?
5. Где применяется явление резонанса?
6. Записать условия резонанса напряжений?
7. Как определить разность фаз напряжения и тока с помощью осциллографа?
8. Как влияет активное сопротивление цепи на добротность контура?
9. Какой вид имеют частотные характеристики индуктивного и емкостного сопротивления?
10. Объяснить явление резонанса напряжений?

Лабораторная работа № 5

Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой

1. Цель работы

Изучить влияние изменения параметров приемников на ток в нейтральном проводе, на смещение нейтрали, а также на суммарную активную мощность всей группы этих приемников. Опытная проверка соотношений между фазными и линейными напряжениями и токами.

2. Основные теоретические положения

Под трехфазной симметричной ЭДС понимают совокупность трех синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на угол 120° . Графики их мгновенных значений изображены на рис.1,а; векторная диаграмма - на рис. 1,б.

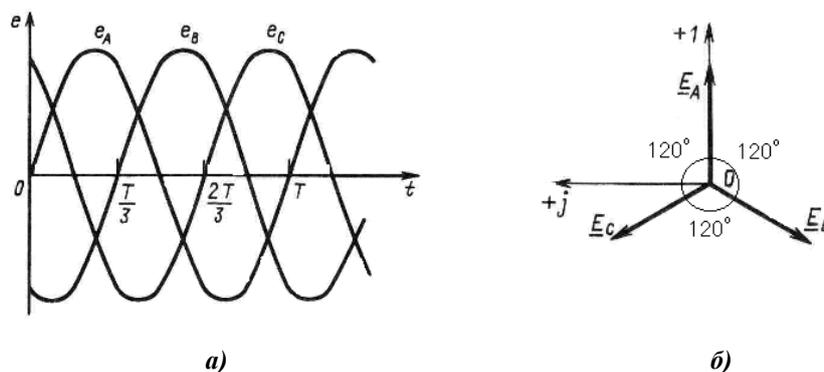


Рис. 1

Принцип получения трехфазной системы ЭДС иллюстрирует рис.2.

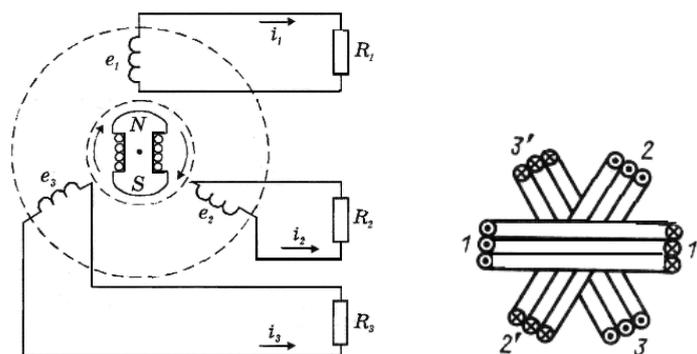


Рис. 2

В равномерном магнитном поле с постоянной угловой скоростью ω вращаются три одинаковых жестко скрепленных друг с другом катушки. Плоскости катушек смещены в пространстве друг относительно друга на 120° . В каждой катушке наводится синусоидальная ЭДС одинаковой амплитуды, но по фазе они сдвинуты на 120° . ЭДС трехфазного генератора обозначают следующим образом: одну из ЭДС обозначают \mathcal{E}_A , отстающую от нее на 120° ЭДС \mathcal{E}_B , а опережающую на 120° ЭДС \mathcal{E}_C .

Последовательность прохождения ЭДС через одинаковые значения (например, через нулевое значение) называют последовательностью фаз.

При симметрии токов трехфазного приемника, соединенного звездой с нейтральным проводом, $I_A + I_B + I_C = 0$ и ток в нейтральном проводе I_0 равен нулю.

При равномерной нагрузке нейтральный провод можно устранить. Линейные напряжения U_L связаны с фазными напряжениями U_ϕ следующими соотношениями:

$$U_{AB} = U_A - U_B; \quad U_{BC} = U_B - U_C; \quad U_{CA} = U_C - U_A \quad (1)$$

При симметричной системе ЭДС

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi \quad (2)$$

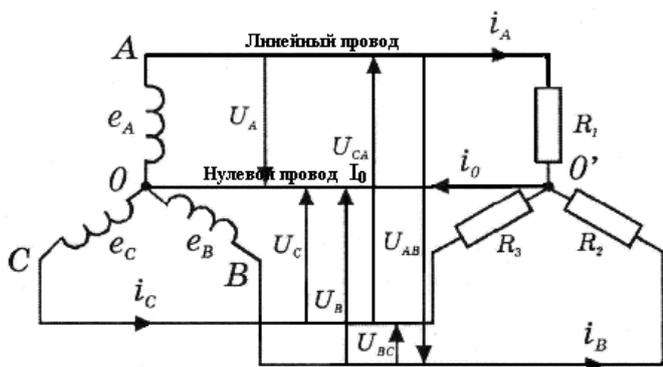
линейные токи равны фазным

$$I_L = I_\phi \quad (3)$$

Если трехфазная система не имеет нейтрального провода, то геометрическая сумма линейных (фазных) токов при любой нагрузке равна нулю

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (4)$$

В этом случае при неравномерной нагрузке фаз между нейтральными точками генератора O и приемника O' (рис.3) появляется напряжение $U_{O'O}$; кроме того, напряжения на фазах приемника U'_A , U'_B и U'_C не равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на разные углы. Поэтому, чтобы избежать значительного нарушения симметрии системы напряжений приемника при неравномерной нагрузке фаз, включают нейтральный провод, обеспечивающий независимую работу отдельных фаз.



Нейтральный провод позволяет также включать приемники между линейными проводами на линейное напряжение, а между одним линейным проводом и нейтральным проводом – на фазное напряжение.

Пусть генератор и приемник соединены звездой с нейтральным проводом, проводимость которого имеет

конечное значение (рис.3,а). Тогда при принятых направлениях напряжений векторная диаграмма напряжений будет иметь вид рис.3,б. При этом в общем случае между точками 0 и 0' будет действовать некоторое напряжение $U_{0'0}$ изображение вектором 0'0.

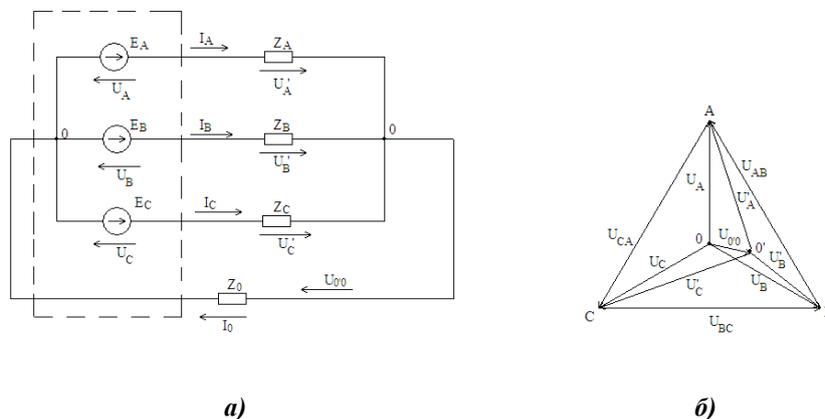


Рис. 3

Для расчета комплексного значения $U_{0'0}$ можно воспользоваться методом узловых напряжений для схемы с двумя узлами:

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\underline{U}_A Y_A + \underline{U}_B Y_B + \underline{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0} \quad (5)$$

Тогда на основании векторной диаграммы рис.б напряжения на фазах приемника

$$\underline{U}_A' = \underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}; \quad \underline{U}_B' = \underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}; \quad \underline{U}_C' = \underline{U}_C - \underline{U}_{0'0} \quad (6)$$

Токи в фазах приемника и нулевом проводе

$$\underline{I}_A' = \underline{U}_A' Y_A; \quad \underline{I}_B' = \underline{U}_B' Y_B; \quad \underline{I}_C' = \underline{U}_C' Y_C; \quad \underline{I}_0' = \underline{U}_{0'0} Y_0$$

Если нейтрального провода нет, то в выражении (5) надо принять $Y_0 = 0$.

В частных случаях точка 0' диаграммы напряжений может лежать вне треугольника линейных напряжений, а также в его вершине или на одной из сторон.

Рассмотрим подробнее случаи неравномерной нагрузки приемника при соединении звездой с нейтральным проводом $Z_0 = 0$.

При обрыве одной из фаз, например фазы A, ток в ней станет равным нулю ($Z_A = \infty$). Токи в двух других фазах не изменяются, так как напряжения на фазах,

считая и поврежденную, останутся без изменения. Ток в нейтральном проводе будет равен геометрической сумме токов неповрежденных фаз.

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_B + \vec{I}_C$$

При активной и равномерной нагрузке неповрежденных фаз приемника векторная диаграмма напряжений и токов, соответствующая этому случаю, приведена на рис.4,а.

Если в трехфазной системе, соединенной звездой с нейтральным проводом, при равномерной нагрузке фаз произойдет обрыв одного линейного провода, например провода A , то это вызовет исчезновение не только тока в фазе A , но и напряжения на этой фазе. Вершина A' треугольника линейных напряжений (рис.4,б) переместится в точку O' . Фазные напряжения на неповрежденных фазах останутся без изменения. При активной нагрузке токи в неповрежденных фазах и ток нейтрального провода остаются такими же, как в предыдущем случае ($I_0 = I_\phi$).

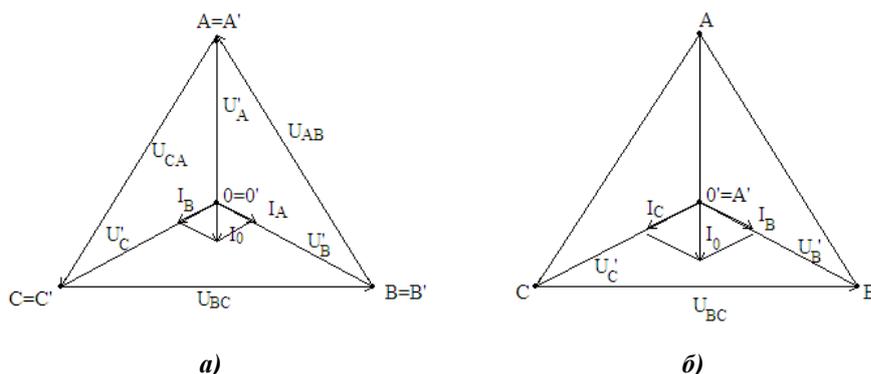


Рис. 4

Короткое замыкание одной из фаз при наличии нейтрального провода приводит к аварии, так как сопротивление этой фазы уменьшается до нуля.

Для трехфазного приемника, соединенного звездой без нейтрального провода, связывающего нейтральные точки приемника и генератора, характерна взаимная зависимость режимов работы отдельных фаз.

При равномерной нагрузке фаз соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями сохраняются теми же, что в случае симметричного режима в звезде с нейтральным проводом. Нейтральная точка приемника располагается в центре тяжести треугольника линейных напряжений, следовательно, напряжение $U_{00} = 0$.

При обрыве одной из фаз приемника, например, фазы A , неповрежденные фазы B и C оказываются соединенными последовательно и подключенными к одному линейному напряжению U_{BC} . Так как геометрическая разность фазных напряжений U'_B и U'_C должна составлять линейное напряжение U_{BC} , то начало фазных напряжений, определяющее положение нейтральной точки $0'$ на рис.5,а переместится на середину отрезка между вершинами B и C при равномерной нагрузке неповрежденных фаз.

Напряжение на оборванной фазе в этом случае будет равно

$$U'_A = U_{л} \cos \frac{\pi}{6} = \sqrt{3} U_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} U_{\phi}$$

а напряжения на фазах B и C уменьшается

$$U'_B = U'_C = U_{л} \sin \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\phi}$$

по сравнению с равномерной нагрузкой фаз. Векторная диаграмма для этого случая при активной нагрузке фаз показана на рис.5,а.

Обрыв линейного провода сходен с рассмотренным случаем обрыва фазы и характерен превращением трехфазной цепи в однофазную.

Короткое замыкание одной из фаз приемника, соединенного звездой без нейтрального провода, не вызывает аварии, так как линейные напряжения сети воспринимаются двумя другими неповрежденными фазами. В случае замыкания накоротко фазы A напряжение на ней падает до нуля, а напряжение двух других фаз становятся равными линейным напряжениям, т.е. увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз. Соответственно во столько же раз увеличиваются и токи этих фаз.

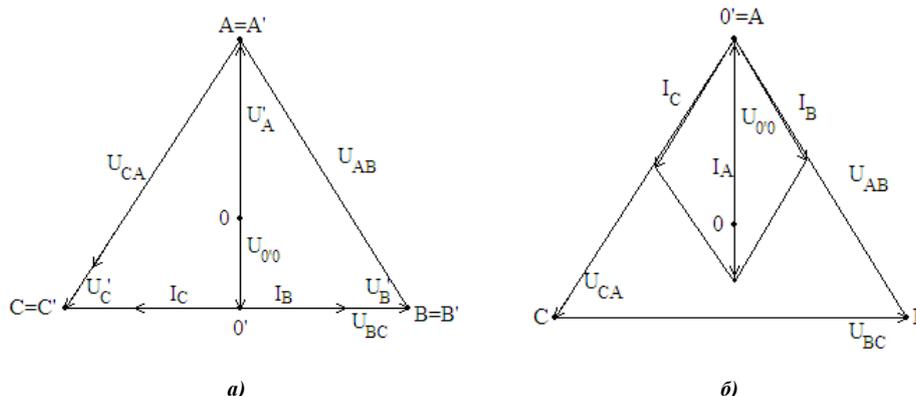


Рис.5

При этом фазный ток в фазе A увеличивается в три раза против нормального режима. На векторной диаграмме рис.5,б показано перемещение нейтральной точки $0'$ приемника в вершину A треугольника линейных напряжений, а напряжение $U_{0'0}$ между нейтральными точками приемника и генератора при коротком замыкании фазы будет равно фазному напряжению сети.

3. Описание установки

В качестве источника электроэнергии используется трехфазная сеть переменного тока, к которой подключены первичные обмотки трехфазного понижающего трансформатора. На стенд выведены клеммы фаз «А», «В», «С» и нулевая точка «0» вторичных обмоток этого трансформатора. В качестве приемников используются проволочные резисторы и батареи конденсаторов. Для измерения токов используются миллиамперметры, пределы измерения которых можно менять. Для измерения напряжения используются электронные вольтметры ВЗ-38 и В7-26.

4. Рабочее задание

1. Собрать рабочую цепь, изображенную на рис. 6, для исследования четырехпроводной системы.

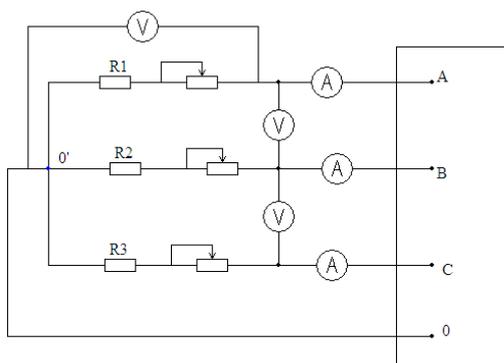


Рис. 6

2. Изменяя сопротивления нагрузки исследовать режимы, указанные в пунктах 1-3 таблицы. Результаты измерений свести в таблицу.

3. Пакетным переключателем обесточить исследуемую цепь. Отключить нейтральный провод в цепи рис.6.

4. После проверки преподавателем правильности сборки, исследовать трехпроводную цепь в соответствии с пунктами 4-7 таблицы.

5. Проверить соотношения между линейным и фазным напряжениями и токами для симметричной нагрузки трехпроводной цепи при соединении приемников энергии звездой.

Соединение приемников звездой	Характер нагрузки	ИЗМЕРЕНО							ВЫЧИСЛЕНО					
		U_L	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	P_A	P_B	P_C	$P_{3\phi}$	$U_{0'0}$	I_0
Звезда с нейтральным проводом	равномерная													
	неравномерная													
	обрыв фазы													
Звезда без нейтрального провода	равномерная													
	неравномерная													
	обрыв фазы													
	емкость в фазе C													

5. Содержание отчета

В отчете приводится схема исследуемой электрической цепи, заполненная таблица, построенные в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как производить определение порядка следования фаз?
2. Почему и в каких случаях важно иметь определенный порядок следования фаз в трехфазной системе?
3. Каковы соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении звездой с равномерной нагрузкой?
4. В чем заключается роль нейтрального провода?
5. В чем отличие соединения звездой с нейтральным проводом от соединения звездой без нейтрального провода?
6. Опасно ли короткое замыкание фазы при соединении звездой с нейтральным проводом?
7. Опасно ли короткое замыкание фазы при соединении звездой без нейтрального провода?
8. Назовите основные особенности трехфазных электрических цепей?
9. Какие напряжения и токи называются фазными?
10. Какие напряжения и токи называются линейными?

11. Как определяется нулевое напряжение при неравномерной нагрузке фаз приемника в схеме звезды без нулевого провода?

12. Как выражается активная мощность трехфазной цепи через линейное напряжение и линейные токи?

13. Как найти активную мощность трехфазной цепи при симметричной нагрузке?

14. Как изменится активная мощность трехфазной цепи, если при симметричной активной нагрузке произойдет обрыв линейного провода?

Лабораторная работа № 6

Исследование трехфазной цепи, соединенной треугольником

1. Цель работы

Изучить влияние изменения параметров приемников на соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении приемников треугольником.

2. Основные теоретические положения

При соединении треугольником фазные напряжения равны линейным, а линейные токи равны геометрической разности двух фазных токов, подходящих вершине треугольника. Поэтому для положительных направлений токов (рис.1,а) между токами существует следующая зависимость:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{BC}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{CA}.$$

Фазные токи рассчитывают по известным линейным напряжениям и проводимости фаз приемника:

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} Y_{AB}; \quad \dot{I}_{BC} = \dot{U}_{BC} Y_{BC}; \quad \dot{I}_{CA} = \dot{U}_{CA} Y_{CA}$$

При симметричной системе ЭДС и равномерной нагрузке $I_L = \sqrt{3}I_\phi$

На рис.1,б приведена векторная диаграмма линейных напряжений, фазных и линейных токов для случая симметричной системе напряжений и неравномерной активной нагрузки фаз.

В случае обрыва одной из фаз приемника, например фазы AB (рис.1,в), ток в этой фазе будет равен нулю. Токи двух других фаз не изменяется, как и фазные напряжения приемника. В проводе C , не связанном фазой, линейный ток I_C остается неизменным. Линейные тока I_A и I_B станут равны фазным, т.е. уменьшатся в $\sqrt{3}$ раз относительно $I_{л}$ при равномерной нагрузке.

При обрыве одного из линейных проводов трехфазная система превращается в однофазную. Напряжения и ток в фазе, не связанной с оборванным линейным проводом, остаются без изменения. Две другие фазы (например, AB и CA) при обрыве линейного провода A оказываются соединенными последовательно и включенными параллельно фазе BC .

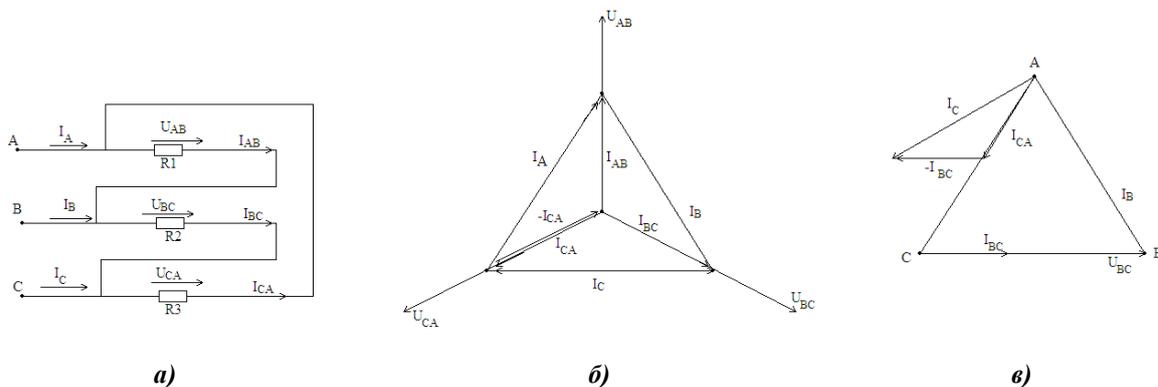


Рис. 1

Короткое замыкание одной из фаз приемника при соединении треугольником приводит к очень большому увеличению фазного и линейных токов и является аварийным режимом.

3. Описание установки

В качестве источника электроэнергии используется трехфазная сеть переменного тока, к которой подключены первичные обмотки трехфазного понижающего трансформатора. На стенд выведены клеммы фаз «А», «В», «С» и нулевая точка «0» вторичных обмоток этого трансформатора. В качестве приемников используются проволочные резисторы.

Для измерения токов используются миллиамперметры, пределы измерения которых можно менять. Для измерения напряжения используются электронные вольтметры ВЗ-38 и В7-26.

4. Рабочее задание

1. Собрать рабочую цепь, изображенную на рис. 2, для исследования четырехпроводной системы.

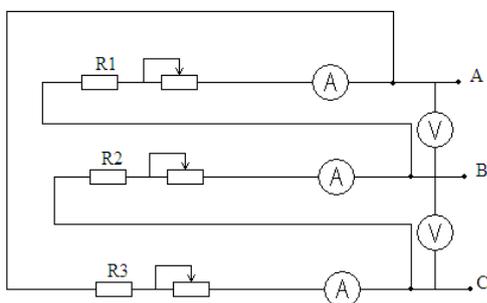


Рис. 2

2. Изменяя сопротивления нагрузки исследовать режимы, указанные в пунктах таблицы. Результаты измерений свести в таблицу.

Соединение приемника	ИЗМЕРЕНО						ВЫЧИСЛЕНО						
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	I_A	I_B	I_C	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	$P_{3\phi}$
Равномерная нагрузка													
Неравномерная нагрузка													
Обрыв фазы A при равномерной нагрузке													
Обрыв линейного провода при равномерной нагрузке													
Емкость в фазе BC													

5. Содержание отчета

В отчете приводится схема исследуемой электрической цепи, заполненная таблица, построенные в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов, формулы, используемые при вычислениях и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Чем опасно короткое замыкание фазы при соединении приемников треугольником?
2. Каковы соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении приемников треугольником?
3. Как производить определение порядка следования фаз?

4. Почему и в каких случаях важно иметь определенный порядок следования фаз в трехфазной системе?
5. Назовите основные особенности трехфазных электрических цепей?
6. Какие напряжения и токи называются фазными?
7. Какие напряжения и токи называются линейными?
8. Укажите минимальное число проводов для соединения трехфазного источника с трехфазным приемником?
9. Как изменится активная мощность симметричной нагрузки, если фазы приемника, соединенные треугольником, соединить звездой?

Лабораторная работа №7

Изучение способов включения и регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока

1. Цель работы

Ознакомиться с устройством машины постоянного тока. Определить ее основные характеристики. Приобрести навыки по пуску, реверсированию и регулированию скорости двигателя.

2. Краткие теоретические сведения

Двигатели постоянного тока используют в приводах, требующих изменения частоты вращения. Они имеют большой пусковой момент и могут быть выполнены практически для любой частоты вращения. Их достоинство – экономичное и плавное регулирование скорости. Недостатки двигателя связаны с применением коллектора. Искрение разрушает коллектор и создает радиопомехи. Непостоянство щеточного контакта приводит к нестабильности характеристик двигателя. Щеточная пыль загрязняет двигатель, за ним нужен систематический уход.

Двигатель параллельного возбуждения. При подключении напряжения к двигателю в обмотке якоря возникает ток $I_{\text{я}}$ и противо-ЭДС $E_{\text{я}}$ (рис. 1).

По второму закону Кирхгофа

$$E_{я} = U - R_{я}I_{я}.$$

Для двигателя

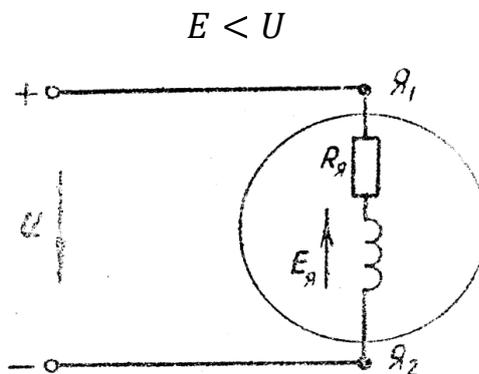


Рис. 1. Схема замещения двигателя постоянного тока

Напряжение сети уравнивается возникающей противо-ЭДС и падением напряжения на внутреннем сопротивлении двигателя:

$$U = E_{я} + R_{я}I_{я} \quad (1)$$

Ток двигателя. Ток, потребляемый двигателем в установившемся режиме, зависит от величины тормозного момента на валу (от нагрузки)

$$I_{я} = \frac{M}{C_M \Phi} \quad (2)$$

В то же время из уравнения (1) ток в якоре

$$I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R_{я}}$$

Противо-ЭДС $E_{я}$ регулирует ток в двигателе в зависимости от величины момента на валу. При холостом ходе частота вращения его наибольшая, и поэтому противо-ЭДС $E_{я} = C_E \cdot n \cdot \Phi$ имеет наибольшее значение, а ток $I_{я}$ - наименьшее. С увеличением нагрузки n уменьшается, уменьшается противо-ЭДС $E_{я}$, а ток $I_{я}$ увеличивается. Поэтому при любой нагрузке двигатель забирает из сети мощность, равную механической мощности нагрузки (без учета КПД).

Противо-ЭДС $E_{я}$ выступает в качестве регулятора между моментом на валу и током в якоре.

Частота вращения двигателя. Из формулы ЭДС $E_{я} = C_E \cdot n \cdot \Phi$ частота вращения

$$n = \frac{E_{я}}{C_E \Phi} \quad (3)$$

Подставляя из (1) значение ЭДС $E_{я} = U - R_{я}I_{я}$

$$n = \frac{U - R_{я}I_{я}}{C_E\Phi} \quad (4)$$

Схема включения двигателя (рис. 2). Цепь возбуждения включается в сеть до пускового реостата. Чтобы обеспечить при пуске наибольший вращающий момент, стараются создать максимальный магнитный поток, т.е. максимальный ток возбуждения. Для этого выводят полностью регулировочный реостат R_p в цепи возбуждения. Пусковой реостат R_n полностью введен. После включения двигателя пусковой реостат плавно выводят. Регулировочным реостатом устанавливают нужную скорость двигателя.

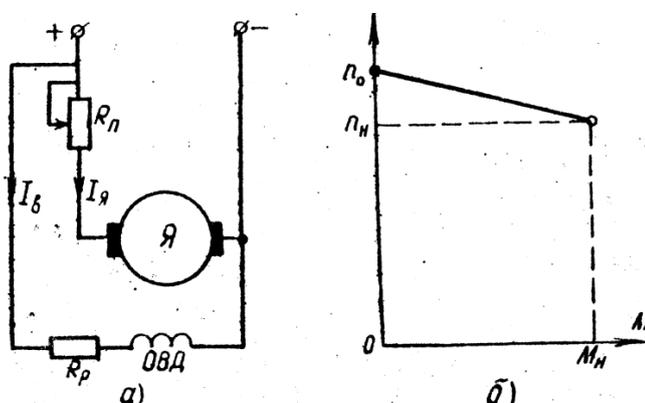


Рис. 2. Схема двигателя параллельного возбуждения (а); механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением (б).

Механическая характеристика $n=f(M)$. В формулу (4) частоты вращения двигателя

$$n = \frac{U - R_{я}I_{я}}{C_E\Phi} = \frac{U}{C_E\Phi} - \frac{R_{я}I_{я}}{C_E\Phi} \quad (5)$$

подставим вместо тока якоря его значение (2). Тогда получим зависимость частоты вращения от момента

$$n = \frac{U}{C_E\Phi} - \frac{R_{я}}{C_EC_M\Phi^2} \cdot M. \quad (6)$$

При постоянном токе возбуждения ($\Phi=const$) это – уравнение прямой ($y=a-bx$), слегка наклонной к оси абсцисс.

Для ее построения достаточно знать координаты двух точек. Номинальные мощность P_H и частота вращения n_H приведены в паспорте двигателя. Номинальный момент можно определить по формуле

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_H}{n_H} [\text{Н} \cdot \text{м}] = 975 \cdot \frac{P_H}{n_H} [\text{кг} \cdot \text{м}],$$

где P выражается в кВт, а n – в об/мин.

Одна точка механической характеристики (рис. 2, б) известна $M_H; n_H$. Найдем вторую точку. Для режима холостого хода, когда $M=0$, согласно уравнению (6) частота вращения двигателя $n_0 = \frac{U_H}{C_E \Phi}$. Номинальная частота вращения $n_H = \frac{U_H - R_{я} I_{яH}}{C_E \Phi}$ откуда $C_E \Phi = \frac{U_H - R_{я} I_{яH}}{n_H}$. Подставим значение $C_E \Phi$ в формулу

$$n_0 = n_H \frac{U_H}{U_H - R_{я} I_{яH}} \quad (7)$$

Так как ток возбуждения составляет несколько процентов от I_H , то в эту формулу вместо $I_{яH}$ можно подставить номинальный ток двигателя, указанный в паспорте. Через полученные точки $(n_0; M = 0; n_H, M_H)$ проведена механическая характеристика (рис. 2, б).

Изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу (так называемое номинальное изменение частоты вращения)

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_H}{n_H} \cdot 100\% \quad (8)$$

составляет $1 \div 2\%$, т.е. частота вращения почти не изменяется. Такая характеристика называется жесткой.

Рабочие характеристики (рис. 3) $M = f(P_2)$. Момент на валу связан с мощностью P_2 соотношением

$$M = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{P_2}{2\pi \frac{n}{60}} \quad (9)$$

Если частота вращения $n = const$, то это было бы уравнением прямой. Но так как она уменьшается, то момент растет быстрее, чем P_2 .

Уравнение характеристики $n = f(P_2)$ получим из (6), подставив вместо момента M его выражение через мощность на валу P_2 (9).

Если бы частота вращения двигателя n не изменялась, то зависимость $n = f(P_2)$ представляла бы прямую. С учетом номинального изменения частоты вращения $\Delta n = 1 \div 2\%$ получим график, представленный на рис. 3. $I_{я} = f(P_2)$.

Ток в якоре двигателя (2) запишем в виде

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{C_E \Phi} = \frac{M + M_0}{C_M \Phi},$$

где M_0 – момент холостого хода

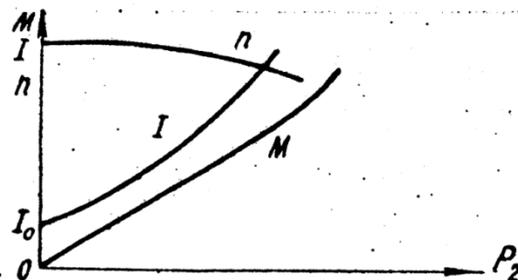


Рис. 3. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением

При холостом ходе ($P_2 = 0$) двигатель потребляет ток холостого хода $I_0 = \frac{M_0}{C_M \Phi}$. С увеличением мощности P_2 , т.е. момента M , ток якоря увеличивается.

График $I_{\text{я}} = f(P_2)$ повторяет зависимость $M = f(P_2)$.

Регулирование частоты вращения двигателя током возбуждения. Каждому значению тока возбуждения (магнитного потока Φ в уравнении (6)) соответствует своя механическая характеристика (рис. 4).

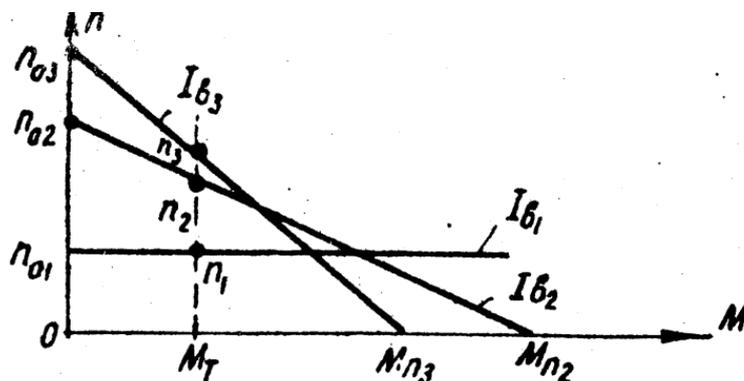


Рис. 4. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при различных значениях потока

При тормозном моменте на валу M_T двигатель может работать с различной частотой вращения (n_1, n_2 и т. д.). Простота регулирования – главное достоинство этого способа.

Сопротивление в цепи якоря: включив в цепь якоря добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}$, можно изменить угол наклона механической характеристики (6):

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}}{C_E \cdot C_M \Phi^2} \cdot M \quad (10)$$

Каждому значению $R_{доб}$ (рис. 5) соответствует искусственная механическая характеристика. Регулируя $R_{доб}$, будем регулировать частоту вращения двигателя при том же тормозном моменте.

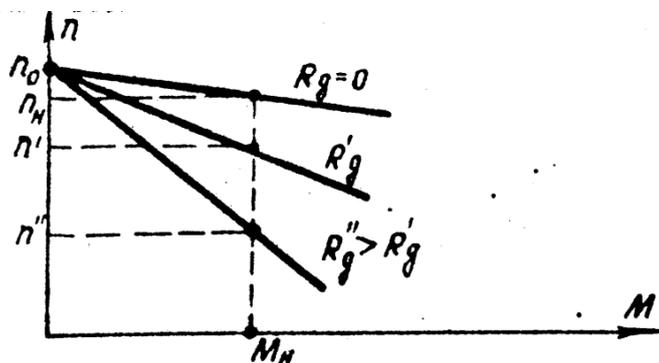


Рис. 5. Естественная и искусственные характеристики двигателя с параллельным возбуждением

Способ этот неэкономичен. Через реостат проходит весь ток якоря, потери в реостате $\Delta P = R_{доб} \cdot I^2$. Его применяют для двигателей малой мощности.

Режим холостого хода. В режиме холостого хода ($M=0$) частота вращения двигателя из (10) определяется только током возбуждения:

$$n_0 = \frac{U}{C_E \Phi} = \frac{U}{C_E K_B I_B}, \quad (11)$$

где K_B – коэффициент пропорциональности между током возбуждения и магнитным потоком. Это - гиперболическая зависимость (рис. 6).

При уменьшении тока возбуждения до нуля (например, при обрыве цепи возбуждения) частота вращения недопустимо возрастает ($n \rightarrow \infty$), двигатель идет “вразнос”.

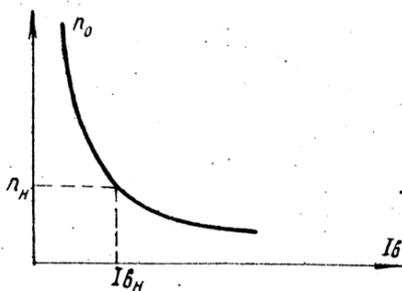


Рис. 6. Регулировочная характеристика холостого хода

Двигатель со смешанным возбуждением. У двигателя со смешанным возбуждением обмотка возбуждения разбита на две части (рис. 7, а).

Одна включается параллельно якорю (шунтовая обмотка $OB_{\text{ш}}$), а вторая – последовательно (сериесная обмотка $OB_{\text{с}}$). Вращающий момент и частота вращения двигателя определяются суммарным магнитным потоком обеих обмоток:

$$M = K_M (\Phi_{\text{ш}} + \Phi_{\text{с}}) \cdot I_{\text{я}} \quad (12)$$

$$n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_E (\Phi_{\text{ш}} + \Phi_{\text{с}})} \quad (13)$$

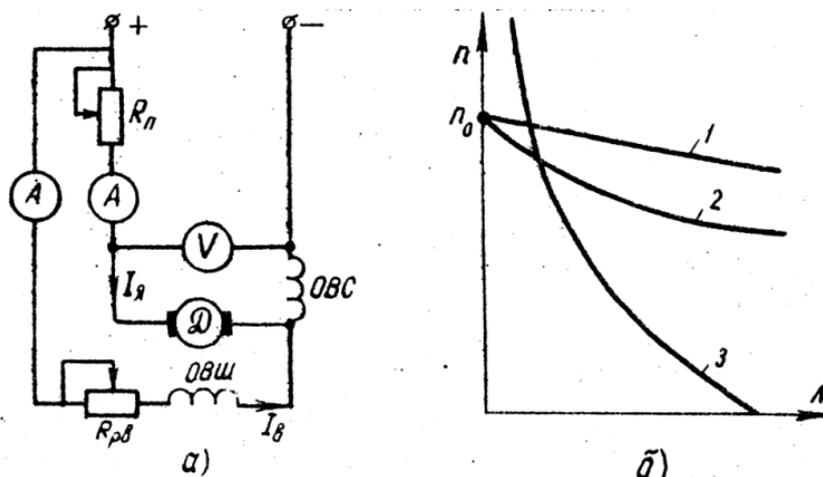


Рис. 7. Схема двигателя смешанного возбуждения (а); механические характеристики двигателя с последовательным (3), параллельным (1) и смешанным (2) возбуждением (б).

Если двигатель с параллельным возбуждением имеет жесткую механическую характеристику (кривая 1 на рис. 7,б), двигатель с последовательным возбуждением – мягкую (кривая 3), то смешанное возбуждение позволяет получить любую промежуточную характеристику (кривая 2).

3. Описание лабораторной установки

В качестве двигателя постоянного тока в лаборатории используются машины постоянного тока мощностью $0,25 \div 0,45$ кВт. Нагрузкой двигателя в лаборатории служит тарированный генератор постоянного тока.

4. Рабочее задание

А. Исследование двигателя параллельного возбуждения

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением и отметить особенности его конструкции. Записать паспортные данные двигателя и уяснить значения всех указанных в паспорте величин.

2. Собрать схему двигателя (рис. 8).

Внимание! Перед пуском двигателя сопротивление пускового реостата должно быть полностью введено, а сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения – полностью выведено.

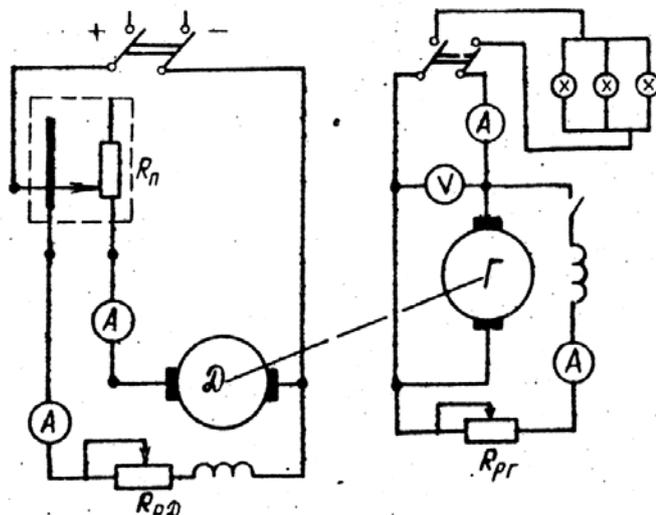


Рис. 8. Схема исследования двигателя параллельного возбуждения

3. Снять характеристику холостого хода двигателя $n=f(I_B)$ и $n=f(I_{я0})$ при $u=const$; $I_{я0}$ – ток якоря при холостом ходе двигателя. Изменяя ток возбуждения с помощью регулировочного реостата, снять 4 ÷ 5 замеров. При этом число оборотов двигателя, измеренное с помощью тахометра, не должно превышать номинальное более, чем на 20%. Данные наблюдений записать в таблицу 1.

Таблица 1

№ изм.	U	$I_{я0}$	I_B	n	Примечание
-	B	A	A	Об/мин	-
1					
2...					

4. Снять рабочие характеристики двигателя. Для снятия рабочих характеристик проводится опыт нагрузки двигателя с помощью генератора, в качестве которого используется машина постоянного тока, сочлененная с испытываемым двигателем. Нагрузка двигателя осуществляется посредством загрузки связанного с ним генератора. При этом сопротивление цепи возбуждения двигателя остается постоянным.

Данные наблюдений (для 5-6 точек) занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ изм.	Измерено				Вычислено						
	U	$I_{я}$	$I_{в}$	n	I	$\Delta P_{мех} + \Delta P_{ст}$	$\Delta P_{я}$	P_1	P_2	M	η
	<i>В</i>	<i>А</i>	<i>А</i>	<i>Об/мин</i>	<i>А</i>	<i>Вт</i>	<i>Вт</i>	<i>Вт</i>	<i>Вт</i>	<i>кз.м</i>	<i>%</i>
<i>1</i>											
<i>2...</i>											

Здесь $I=I_{я}+I_{в}$ – ток, потребляемый двигателем из сети.

По результатам испытания построить: скоростную характеристику $n=f(I)$, механическую характеристику $n=f(M)$ и рабочие характеристики двигателя, т.е. зависимости I , M , η и n от полезной мощности P_2 на валу двигателя при $u=const$ и $I_{в}=const$.

Б. Исследование двигателя смешанного возбуждения

1. Снять характеристики двигателя смешанного возбуждения (рис. 7).
2. Результаты измерений и расчетов свести в таблицу 2.

5. Обработка результатов эксперимента и содержание отчета

1. На основании проведенных опытов расчетные данные, входящие в таблицу 2, определяются следующим образом.

- а) Суммарные механические потери и потери в стали двигателя определяются по данным холостого хода и сопротивлению якоря

$$\Delta P_{мех} + \Delta P_{ст} = UI_{я0} - I_{я}^2 R_{я},$$

где $I_{я0}$ – ток холостого хода якоря, соответствующий данной скорости вращения двигателя (определяется по кривой $I_{я0}=f(n)$);

$R_{я}$ – значение сопротивления цепи якоря двигателя.

- б) Потери мощности в цепи якоря двигателя при данном токе нагрузки $I_{я}$

$$\Delta P_{я} = I_{я}^2 R_{я}.$$

- в) Мощность, потребляемая двигателем из сети при данной нагрузке:

$$P_1 = UI, \quad \text{где} \quad I=I_{я}+I_{в}.$$

- г) Полезная мощность (мощность на валу) двигателя при данной нагрузке

$$P_2 = UI_{я} \cdot I_{я}^2 R_{я} - (\Delta P_{мех} + \Delta P_{ст})$$

- д) Коэффициент полезного действия при данной нагрузке

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

е) Вращающий момент (полезный момент) на валу двигателя при данной нагрузке

$$M = 9550 \frac{P_2}{n} [\text{Н} \cdot \text{м}] = 975 \frac{P_2}{n} [\text{кг} \cdot \text{м}]$$

(здесь P_2 должно быть взято в кВт).

6. Отчет по работе должен содержать:

Наименование и цель работы; схемы (рис. 7 и 8); таблицы опытных и расчетных данных; построенные в масштабе характеристики; выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные части машины постоянного тока?
2. Назначение коллекторно-щеточного устройства в двигателе.
3. Как включается двигатель в сеть?
4. В каком положении должен находиться регулировочный реостат в цепи возбуждения при включении? Почему?

Лабораторная работа № 8

Изучение способов пуска и снятие основных характеристик трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

1. Цель работы

Практическое ознакомление с асинхронными электродвигателями, их характеристиками и методами испытаний.

2. Краткие теоретические сведения

Асинхронный двигатель состоит из статора – неподвижной части и ротора – вращающейся части (конструктивная схема приведена на рис. 1). На нем обозначено: 1 – стальной сердечник статора, набранный из штампованных листов электротехнической стали; 2 – обмотка статора, 3 – корпус (станина) статора; 4 – стальной сердечник ротора, чаще всего также набранный из листов

электротехнической стали; 5 – обмотка ротора; 6 – воздушный зазор между статором и ротором; 7 – вентиляционные каналы; 8 – вал.

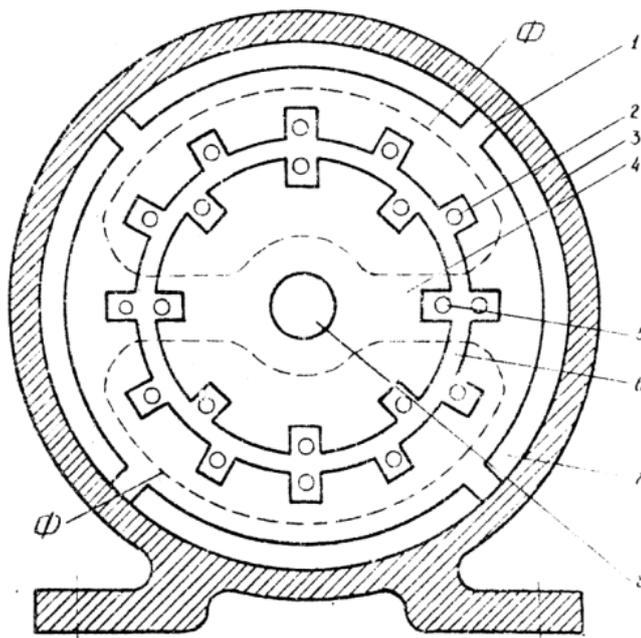


Рис. 1. Конструктивная схема асинхронного двигателя

В зависимости от конструкции обмотки ротора различают асинхронные двигатели с короткозамкнутым и асинхронные двигатели с фазным ротором.

Короткозамкнутый ротор выполняется с обмоткой, представляющей собой медные или алюминиевые стержни, уложенные без изоляции в пазы и замкнутые на торцах ротора друг с другом торцевыми кольцами. Если такую обмотку мысленно вынуть из пазов стального цилиндра ротора, то она выглядит как беличья клетка (рис. 2).

Фазный ротор имеет обмотку, выполненную так же, как и обмотка статора, что позволяет вводить в цепь добавочное сопротивление для облегчения пуска или для регулирования частоты вращения.

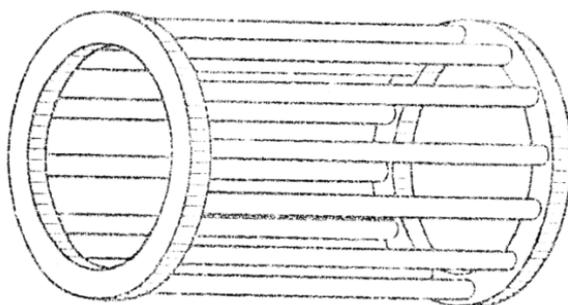


Рис. 2. Короткозамкнутая обмотка ротора ("беличья клетка")

Поясним принцип действия асинхронного двигателя. Трехфазная обмотка статора образует вращающееся магнитное поле, которое имеет P пар полюсов. Это поле можно представить в виде модели – системы вращающихся вокруг некоторой оси постоянных магнитов, полюсы которых чередуются. Если внутри такой системы разместить короткозамкнутый или фазный ротор, ось которого совпадает с осью вращения системы магнитных полюсов, то в каждом стержне обмотки ротора индуцируется ЭДС и в замкнутой обмотке образуется ток.

При неподвижном роторе индуцированный в обмотке ротора ток, как в трансформаторе, имеет ту же частоту, что и ток в обмотке статора, иначе говоря, $f_{2H} = f$. По мере возрастания частоты вращения ротора разность скоростей полюсов и ротора уменьшается, ротор как бы стремится догнать вращающиеся полюсы. Однако “догнать полюсы” в асинхронном двигателе, т.е. приобрести частоту вращения, синхронную с полюсами, ротор не может, поскольку при синхронной скорости исчезнет относительное движение полюсов и ротора, и в обмотке ротора не будет индуцироваться ток, т.е. исчезнет и вращающий момент. Для того, чтобы двигатель работал, ротор должен отставать в частоте вращения от полюсов, “скользить” относительно полюсов вращающегося поля.

Когда вращающий и тормозной моменты уравниваются, ротор приобретет некоторую установившуюся частоту вращения n_2 , меньшую n_1 . Разность частот вращения поля и ротора, отнесенная к частоте вращения поля, называется *скольжением*:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (1)$$

При нормальном исполнении двигателя и номинальной нагрузке скольжение обычно невелико и составляет $0,02 \div 0,05$, т.е. частота вращения ротора $n_2 = n_1(1 - S)$ близка к синхронной (к n_1). Очевидно, что в общем случае величина скольжения двигателя заключена между значениями $S=1$ при неподвижном роторе и $S=0$ при синхронной скорости.

Частота вращения поля в асинхронной машине жестко связана с частотой сети f_1 и числом пар полюсов машины. При промышленной частоте $f=50$ Гц существует следующий дискретный ряд скоростей вращения:

P	1	2	3	4	...
n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750	...

Относительно частоты вращения поля n_1 ротор движется со скоростью скольжения $n_s = n_1 - n_2$, тогда частота тока в роторе

$$f_2 = pn_s = p(n_1 - n_2) = p(n_1 - n_2) \frac{n_1}{n_1} = pn_1 S = f_1 S \quad (2)$$

Вращающееся поле движется в направлении, совпадающем с последовательностью чередования фаз. Для изменения направления вращения поля, а следовательно и ротора достаточно поменять местами две фазы.

Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе весьма сходны с процессами в трансформаторе. Более того, заторможенный асинхронный двигатель собственно и представляет собой трансформатор с повышенным значением намагничивающего тока из-за наличия воздушного зазора. Это сходство дает возможность определить ЭДС в обмотках статора (E_1) и неподвижного ротора (E_{2H}) в соответствии с формулой трансформаторной эдс, введя в нее обмоточные коэффициенты:

$$E_1 = 4,44K_{об1}W_1f_1\Phi_{om}, \quad E_{2H} = 4,44K_{об2}W_2f_1\Phi_{om}.$$

где $K_{об1}$ и $K_{об2}$ – обмоточные коэффициенты соответственно обмоток статора и ротора;

f_1 – частота сети;

Φ_{om} – амплитудное значение основного магнитного потока, сцепленного с обмотками статора и ротора;

W_1 и W_2 – число витков в одной фазе обмотки статора и ротора соответственно.

При вращающемся роторе частота тока в нем становится значительно меньше и согласно формуле (2) составляет $f_2 = Sf_1$. Поэтому ЭДС фазы обмотки вращающегося ротора (E_{2S}) может быть подсчитана по формуле

$$E_{2S} = 4,44K_{об2}W_2f_2\Phi_{om} = 4,44K_{об2}W_2Sf_1\Phi_{om}, \quad E_{2S} = SE_{2H} \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что ЭДС вращающегося ротора при нормальных условиях составляет лишь несколько процентов от ЭДС неподвижного ротора

(вспомним, что $S = 0,02 \div 0,05$). Но именно такой ЭДС достаточно, чтобы в короткозамкнутой обмотке ротора возникал ток, необходимый для образования потребного вращающего момента.

Ток ротора работающей машины определим, разделив ЭДС E_{2S} на сопротивление цепи фазы ротора:

$$I_2 = \frac{E_{2S}}{Z_2} = \frac{E_{2S}}{\sqrt{R_2^2 + x_{2S}^2}} = \sqrt{R_2^2 + x_{2S}^2} \quad (4)$$

Сопротивление R_2 обычно весьма мало и практически не зависит от частоты. Индуктивное же сопротивление вращающегося ротора x_{2S} существенно зависит от частоты. Действительно, если при неподвижном роторе

$$x_{2H} = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 S L_2,$$

то при вращающемся роторе

$$x_{2S} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 S L_2 = S x_{2H}. \quad (5)$$

Следовательно, чем больше частота вращения ротора, чем ближе она к синхронной, тем меньше индуктивное сопротивление вторичной цепи машины.

Подставив выражение(5) в формулу (4), получим следующее выражение для тока ротора:

$$I_2 = \frac{S E_{2H}}{\sqrt{R_2^2 + (S x_{2H})^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{(R_2/S)^2 + x_{2H}^2}}. \quad (6)$$

В асинхронных электродвигателях вся мощность из статора в ротор передается вращающимся полем. Эта мощность, равная подведенной к двигателю мощности за вычетом потерь в статоре (потерь в обмотке и в стали), называется *электромагнитной мощностью* $P_{ЭМ}$. Именно эта мощность и образует вращающий момент M , приводящий во вращение ротор. Приняв во внимание, что поле вращается с угловой скоростью $2\pi n_1$, можем записать

$$P_{ЭМ} = M 2\pi n_1 \quad (7)$$

Переданная ротору мощность может быть определена также через электрические величины, относящиеся к неподвижному ротору:

$$P_{ЭМ} = m_2 E_{2H} I_2 \cos \Psi_2, \quad (8)$$

где m – число фаз обмотки ротора (для “беличьей клетки” число фаз равно числу стержней).

Из выражения (7) с учетом (3), (6) и (8) получаем

$$M = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{2\pi n_1} = \frac{m_2 E_{2H}^2 R^2 / S}{2\pi n_1 [(R_2/S)^2 + x_{2H}^2]}.$$

Представим далее коэффициент трансформации по напряжению заторможенного асинхронного двигателя в виде

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 K_{061} W_1 f_1 \Phi_{0m}}{4,44 K_{062} W_2 f_1 \Phi_{0m}} = \frac{K_{061} W_1}{K_{062} W_2},$$

тогда $E_{2H} = E_1 / K$. Кроме того, учитывая, что падение напряжения на сопротивлении обмотки статора невелико и при нормальной работе машины можно считать, что $E_1 \approx U_1$, получим приближенное выражение для вращающего момента

$$M = \frac{m_2}{K^2 2\pi n_1} = \frac{U_1^2 R_2 / S}{(R_2/S)^2 + x_{2H}^2}.$$

Для качественного анализа, полагая, что частота сети остается постоянной, т.е. $n_1 = f_1 / P = \text{const}$, удобно все постоянные величины обозначить одной константой $C_M = \frac{m_2 P}{K^2 2\pi f_1}$. Тогда получаем более простое выражение для вращающего момента

$$M = C_M U_1^2 \frac{R_2 / S}{(R_2/S)^2 + x_{2H}^2}. \quad (9)$$

На рис. 3 приведена в виде сплошной линии графическая зависимость $M(S)$. Проанализируем выражения (9) и характеристику $M(S)$.

Электродвигатель в установившемся режиме работает при условии равенства вращающего и противодействующего (тормозного) моментов. Представим себе, что исполнительный механизм, приводимый во вращение рассматриваемым двигателем, оказывает постоянное тормозное усилие, которому соответствует постоянный тормозной момент M_T . На рис. 3 имеются две точки, для которых справедливо равенство $M = M_T$: это точки a и b .

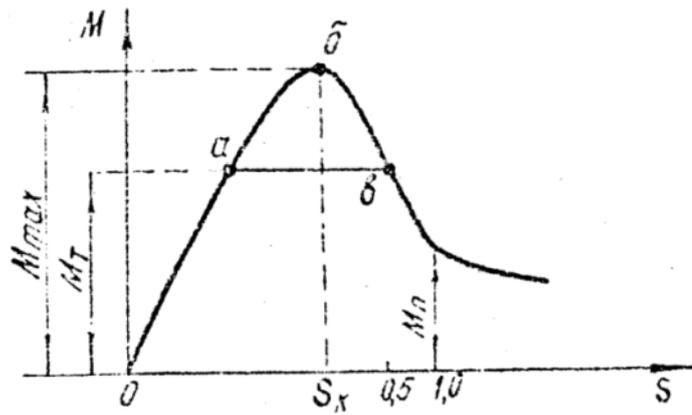


Рис. 3. Зависимость $M(S)$

Точка a характеризует устойчивую работу двигателя. Действительно, если двигатель изменит частоту вращения, например, затормозится, то скольжение возрастет, вместе с ним возрастет и вращающийся момент. Благодаря этому частота вращения двигателя повысится и вновь установится динамическое равновесие $M = M_T$. В точке b работа двигателя не может быть устойчивой: случайное отклонение частоты вращения приведет либо к остановке двигателя, либо к переходу в точку a .

Следовательно, вся восходящая часть характеристики является областью устойчивой работы, а вся нисходящая часть – областью неустойчивой работы.

Точка \tilde{b} , соответствующая максимальному (иногда говорят “опрокидывающему”) моменту, разделяет области устойчивой и неустойчивой работы.

Максимальному значению вращающего момента M_{max} соответствует так называемое *критическое скольжение* S_K . Аналитически можно найти значение критического скольжения, если производную по S от выражения (9) приравнять нулю:

$$\frac{dM}{dS} = C_M U_1^2 \frac{R_2^2 / S^4 - R^2 \cdot x_{2H}^2 / S^2}{[(R_2/S)^2 + x_{2H}^2]^2} = 0,$$

отсюда

$$S_K = \pm R_2 / x_{2H} \quad (10)$$

В формуле (10) знак “плюс” относится к режиму двигателя, а знак “минус” – к режиму генератора.

Подставив значение критического скольжения в формулу (9), найдем выражение для максимального момента

$$M_{max} = C_M U_1^2 \frac{1}{2x_{2H}}.$$

Механическая характеристика. Скольжение однозначно связано с частотой вращения ротора уравнением

$$n_2 = n_1(1 - S).$$

Поэтому график внутри функции $M = f(S)$ можно построить в виде $n_2 = f(M)$, откладывая вместо скольжения частоту вращения ротора n_2 (рис. 4). Зависимость частоты вращения ротора от момента получила название механической характеристики.

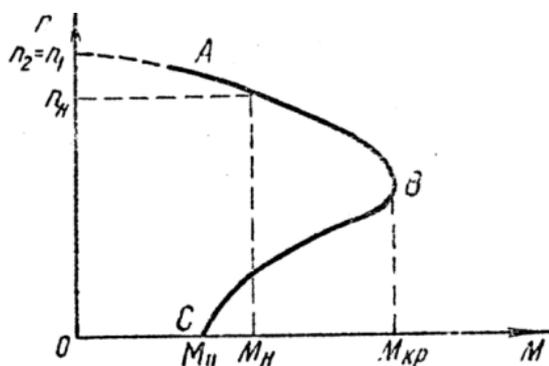


Рис. 4. Механическая характеристика

Устойчивая часть механической характеристики обозначена сплошной линией на рис. 4. Ее можно рассчитать по упрощенной формуле, вывода которой мы здесь не приводим:

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S_{кр} + S}{S} + S_{кр}}. \quad (12)$$

Зная для данного двигателя $M_{кр}$ и $S_{кр}$ (они даны в каталоге), можно найти момент, соответствующий любому значению скольжения в пределах от 0 до $S_{кр}$.

Рабочие характеристики. Зависимости от мощности на валу P_2 :

- 1) Частоты вращения n_2 ;
- 2) Вращающего момента M ;
- 3) Тока статора I_1 ;
- 4) Коэффициент мощности $\cos\varphi$;
- 5) КПД η

получили название рабочих характеристик. Они снимаются при постоянном напряжении сети и имеют вид, представленный на рис. 5.

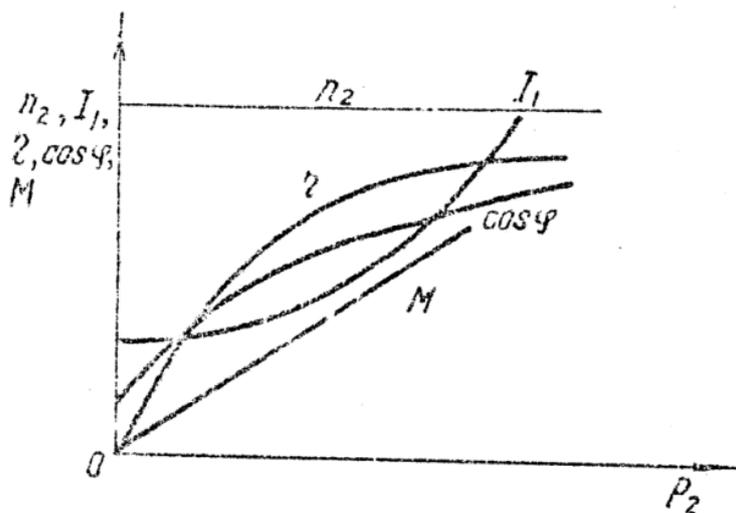


Рис. 5. Рабочие характеристики двигателя

- 1) $n_2 = f(P_2)$. При холостом ходе ($P_2 = 0$) частота вращения, которая близка к синхронной ($n_2 \approx n_1$). При номинальной мощности n_2 меньше n_1 на величину скольжения $S_H = 2+6\%$. Зависимость представляет устойчивую часть механической характеристики.
- 2) $M=f(P_2)$. Мощность и вращающий момент связаны соотношением $P_2 = \omega_2 M$; учитывая незначительное изменение скорости ω_2 получим характеристику, близкую к линейной.
- 3) $I=f(P_2)$. Ток холостого хода I_{10} составляет $20 + 40\%$ от номинального. При увеличении нагрузки двигателя ток статора $\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_2$ увеличивается за счет составляющей I_2 , компенсирующей размагничивающее действие тока в роторе.
- 4) $\cos\varphi=f(P_2)$. При холостом ходе ($P_2 = 0$) двигатель потребляет намагничивающий ток I_{10} , реактивный ток. Активная составляющая тока, покрывающая потери в стали, мала и $\cos\varphi = 0,1 : 0,2$. Так как магнитный поток в двигателе постоянен, то увеличение нагрузки двигателя сопровождается увеличением только активной составляющей тока статора и, следовательно, увеличением $\cos\varphi$ до значений $0,8:0,9$. Отсюда ясна роль загрузки двигателя в улучшении $\cos\varphi$ питающей сети.

5) $\eta = f(P_2)$. КПД $\eta = P_2/P_1$ при холостом ходе равен 0 ($P_2 = 0$). При номинальной нагрузке он имеет максимальное значение. При изменении нагрузки в пределах от 0,5:1,5 P_H КПД почти не изменяется, двигатель работает экономично.

Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором. Асинхронный двигатель включается в сеть с помощью обычного рубильника или автоматического выключателя. Такой идеально простой и быстрый пуск – прямой пуск – одно из основных преимуществ короткозамкнутых двигателей. Отрицательные качества прямого пуска – большой пусковой ток и малый пусковой момент. Большой пусковой ток может привести к недопустимому понижению (“провалу”) напряжения в сети, что отрицательно скажется на работе других двигателей, работающих от этой же сети. Малый пусковой момент может затруднить пуск двигателя под нагрузкой.

Для уменьшения пускового тока применяются различные способы пуска, основанные на понижении напряжения, подводимого к обмотке статора. Рассмотрим наиболее употребляемые из них.

1. *Включение в цепь статора реактивного сопротивления.* Включают последовательно индуктивное сопротивление (реактор) и двигатель. После разгона двигателя реактор выключается, а статор включается на полное напряжение сети. Уменьшение пускового тока вызывает уменьшение пускового момента пропорционально квадрату напряжения на статоре. Например, уменьшение пускового тока в два уменьшает пусковой момент в четыре раза. Применять вместо индуктивного сопротивления активное невыгодно, так как на нагрев активного сопротивления затрачивается дополнительная активная мощность.

2. *Пуск через автотрансформатор.* Более эффективным является автотрансформаторный пуск двигателя. Пусковой момент уменьшается пропорционально линейному пусковому току в сети. Например, если пусковой ток в сети понизится в два раза, то в два раза понизится и пусковой момент. Но

схема автотрансформаторного пуска значительно сложнее и дороже схемы реактивного пуска.

3. *Переключение обмотки статора с треугольника на “звезду”*. Понизить напряжение на статоре можно, переключая на время пуска обмотку статора, нормально работающую при соединении треугольником, на соединении “звездой” (рис. 6).

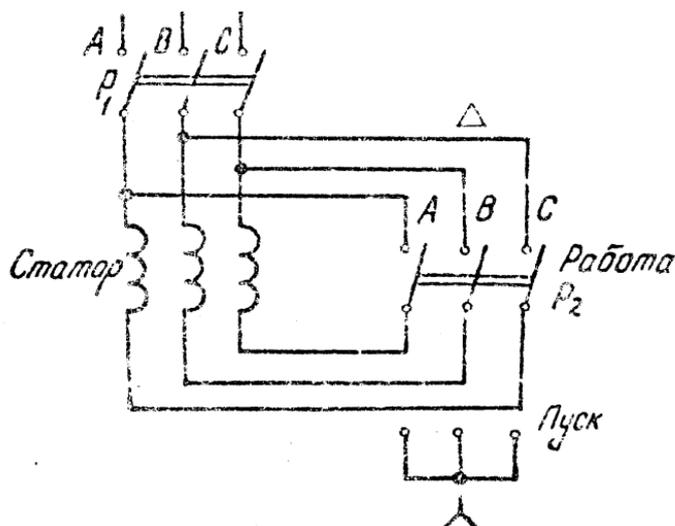


Рис. 6. Переключение обмотки статора со «звезды» на «треугольник» при пуске двигателя

При этом напряжение на фазе двигателя уменьшится в $\sqrt{3}$ раз, и в $\sqrt{3}$ раз уменьшится фазный пусковой ток

$$I_{\text{Лл}} = I_{\text{Фл}} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}Z_{\text{Ф}}} \quad (13)$$

Если бы обмотка статора была соединена треугольником, то линейный ток был бы равен

$$I_{\text{Л}\Delta} = \sqrt{3}I_{\text{Ф}\Delta} = \sqrt{3}\frac{U_{\text{Л}}}{Z_{\text{Ф}}} \quad (14)$$

Из приведенных соотношений следует, что переключение на звезду уменьшает ток в линии в 3 раза. Так как при таком включении подводимое к двигателю фазное напряжение снижается в $\sqrt{3}$ раз, то пусковой момент снизится в 3 раза, т.е. во столько же раз, во сколько и пусковой ток. В данной схеме получаются те же соотношения, что и в схеме с автотрансформатором, однако эта схема значительно проще и дешевле, так как для нее требуется только переключатель.

Способы пуска двигателей, уменьшающие подводимое к статору напряжение, применяются сравнительно редко. Так как при этом уменьшается пусковой момент, то они пригодны только для двигателей, имеющих на валу небольшой тормозной момент, например, для двигателей механизмов вентиляторного типа.

Двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками. Включением активных сопротивлений в цепь фазного ротора можно увеличить пусковой момент до максимального (если обеспечить равенство активного и индуктивного сопротивления обмотки ротора при пуске: $R_2 = x_{2H}$). При этом пусковой ток ограничен до $2 \div 3I_H$. Но двигатели с фазным ротором имеют усложненную конструкцию, что сводит к минимуму основные достоинства короткозамкнутого двигателя – предельную простоту и надежность. Поэтому были разработаны короткозамкнутые двигатели, у которых активное сопротивление роторной обмотки автоматически изменяется в соответствии с изменением ее индуктивного сопротивления. В настоящее время применяются два типа двигателей с улучшенными пусковыми характеристиками.

Двигатель с двойной обмоткой ротора (рис. 7). Ротор имеет две независимые короткозамкнутые обмотки. Одна обмотка – рабочая, заложена глубоко в теле ротора. Выполнена из медных стержней большого сечения и имеет, поэтому малое активное сопротивление. Вторая обмотка – пусковая, расположена ближе к поверхности ротора. Стержни пусковой обмотки имеют малое сечение и выполнены из марганцовистой латуни – материала с более высоким удельным сопротивлением, чем у меди. Активное сопротивление пусковой обмотки в 4–5 раз больше, чем рабочей обмотки.

Индуктивность обмоток обусловлена магнитным потоком рассеяния. Поток рассеяния пусковой (наружной) обмотки $\Phi_{рн}$ встречает на своем пути магнитное сопротивление двух воздушных зазоров, поэтому он мал и мала индуктивность пусковой обмотки. Стержень рабочей обмотки окружен сталью; он создает значительно больший магнитный поток рассеяния и, следовательно, большую индуктивность. К тому же индуктивность рабочей обмотки создается суммарным

магнитным потоком рассеяния рабочей и пусковой обмотки (магнитная силовая линия Φ_{pn} охватывает и рабочую обмотку: рис.7, а)

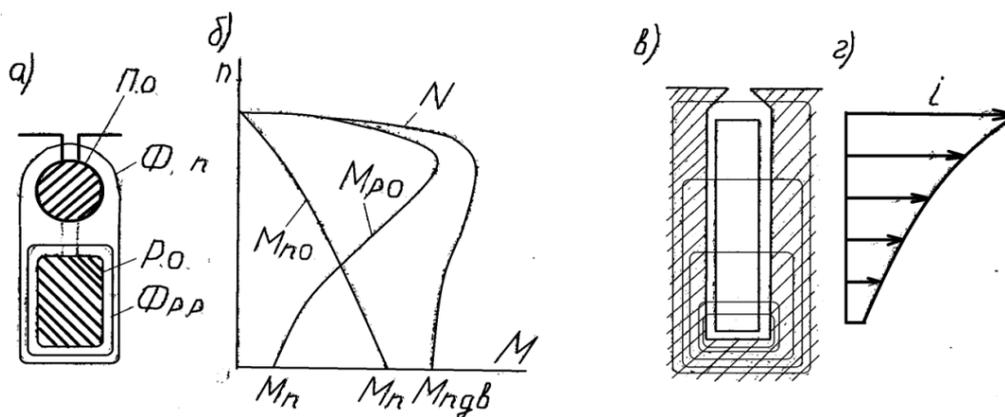


Рис. 7. Короткозамкнутый асинхронный электродвигатель с улучшенными характеристиками: двигатель с двойной клеткой (а) и его механическая характеристика (б); двигатель с глубоким пазом (в); распределение плотности тока по глубине паза (г)

В итоге индуктивность рабочей обмотки в несколько раз больше индуктивности пусковой обмотки.

В первый момент пуска двигателя ($S=1$) частота токов в роторе равна частоте сети. Рабочая обмотка имеет большое индуктивное сопротивление ($x_2 = 2\pi f_2 L_2$), поэтому ток в ней малый; это, в основном, реактивный ток, он создает небольшой вращающий момент (см. механическую характеристику рабочей обмотки $M_{p.o}$ на рис. 7, б). в пусковой обмотке активное сопротивление превышает индуктивное, поэтому ток относительно эдс сдвинут по фазе на малый угол. Это, в основном, активный ток, он создает большой пусковой момент (кривая $M_{n.o}$ на рис. 7, б).

Когда двигатель развернется, частота токов в роторе уменьшится до 1 – 2 Гц, и индуктивное сопротивление перестанет влиять на распределение токов между обмотками. Большая часть тока теперь проходит по рабочей обмотке, имеющей малое активное сопротивление. Результирующую механическую характеристику двигателя определим, сложив механические характеристики обеих обмоток (кривая М) $M = M_p + M_{п}$.

У двигателя с двойной “белчьей клеткой” активное сопротивление обмотки ротора изменяется в зависимости от скольжения – оно велико при спуске

и мало при рабочем скольжении. Поэтому двигатель по сравнению с короткозамкнутым развивает повышенный пусковой момент при пониженном пусковом токе. Кратность пускового момента

$$\frac{M_{\Pi}}{M_H} = 1,5 \div 2$$

Кратность пускового тока

$$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ром}}} = 4 \div 6.$$

Двигатель с глубоким пазом. Обмотка ротора (рис. 7, в) выполнена из тонких стержней (шин, уложенных на ребро). Нижние слои стержня сцеплены с большим потоком рассеяния, следовательно, индуктивное сопротивление его увеличивается сверху вниз, а плотность тока – снизу вверх (рис. 7, г). Это явление особенно резко проявляется при пуске: вытеснение тока в верхнюю часть стержня приведет как бы к уменьшению его сечения (увеличится активное сопротивление). Эффект при этом будет таким же, как при включении в цепь ротора активного сопротивления, т.е. увеличится пусковой момент и уменьшится пусковой ток.

При увеличении частоты вращения ротора уменьшается индуктивное сопротивление стержня, и ток равномерно распределяется по его сечению. Активное сопротивление ротора уменьшается. Вытеснение тока в стержнях глубокопазного двигателя эквивалентно введению в обмотку ротора пускового сопротивления, которое выводится автоматически по мере уменьшения скольжения. Это обеспечивает большой пусковой момент при малом пусковом токе, как и у двигателя с фазным ротором. Отсутствие контактных колец, пусковых сопротивлений и переключающих устройств снижает стоимость глубокопазного двигателя по сравнению с фазным, повышает надежность работы, облегчает эксплуатацию.

3. Описание лабораторной установки

В работе исследуется асинхронный короткозамкнутый электродвигатель небольшой мощности (паспортные данные приведены на стенде). В качестве нагрузки используется тарированный генератор постоянного тока.

4. Рабочее задание

А. Исследование характеристик асинхронного двигателя

1. Ознакомиться устройством асинхронного электродвигателя и отметить особенности его конструкции. Записать паспортные данные асинхронного двигателя и уяснить значение всех указанных в паспорте величин. В соответствии с паспортными данными и напряжением в сети указать способ соединения обмоток статора электродвигателя (“звездой” или треугольником).
2. Собрать схему для испытания асинхронного двигателя (рис. 8), подобрав необходимые измерительные приборы в соответствии с паспортными данными двигателя.
3. Провести опыт нагрузки. Нагрузка асинхронного двигателя осуществляется путем загрузки связанного с ним генератора. Для проведения опыта необходимо включить в сеть асинхронный электродвигатель при разомкнутой цепи обмотки возбуждения генератора и выключенном нагрузочном реостате. Занести показания приборов в таблицу. Затем, включив обмотку возбуждения, возбуждив генератор до номинального напряжения, указанного в паспорте, и увеличивая нагрузку, снять 5-7 точек, доведя нагрузку двигателя до 1,1 - 1,2 его номинальной мощности (P_{2H}). Показания приборов занести в таблицу.

$N_{\text{изм.}}$	U_1	$I_{1\phi}$	P_1	n_2	U_2	I_2	I_B	P_2	S	$\cos\varphi_1$	η
	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>Bm</i>	<i>Об/мин</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Bm</i>	-	-	%
1.											
2 и т.д											

В таблице:

U_1 – линейное напряжение питающей сети;

$I_{1\phi}$ – линейный ток, потребляемый асинхронным двигателем;

P_1 – мощность, потребляемая асинхронным двигателем;

n_2 – число оборотов ротора асинхронного двигателя (по показаниям тахометра);

U_2 – напряжение на зажимах генератора постоянного тока;

I_2 – ток нагрузки генератора;

I_B – ток возбуждения генератора;

P_2 – полезная мощность на валу асинхронного двигателя;

S – скольжение.

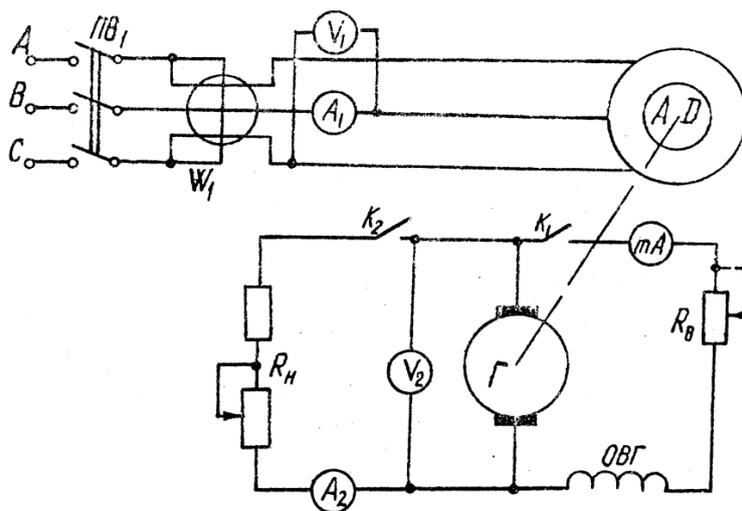


Рис. 8. Схема включения асинхронного двигателя для исследования методом непосредственной нагрузки

Полезную мощность на валу двигателя P_2 определяют на основании мощности, отдаваемой тарированным генератором, и его КПД

$$P_2 = \frac{U_2 I_2}{\eta^2},$$

где U_2 - напряжение на зажимах генератора;

I_2 – ток генератора;

η^2 – КПД генератора при данной нагрузке (указан в таблице на стенде).

Скольжение двигателя определяется по формуле

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где $n_1 = 60f_1/P$ – синхронная скорость. Здесь: f – частота питающего напряжения сети; P – число пар полюсов асинхронного двигателя.

Коэффициент мощности асинхронного двигателя определяется по формуле

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{3}U_1 I_1}.$$

Коэффициент полезного действия двигателя рассчитывается в соответствии с выражением

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \cdot 100\%$$

4. По полученным данным построить в масштабе рабочие характеристики асинхронного двигателя

$$I = f(P_2); \quad \cos\varphi_1 = f(P_2); \quad n_2 = f(P_2); \quad S = f(P_2); \quad \eta = f(P_2).$$

Б. Исследование способов пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

5. Собрать схему по рис. 9 и после проверки ее преподавателем осуществить пуск двигателя прямым включением в сеть.

6. Используя схему на рис. 9, осуществить пуск двигателя с переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник».

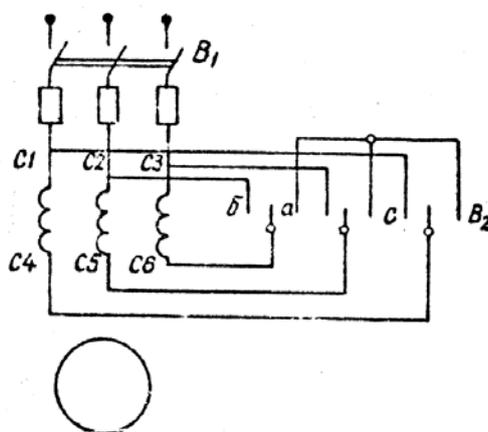


Рис. 9. Схема включения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при пуске переключением обмотки статора со «звезды» на треугольник.

5. Анализ результатов эксперимента и содержание отчета

Анализируя результаты лабораторной работы, необходимо дать сравнительную оценку пусковым свойствам асинхронного двигателя при различных методах пуска, рассмотренных в данной лабораторной работе. При этом следует иметь в виду основные пусковые параметры двигателя – начальные пусковой ток и пусковой момент, полученные в результате экспериментов. При сравнении удобно пользоваться отношениями $I'_{n\text{ ср}}/I_{n\text{ ср}}$ и M'_n/M_n , где $I_{n\text{ ср}}$ и M_n – начальные значения пускового тока и пускового момента при пуске двигателя

непосредственным включением в сеть. Вполне очевидно, что для метода пуска непосредственным включением в сеть двигателя эти отношения равны единице, а для специальных методов пуска они меньше единицы.

При выводах о достоинствах и недостатках пуска необходимо учитывать еще и такие показатели, как сложность пусковой операции и ее экономичность, имея в виду стоимость дополнительных устройств.

6. Отчет по работе должен содержать:

Наименование и цель работы; схемы (рис. 8 и 9); таблицы опытных и расчетных данных; основные формулы; построенные в масштабе характеристики; выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Объяснить, почему при отсутствии полезной нагрузки на валу асинхронного двигателя (при $P_2 = 0$) $\cos\varphi_1 \neq 0$; $I_1 \neq 0$; $S \neq 0$.
2. Как изменить направление вращения асинхронного трехфазного электродвигателя?
3. Насколько уменьшится пусковой ток асинхронного двигателя при его пуске методом переключения обмотки статора со “звезды” на треугольник? Как при этом изменится пусковой момент?
4. Какова зависимость пускового момента асинхронного двигателя от напряжения, подводимого к обмотке статора?
5. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
6. Как обозначают начала и концы фаз обмотки статора?
7. Как определить начало и конец фазы обмотки статора асинхронного двигателя при отсутствии маркировки зажимов машины?
8. Как рассчитать номинальный момент асинхронного двигателя по его паспортным данным?
9. Какие преимущества и недостатки свойственны асинхронному двигателю по сравнению с двигателем с фазным ротором?

10. Во сколько раз можно кратковременно перегружать асинхронный двигатель, не опасаясь затормаживания ротора?
11. Какими способами можно ограничить величину пускового тока асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
12. Как изменится коэффициент мощности асинхронного двигателя при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке на валу?

ГЛОССАРИЙ

A

Автотрансформатор – вид трансформатора, в котором между первичной и вторичной обмотками кроме магнитной существует также электрическая связь.

Активная мощность – мощность, соответствующая электрической энергии, преобразуемой двухполюсником в неэлектрические виды при данном напряжении и токе на входе двухполюсника.

Активная проводимость – вещественная часть комплексной проводимости, определяющая интенсивность преобразования двухполюсником электрической энергии в неэлектрические виды.

Активное напряжение – составляющая входного напряжения двухполюсника, совпадающая по фазе с током и соответствующая активной мощности, преобразуемой двухполюсником при данном входном токе.

Активное сопротивление – вещественная часть комплексного сопротивления, определяющая интенсивность преобразования двухполюсником электрической энергии в неэлектрические виды.

Активный слой ротора гистерезисного двигателя – часть ротора в виде сплошного или состоящего из колец полого цилиндра, который в асинхронном режиме перемагничивается за счёт МДС статорной обмотки.

Активный ток – составляющая входного тока двухполюсника, совпадающая по фазе с напряжением и соответствующая активной мощности, преобразуемой двухполюсником при данном входном напряжении.

Асинхронный двигатель с двойной «беличьей клеткой» – двигатель с двумя «беличьими клетками» в пазах ротора, в результате чего пусковой момент увеличивается не только за счёт

изменение сопротивления ротора, вызванного вытеснением тока в наружную клетку при пуске, но также за счёт различия сопротивлений клеток.

Асинхронный двигатель с экранированными (расщеплёнными) полюсами – явнополюсный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, у которого часть полюса охвачена (экранирована) короткозамкнутым витком, создающим фазовый сдвиг магнитного потока в экранированной части, в результате чего потоки экранированной и неэкранированной частей формируют вращающееся магнитное поле.

Асинхронный пуск – ввод синхронного двигателя в синхронизм путём разгона ротора до скорости близкой к синхронной с помощью асинхронного вращающего момента, создаваемого пусковой короткозамкнутой обмоткой,

расположенной на роторе, или присоединённым к валу пусковым асинхронным двигателем.

Б

Безредукторный электропривод – электропривод, не имеющий механических преобразователей координат движения, в котором управление движением осуществляется электрическим регулятором.

«Беличья клетка» – название конструкции обмотки ротора асинхронного двигателя, состоящей из нескольких стержней и двух колец, замыкающих их по краям, и внешне напоминающая прототип, от которого произошло название.

Беспазовый якорь – конструкция якоря исполнительного двигателя постоянного тока, в которой проводники обмотки якоря расположены на гладкой цилиндрической поверхности якоря, чем достигается уменьшение индуктивности обмотки и улучшение условий коммутации.

В

Вебер-амперная характеристика – зависимость потокосцепления участка электрической цепи от протекающего по нему тока.

Векторная диаграмма – совокупность векторов, изображающая синусоидальные токи, напряжения и ЭДС, действующие в электрической цепи.

Ветвь электрической цепи – связная совокупность элементов электрической цепи, образующих путь для протекания тока между двумя узлами.

Вихревые токи (токи Фуко) – электрический ток, возникающий под действием ЭДС индукции в проводящей среде, находящейся в изменяющемся магнитном потоке, и замыкающийся по concentрическим контурам, охватывающим магнитные линии.

Внешняя характеристика автономного синхронного генератора – зависимость напряжения на выходе генератора от величины тока нагрузки при неизменном коэффициенте мощности нагрузки, номинальном токе возбуждения и скорости вращения.

Внешняя характеристика источника электрической энергии – зависимость напряжения на выходе источника от тока в нагрузке.

Внешняя характеристика трансформатора – зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора от величины тока нагрузки.

Вольт-амперная характеристика – зависимость напряжения на участке электрической цепи от протекающего по нему тока.

Вольт-кулонова характеристика – зависимость напряжения на участке электрической цепи от величины заряда на его концах.

Вращающееся магнитное поле – магнитное поле, ось которого проходящая через центры полюсов вращается в пространстве.

Времятоковая (защитная) характеристика – зависимость времени срабатывания защиты от величины протекающего тока.

Вторичная обмотка трансформатора – обмотка, к которой подключается нагрузка трансформатора.

Входной ток (напряжение) двухполюсника – ток (напряжение) в точках подключения двухполюсника к внешней цепи.

Выход («выпадение») из синхронизма – переход синхронной машины в асинхронный режим при превышении моментом нагрузки величины максимального момента, развиваемого машиной.

G

Гистерезисный двигатель – синхронный двигатель, у которого в асинхронном режиме происходит перемагничивание материала ротора (изменение положения оси магнитного поля) и за счёт этого создаётся вращающий момент, величина которого зависит от формы гистерезисной петли.

Главные полюсы машины постоянного тока – конструкция из ферромагнитного материала, предназначенная для создания и распределения основного магнитного потока в машине.

Глубокопазный асинхронный двигатель – двигатель, у которого глубина пазов сердечника ротора значительно больше ширины, за счёт чего усиливается эффект вытеснения тока в наружные слои стержней обмотки при пуске и увеличивается пусковой момент.

Д

Двигатель с принудительной вентиляцией – двигатель, в котором вентиляция осуществляется внешним двигателем и теплоотвод не зависит от скорости вращения.

Двойная изоляция – совокупность рабочей и защитной изоляции, при которой исключается прикосновение к частям электроустановки с опасным напряжением при повреждении только рабочей или только защитной изоляции.

Двухполюсник – часть электрической цепи, подключённая к ней двумя проводами (в двух точках).

Двухфазный асинхронный двигатель – двигатель с короткозамкнутым ротором, имеющий две фазные обмотки, смещённые в пространстве на 90° управление которым осуществляется путём изменения амплитуды и/или фазового сдвига напряжения питания одной из обмоток.

Действующее (эффективное, среднеквадратичное) значение синусоидальной величины – значение эквивалентное по количеству тепла, выделяющемуся в цепи постоянного тока при тех же условиях.

Динамическое торможение – торможение двигателя путём преобразования механической энергии в электрическую и рассеянием её в обмотке якоря или во внешнем сопротивлении.

Дифференциальное (динамическое) сопротивление – отношение приращения падения напряжения на нелинейном резистивном элементе к приращению протекающего по нему тока вблизи некоторой точки вольт-амперной характеристики.

Длительный режим работы электропривода – режим работы привода с постоянной нагрузкой, при котором температура двигателя достигает установившегося значения.

Добротность катушки индуктивности – отношение индуктивного сопротивления катушки к её активному сопротивлению.

Добротность конденсатора – отношение ёмкостного сопротивления конденсатора к его активному сопротивлению.

Дополнительные полюсы машины постоянного тока – конструкция из ферромагнитного материала, расположенная между главными полюсами и предназначенная для компенсации магнитного потока реакции якоря в межполюсном пространстве.

Ё, Е

Ёмкостное сопротивление – параметр ёмкостного элемента электрической цепи, определяющий соотношение между величиной тока и напряжения на нём.

Ёмкостный элемент – идеальный элемент электрической цепи (идеальный конденсатор), обладающий только электрической ёмкостью.

Ёмкость (электрическая ёмкость) – параметр, характеризующий способность конденсатора формировать электрическое поле с определённым запасом энергии и численно равный отношению величины заряда, накапливаемого конденсатором к величине напряжения на его электродах.

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя – механическая характеристика, соответствующая номинальному напряжению и частоте питания и отсутствию сопротивлений в цепи фазного ротора.

Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока

– механическая характеристика, соответствующая номинальным значениям напряжения на якоре и тока возбуждения и отсутствию добавочного сопротивления.

Естественный заземлитель – используемые для заземления металлические конструкции и коммуникации зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землёй.

Ж

Жёсткость механической характеристики – отношение приращения вращающего момента двигателя к приращению скорости или производная dM/dn , характеризующее реакцию двигателя на изменение нагрузки.

З

Заземление – преднамеренное электрическое соединение какой-либо части электроустановки с заземляющим устройством.

Заземляющее устройство (заземлитель) – совокупность соединённых между собой металлических проводников, находящихся в соприкосновении с землёй.

Закон полного тока – линейный интеграл вектора напряжённости магнитного поля, взятый по замкнутому контуру, равен полному электрическому току, проходящему сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

Законы коммутации – следствия закона сохранения энергии, отражающие непрерывность тока в индуктивном элементе и напряжения на ёмкостном элементе при коммутации.

Замедленная (ускоренная) коммутация – коммутация, при которой ток в коммутируемой секции достигает нулевого значения после (до) середины периода коммутации.

Зануление – преднамеренное электрическое соединение токопроводящих частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземлённой нейтралью генератора или трансформатора.

Защитное заземление – заземление токопроводящих частей электроустановок для обеспечения электробезопасности.

Защитное отключение – автоматическое отключение всех фаз участка цепи, обеспечивающее безопасное сочетание величины тока и времени его протекания при замыкании на корпус или уменьшения сопротивления изоляции ниже определённого уровня.

И

Идеальный ключ – элемент электрической цепи, имеющий два состояния, в которых он обладает нулевым и бесконечно большим активным сопротивлением, и мгновенно меняющий состояние в заданный момент времени.

Измерительные трансформаторы – трансформаторы напряжения и тока, включаемые между прибором и измерительной цепью для обеспечения безопасности измерений и приведения измеряемых величин к уровню доступному измерению стандартными приборами.

Индуктивное сопротивление – параметр индуктивного элемента электрической цепи, определяющий соотношение между величиной тока и напряжения на нём.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки – индуктивное сопротивление, соответствующее индуктивности рассеяния.

Индуктивность – параметр, определяющий энергию магнитного поля участка электрической цепи и численно равный отношению величины потокосцепления этого участка к величине протекающего по нему тока

Индуктивность (индуктивное сопротивление) реакции якоря синхронной машины – индуктивность (индуктивное сопротивление), соответствующая потокосцеплению потока реакции якоря с фазной обмоткой статора.

Индуктивность рассеяния обмотки – индуктивность, определяющая взаимосвязь между величиной магнитного потока рассеяния и тока в обмотке электромагнитного устройства, возбуждающего этот поток.

Индуктивный элемент – идеальный элемент электрической цепи (идеальная катушка), обладающий только индуктивностью.

Искусственный заземлитель – используемая для заземления специальная металлическая конструкция, находящаяся в соприкосновении с землёй.

Исполнительный двигатель – двигатель, предназначенный для работы в системах автоматического управления, вследствие чего к нему предъявляются особые требования по быстродействию, устойчивости, плавности и диапазону регулирования скорости вращения, а также по надёжности работы и массогабаритным показателям.

Источник тока – источник электрической энергии, формирующий в подключённой к нему электрической цепи ток, не зависящий от величины и направления падения напряжения.

Источник ЭДС (источник напряжения) – источник электрической энергии, формирующий в точках подключения к нему электрической цепи разность потенциалов, не зависящую от величины и направления протекания тока.

Источник электрической энергии – преобразователь неэлектрических видов энергии (механической, химической, тепловой и др.) в электрическую.

K

Катушечная группа – группа последовательно соединённых катушек, принадлежащих одной фазе и уложенных в соседние пазы.

Катушка – группа последовательно соединённых витков, уложенных в одни и те же пазы, и имеющая помимо изоляции отдельных витков общую изоляцию от стенок паза.

Катушка индуктивности – элемент электрической цепи (физический объект), предназначенный для формирования магнитного поля с заданными свойствами.

Коллектор – набор изолированных медных пластин, образующих цилиндрическую поверхность для скользящего контакта, к которым присоединены выводы секций обмотки якоря.

Коммутация – мгновенное изменение схемы соединения или параметров элементов электрической цепи.

Коммутация – процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую, сопровождающийся изменением направления протекания тока.

Коммутируемая секция – секция, находящаяся в процессе коммутации.

Компенсационная обмотка машины постоянного тока – обмотка, расположенная в пазах главных полюсов и предназначенная для компенсации искажения магнитного поля под полюсами полем реакции якоря.

Комплексная амплитуда – комплексное число, соответствующее вектору с модулем, равным амплитуде синусоидальной величины и составляющему с вещественной осью угол, равный её начальной фазе.

Комплексная проводимость – параметр электрической цепи, обратный комплексному сопротивлению и определяющий амплитудное и фазовое соотношения между напряжением и током двухполюсника.

Комплексное действующее значение (комплексное значение) – комплексное число, соответствующее вектору с модулем, равным действующему значению синусоидальной величины и составляющему с вещественной осью угол, равный её начальной фазе.

Комплексное сопротивление – параметр электрической цепи, определяющий амплитудное и фазовое соотношения между напряжением и током двухполюсника.

Комплексный (символический) метод расчёта – основной метод расчёта электрических цепей переменного тока, заключающийся в замене синусоидальных величин и параметров цепи комплексными числами (символами величин), в результате чего расчёт сводится к решению алгебраических уравнений.

Конденсатор – элемент электрической цепи (физический объект), в электрическом поле которого происходит накопление энергии.

Контур электрической цепи – замкнутый путь вдоль ветвей электрической цепи.

Концентрическая обмотка – распределённая обмотка, состоящая из катушек разной формы, укладываемых одна внутри другой.

Короткозамкнутый ротор – ротор асинхронного двигателя с обмоткой типа «беличья клетка».

Коэрцитивная сила – напряжённость магнитного поля, необходимая для снижения до нуля остаточной индукции.

Коэффициент нагрузки трансформатора – отношение величины тока вторичной обмотки трансформатора к номинальному значению.

Коэффициент насыщения – отношение величины МДС создающей основной магнитный поток в машине, к МДС, затрачиваемой на проведение этого потока через воздушный зазор.

Коэффициент тепловой перегрузки двигателя – отношение потерь энергии в двигателе с завышенной мощностью нагрузки, работающем в кратковременном режиме, к потерям при номинальной нагрузке.

Коэффициент трансформации (приведения) – отношение числа витков первичной обмотки трансформатора к числу витков вторичной обмотки, определяющее отношение номинальных напряжений первичной и вторичной обмоток.

Коэффициент ухудшения теплоотдачи – отношение теплоотдачи двигателя при вращении ротора со скоростью ниже номинальной к теплоотдаче при номинальной скорости вращения.

Кратковременный режим работы электропривода – режим пуска и остановки привода, при котором за время работы температура двигателя не успевает достичь установившегося значения, а за время остановки понижается до температуры окружающей среды.

Кратность максимального момента асинхронного двигателя – отношение максимального вращающего момента, развиваемого двигателем, к номинальному моменту, характеризующая способность двигателя противостоять пере- грузкам без потери устойчивости.

Кратность пускового момента асинхронного двигателя – отношение вращающего момента, развиваемого двигателем при пуске (при неподвижном роторе), к номинальному моменту.

Кривая размагничивания – часть предельной петли гистерезиса, расположенная во втором квадранте и используемая для расчёта постоянных магнитов.

Критическое скольжение асинхронного двигателя – скольжение, отделяющее участок механической характеристики, соответствующий устойчивой работе двигателя.

Круговая диаграмма – окружность, представляющая собой геометрическое место точек концов векторов активного и реактивного напряжения (тока) двухполюсника при всех возможных вариациях его параметров и постоянном входном напряжении (токе).

Круговая диаграмма асинхронного двигателя – окружность геометрического места точек конца вектора тока статора при изменении скольжения от положительной до отрицательной бесконечности.

Круговое вращающееся магнитное поле – вращающееся магнитное поле, индукция которого в любой точке оси проходящей через центры полюсов остаётся постоянной, т.е. магнитное поле, годограф вектора индукции которого является окружностью.

Л

Лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) – вид автотрансформатора с плавным регулированием выходного напряжения.

Линейная катушка индуктивности – катушка, обладающая линейной вебер-амперной характеристикой

Линейная катушка индуктивности – катушка, обладающая линейной вебер-амперной характеристикой

Линейная коммутация (коммутация сопротивлением) – оптимальная коммутация без искрообразования, при которой ток в коммутируемой секции изменяется по линейному закону.

Линейные напряжения – напряжения между линейными проводами трёхфазной цепи.

Линейные токи – токи в линейных проводах трёхфазной цепи.

Линейный источник электрической энергии – источник, обладающий линейной внешней характеристикой

Линейный провод – проводник, соединяющий источник с нагрузкой в трёхфазной цепи.

Линейный резистор – резистор, обладающий линейной вольт-амперной характеристикой

М

Магнитная индукция – векторная величина, определяющая силу, действующую на движущуюся заряжённую частицу со стороны магнитного поля.

Магнитная цепь – совокупность технических устройств и объектов, возбуждающих магнитные поля и формирующих пути для их распространения, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий магнитодвижущей силы, магнитного потока и разности магнитных потенциалов.

Магнитное поле реакции якоря синхронной машины – магнитное поле, возбуждаемое статором (якорем) синхронной машины.

Магнитный поток (поток вектора магнитной индукции) – скалярная величина, определяющая магнитную индукцию в области пространства ограниченной замкнутым контуром и равная потоку вектора магнитной индукции через поверхность этого контура.

Магнитный поток рассеяния обмотки – магнитный поток, ответвляющийся из магнитопровода в воздушную среду и пронизывающий только одну обмотку.

Магнитодвижущая сила – линейный интеграл вектора напряжённости магнитного поля, взятый по замкнутому контуру, охватывающему полный электрический ток, создающий это поле.

Магнитомягкие (магнитотвёрдые) материалы – ферромагнитные материалы с малой (большой) коэрцитивной силой.

Магнитопровод – конструкция из ферромагнитного материала, предназначенная для усиления и формирования магнитного потока.

Малоинерционный якорь – конструкция якоря исполнительного двигателя постоянного тока, в которой для уменьшения момента инерции проводники обмотки якоря отделены от магнитопровода и расположены на диске или цилиндре из немагнитного материала.

Машины постоянного тока с независимым (последовательным, параллельным) возбуждением – машины постоянного тока, обмотка возбуждения которых питается от отдельного (независимого) источника или подключена последовательно (параллельно) обмотке якоря.

Машины постоянного тока со смешанным возбуждением – машины постоянного тока с двумя обмотками возбуждения, одна из которых подключается параллельно обмотке якоря, а другая – последовательно.

Метод нагрузочной характеристики – основной графо-аналитический метод определения режима в цепи с одним нелинейным элементом, вольт- амперная характеристика которого задана графически, заключающийся в определении тока и напряжения в нелинейном

резистивном элементе по координатам точки пересечения вольт-амперной характеристики с прямой линией, проведённой через координаты точек режима холостого хода и короткого замыкания двухполюсника, эквивалентного линейной части цепи.

Метод средних потерь – способ оценки нагрева двигателя, основанный на расчёте среднего значения потерь энергии в пределах цикла изменения нагрузки и сопоставлении результата с потерями в номинальном режиме.

Метод эквивалентного момента – способ оценки нагрева двигателя, основанный на сопоставлении среднеквадратичного значения момента нагрузки в пределах цикла его изменения с номинальным значением.

Метод эквивалентного тока – способ оценки нагрева двигателя, основанный на сопоставлении среднеквадратичного значения тока в пределах цикла его изменения с номинальным значением.

Метод эквивалентной мощности – способ оценки нагрева двигателя, основанный на сопоставлении среднеквадратичного значения мощности нагрузки в пределах цикла её изменения с номинальным значением.

Механическая характеристика асинхронного двигателя – зависимость вращающего момента развиваемого двигателем от скольжения или зависимость скорости вращения от развиваемого момента.

Многоскоростные асинхронные двигатели – двух, трёх и четырёхскоростные двигатели, скорость вращения которых можно изменять ступенями путём изменения схемы соединения обмоток.

H

Намагничивающий ток – часть тока первичной обмотки, расходуемая на возбуждение магнитного потока и на компенсацию тепловых потерь в магнитопроводе.

Напряжение на заземляющем устройстве – напряжение, вызванное током замыкания на землю и распределённое вокруг точки ввода тока в заземляющее устройство.

Напряжение прикосновения – напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю при одновременном прикосновении к ним человека.

Напряжение шага – напряжение между двумя точками на земле, находящимися на расстоянии одного метра, вызванное растеканием тока замыкания на землю.

Напряжённость магнитного поля – векторная величина, определяющая свойства системы возбуждения магнитного поля и численно равная разности векторов индукции и намагниченности среды.

Начальные условия переходного процесса – токи в индуктивных элементах и напряжения на ёмкостных элементах цепи непосредственно перед коммутацией.

Нейтральная (нулевая) точка (нейтраль) – узел в соединении звездой источников или приёмников трёхфазной цепи.

Нейтральная линия (геометрическая нейтраль) – геометрическая ось симметрии между главными полюсами машины постоянного тока.

Нейтральный (нулевой) провод – проводник, соединяющий нейтральные (нулевые) точки источников и приемников в трёхфазной цепи.

Нелинейная электрическая цепь – электрическая цепь, содержащая, по крайней мере, один нелинейный элемент.

Нелинейные элементы электрической цепи – элементы электрической цепи, параметры которых зависят от протекающего по ним тока или от приложенного к ним напряжения, т.е. элементы с нелинейной вольт-амперной, вебер-амперной или кулон-вольтной характеристикой.

Несвязанная трёхфазная система – трёхфазная цепь, не имеющая электрической (гальванической) связи между фазами.

Номинальное напряжение вторичной обмотки – напряжение на вторичной обмотке при отключённой нагрузке трансформатора.

Номинальное напряжение первичной обмотки – расчётное напряжение на первичной обмотке трансформатора.

Номинальные режимы работы электропривода – три основных и пять дополнительных стандартных режимов распределения нагрузки привода во времени.

Номинальный режим работы электрической цепи – режим, при котором элементы электрической цепи работают в условиях соответствующих данным их проектирования

О

Обмотка возбуждения двухфазного асинхронного двигателя – обмотка, подключаемая к нерегулируемому источнику питания.

Обмотка возбуждения машины постоянного тока – обмотка, расположенная на главных полюсах и предназначенная для создания основного магнитного потока машины.

Обмотка возбуждения синхронной машины – обмотка ротора, создающая постоянное магнитное поле.

Обмотка управления двухфазного асинхронного двигателя – обмотка, подключаемая к источнику питания с регулируемой амплитудой или начальной фазой напряжения.

Обратная задача расчёта магнитной цепи – определение магнитных потоков в магнитной цепи при заданных геометрических и магнитных параметрах элементов и магнитодвижущих силах.

Однофазный асинхронный двигатель – двигатель с короткозамкнутым ротором, питание которого осуществляется от двухпроводной однофазной сети переменного тока.

«Опрокидывание» асинхронного двигателя – остановка двигателя вследствие потери устойчивости.

Опыт короткого замыкания – искусственно созданный режим короткого замыкания при напряжении питания пониженном до значения, при котором ток первичной обмотки равен номинальному, проводимый с целью определения параметров схемы замещения и качества изготовления трансформатора.

Опыт холостого хода – искусственно созданный режим холостого хода для определения параметров схемы замещения и качества изготовления трансформатора.

Основной магнитный поток трансформатора – магнитный поток в магнитопроводе трансформатора, пронизывающий обе обмотки.

Остаточная индукция – индукция в ферромагнитном материале после уменьшения до нуля напряжённости магнитного поля.

II

Параллельная схема замещения двухполюсника – схема замещения, состоящая из параллельного соединения двух элементов, соответствующих активной и реактивной проводимости двухполюсника.

Параллельные ветви обмотки якоря машины постоянного тока – разделение щётками кольцевой схемы соединения секций обмотки якоря на параллельные ветви.

Пассивные элементы электрической цепи – элементы, не производящие электрическую энергию (резистор, катушка индуктивности, конденсатор).

Пассивный двухполюсник – двухполюсник, не содержащий источников электрической энергии.

Первичная обмотка трансформатора – обмотка, подключаемая к источнику электрической энергии.

Переменные потери в трансформаторе – тепловые потери энергии в трансформаторе зависящие от его нагрузки и равные потерям в обмотках.

Переходные процессы – электромагнитные процессы в электрической цепи, возникающие при изменении её состояния и обусловленные перераспределением и преобразованием энергии.

Повторно-кратковременный режим работы электропривода – циклический режим пуска и остановки привода, при котором за время работы температура двигателя не успевает достичь установившегося значения, а за время остановки не успевает понизиться до температуры окружающей среды.

Повышающий (понижающий) трансформатор – трансформатор, у которого номинальное напряжение вторичной обмотки больше (меньше) номинального напряжения первичной обмотки.

Полная (кажущаяся) мощность – условная величина, вводимая для удобства в систему оценок мощности и численно равная предельно возможной активной мощности при данном напряжении и токе на входе двухполюсника.

Полная проводимость – модуль комплексной проводимости, определяющий соотношение действующих (амплитудных) значений тока и напряжения.

Полное сопротивление – модуль комплексного сопротивления, определяющий соотношение действующих (амплитудных) значений тока и напряжения.

Полный шаг обмотки (витка, катушки) – шаг равный полюсному делению.

Полюсное деление – расстояние между полюсами магнитного поля машины, выраженное в линейных или угловых единицах измерения, а также числом пазов пакета статора или ротора.

Полюсное управление – регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока путём изменения напряжения питания (тока) обмотки возбуждения.

Порядок чередования фаз – последовательность, в которой фазные ЭДС проходят через одинаковые состояния, например, через нулевые значения.

Последовательная схема замещения двухполюсника – схема замещения, состоящая из последовательного соединения двух элементов, соответствующих активному и реактивному сопротивлению двухполюсника.

Постоянная времени нагрева (охлаждения) двигателя – отношение теплоёмкости двигателя к теплоотдаче, определяющее длительность процессов теплообмена с окружающей средой.

Постоянные потери в трансформаторе – тепловые потери энергии в трансформаторе не зависящие от его нагрузки и равные потерям в магнитопроводе.

Потери в «меди» – тепловые потери в проводе обмотки электромагнитного устройства, вызванные протеканием электрического тока.

Потери в «стали» – сумма тепловых потерь электрической энергии в материале магнитопровода от гистерезиса и вихревых токов.

Потери от вихревых токов – тепловые потери электрической энергии, вызванные протеканием вихревых токов в материале магнитопровода.

Потери от гистерезиса – тепловые потери электрической энергии, связанные с перемагничиванием материала магнитопровода и пропорциональные площади петли гистерезиса.

Потокоцепление – сумма магнитных потоков, сцеплённых с витками катушки.

Приведение параметров обмотки – математическая операция замены реальных значений параметров элементов схемы замещения, тока, напряжений и ЭДС одной из обмоток расчётными эквивалентами, соответствующими числу витков другой обмотки, при условии сохранения мощности элементов схемы. Приведение параметров производится для замены магнитной связи обмоток эквивалентной электрической связью.

Приведённые параметры элементов привода – вращающие моменты, силы и моменты инерции кинематической цепи привода приведённые (пересчитанные) к скорости вращения двигателя при условии сохранения энергии движущихся масс.

Приёмник электрической энергии – преобразователь электрической энергии в другие виды энергии (механическую, химическую, тепловую и др.).

Принцип суперпозиции – реакция электрической цепи на суммарное воздействие равно сумме реакций на элементарные воздействия.

Принципиальная электрическая схема – изображение электротехнических устройств, образующих электрическую цепь, и их связей с помощью условных обозначений.

Проводимость – величина обратная сопротивлению.

Продолжительность включения – основной параметр повторно кратковременного режима работы электропривода, равный отношению длительности работы двигателя к длительности цикла работы и паузы.

Продольная (поперечная) ось ротора реактивного двигателя – геометрическая ось, соответствующая направлению, в котором магнитная проводимость (индуктивность, индуктивное сопротивление) ротора максимальна (минимальна).

Противо-ЭДС – ЭДС, наводимая в обмотке якоря электрической машины основным (рабочим) магнитным потоком и действующая встречно по отношению к ЭДС источника питания якоря.

Пролодная мощность автотрансформатора – полная мощность автотрансформатора, определяемая как произведение номинальных значений напряжения и тока вторичной обмотки.

Процентное изменение напряжения трансформатора – относительное отклонения напряжения на вторичной обмотке трансформатора от номинального значения, выраженное в процентах.

Прямая задача расчёта магнитной цепи – определение магнитодвижущих сил в магнитной цепи при заданных геометрических и магнитных параметрах элементов и магнитных потоков.

Пульсирующее магнитное поле – магнитное поле, возбуждаемое обмоткой, питающейся от источника синусоидального переменного тока, и являющееся предельным случаем эллиптического магнитного поля.

Пусковая обмотка однофазного асинхронного двигателя – обмотка статора, подключаемая к сети во время пуска двигателя для создания вращающегося магнитного поля.

P

Рабочая обмотка однофазного асинхронного двигателя – обмотка статора, постоянно подключённая к сети во время работы двигателя.

Рабочий участок механической характеристики асинхронного двигателя

– участок механической характеристики, соответствующий устойчивой работе двигателя.

Разделительный трансформатор – трансформатор, предназначенный для отделения сети, питающей приёмник от первичной электрической сети, а также от цепей заземления и зануления.

Распределённая обмотка – обмотка, состоящая из одной или нескольких катушечных групп.

Расчётная мощность автотрансформатора – часть проходной мощности автотрансформатора, определяющая расчётные параметры магнитопровода и соответствующая мощности передаваемой в цепь вторичной обмотки посредством магнитного поля.

Реактивная мощность – мощность, соответствующая электрической энергии, участвующей в периодическом обмене между двухполюсником и внешней цепью при данном напряжении и токе на входе двухполюсника.

Реактивная проводимость – мнимая часть комплексной проводимости, определяющая интенсивность обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью.

Реактивное напряжение – составляющая входного напряжения двухполюсника, смещённая по фазе относительно входного тока на 90° и соответствующая мощности периодического обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью при данном входном токе.

Реактивное сопротивление – мнимая часть комплексного сопротивления, определяющая интенсивность обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью.

Реактивный момент – вращающий момент, развиваемый двигателем за счёт магнитной асимметрии ротора.

Реактивный синхронный двигатель – двигатель с невозбуждённым ротором, магнитное поле которого является полем реакции якоря.

Реактивный ток – составляющая входного тока двухполюсника, смещённая по фазе относительно входного напряжения на 90° и соответствующая мощности периодического обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью при данном входном напряжении.

Реакция якоря машины постоянного тока – воздействие магнитного поля якоря на поле главных полюсов машины.

Реакция якоря синхронной машины – воздействие магнитного поля, возбуждаемого статором (якорем) синхронной машины, на магнитное поле ротора.

Реальный источник – источник электрической энергии, обладающий внутренними потерями.

Режим идеального холостого хода асинхронного двигателя – режим работы двигателя с нулевым скольжением, т.е. с синхронным вращением магнитного поля и ротора, реализуемый за счёт вращающего момента другого двигателя или механизма.

Режим короткого замыкания – аварийный режим работы трансформатора при замкнутых между собой выводах вторичной обмотки.

Режим короткого замыкания асинхронного двигателя – режим работы двигателя с неподвижным ротором (пуск), при котором эквивалентное сопротивление нагрузки в схеме замещения обращается в нуль.

Режим короткого замыкания электрической цепи – режим работы источника электрической энергии с замкнутыми между собой точками подключения внешней цепи.

Режим недовозбуждения (перевозбуждения) синхронной машины – режим работы с малым (большим) током обмотки возбуждения, при котором машина потребляет из сети (отдаёт в сеть) индуктивный ток.

Режим холостого хода – режим работы трансформатора при разомкнутой цепи вторичной обмотки.

Режим холостого хода асинхронного двигателя – режим работы двигателя с отсоединённой нагрузкой.

Режим холостого хода электрической цепи – режим работы источника электрической энергии с отключённой нагрузкой.

Резистивный элемент – идеальный элемент электрической цепи (идеальный резистор), обладающий только сопротивлением.

Резистор – элемент электрической цепи (физический объект), в котором происходит необратимое преобразование электрической энергии в тепловую и основным параметром которого является электрическое сопротивление.

Резонанс – режим пассивного двухполюсника, содержащего индуктивные и ёмкостные элементы, при котором его входное реактивное сопротивление равно нулю.

Резонанс напряжений – явление резонанса в последовательном контуре, при котором напряжения на реактивных элементах компенсируют друг друга.

Резонанс токов – явление резонанса в параллельном контуре, при котором реактивные токи в ветвях компенсируют друг друга.

Рекуперативное торможение – торможение двигателя с отдачей электрической энергии в питающую сеть.

Ротор – вращающаяся часть электрической машины.

С

Самовентилируемый двигатель – двигатель, в котором вентиляция осуществляется за счёт вращения ротора и поэтому при изменении скорости вращения изменяются условия теплоотвода.

Сверхток – максимальное значение тока в переходном процессе подключения цепи с индуктивным элементом к сети переменного тока, обусловленное наличием свободной составляющей тока и превышающее амплитудное значение в установившемся режиме.

Свойство обратимости электромеханических преобразователей энергии

– любой электромеханический преобразователь может осуществлять преобразование энергии в двух направлениях. Преобразование электрической энергии в механическую называется режимом двигателя, а механической в электрическую – режимом генератора.

Связанная трёхфазная система – трёхфазная цепь, в которой источники электрической энергии электрически соединены между собой и приёмники (нагрузка) соединены между собой.

Селективность защиты – способность отключения аварийного участка сети в конце защищаемой линии.

Симметричная нагрузка – приёмник (нагрузка) с одинаковыми комплексными фазными сопротивлениями.

Синусоидальный ток – электрический ток, изменяющийся во времени по синусоидальному закону.

Синхронная машина с магнитоэлектрическим возбуждением – машина, в которой магнитное поле ротора возбуждается постоянными магнитами.

Синхронная машина с электромагнитным возбуждением – машина, в которой магнитное поле ротора возбуждается электромагнитом, т.е. расположенной на роторе обмоткой возбуждения.

Синхронное индуктивное сопротивление – сумма индуктивных сопротивлений рассеяния и реакции якоря фазной обмотки статора.

Синхронные машины – бесколлекторные электрические машины, в которых движение магнитного поля и ротора в статическом режиме происходит синхронно.

Синхронный компенсатор – облегчённый синхронный двигатель, работающий без нагрузки на валу в режиме перевозбуждения и предназначенный для компенсации потребности в индуктивном токе другими потребителями, подключёнными к той же сети.

Скольжение – разность скоростей вращения магнитного поля и ротора асинхронного двигателя, отнесённая к скорости вращения поля.

Согласованный режим работы электрической цепи – режим, при котором источник электрической энергии отдаёт в нагрузку максимально возможную мощность.

Сопротивление – параметр, характеризующий способность резистора осуществлять преобразование энергии и численно равный отношению величины напряжения на резисторе к величине протекающего по нему тока.

Сосредоточенная обмотка – обмотка, состоящая из одной катушки.

Среднее значение синусоидальной величины – среднее значение синусоидальной величины за положительный полупериод.

Статическое сопротивление – отношение падения напряжения на нелинейном резистивном элементе к протекающему по нему току.

Статор – неподвижная часть электрической машины.

Схема замещения магнитной цепи – схема, в которой с помощью условных обозначений, принятых в электрических цепях, изображена взаимосвязь магнитодвижущих сил и магнитных потоков в магнитной цепи.

Схема замещения электрической цепи – условное изображение параметров устройств и объектов электрической цепи, принимаемых в расчёт при анализе электромагнитных процессов.

T

Ток замыкания на землю – ток, стекающий в землю через место замыкания.

Топология – раздел математики, изучающий топологические свойства фигур, т.е. свойства фигур, не изменяющиеся при взаимно однозначных непрерывных отображениях.

Трансформатор напряжения – статическое (не имеющее движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования одного переменного синусоидального напряжения в другое той же частоты.

Трёхпроводная трёхфазная система – трёхфазная цепь без нейтрального (нулевого) провода.

Трёхфазная цепь – совокупность трёх пар источников электрической энергии и приёмников, причём амплитуды и частоты ЭДС источников одинаковы, а начальные фазы смещены относительно друг друга на 120°

Трёхфазный трансформатор – трансформатор с фазными обмотками, расположенными на общем магнитопроводе, в результате чего между фазами сети кроме электрической существует также магнитная связь.

У

Угловая характеристика синхронной машины – зависимость вращающего момента синхронной машины от угла нагрузки.

Угол магнитных потерь (угол магнитного запаздывания) – угол, дополняющий до 90° угол фазового смещения тока относительно напряжения в идеальной катушке с ферромагнитным сердечником. Потери энергии в материале сердечника пропорциональны синусу этого угла.

Угол нагрузки – угол между осями магнитных полей статора и ротора или, что то же самое, между векторами противо-ЭДС и напряжения питания фазной обмотки статора, величина которого определяется моментом, действующим на вал синхронной машины.

Угол потерь – угол, дополняющий угол фазового сдвига между током и напряжением катушки индуктивности (конденсатора) до 90°

Узел электрической цепи – соединение трёх и более ветвей.

Укороченный (удлинённый) шаг обмотки (витка, катушки) – шаг меньше (больше) полюсного деления.

Уравнение движения привода – уравнение баланса статических и динамических моментов, действующих на вал электродвигателя.

Усиленная изоляция – изоляция электрических цепей эквивалентная по свойствам двойной изоляции.

Ф

Фаза трёхфазной цепи – часть трёхфазной цепи, включающая источник электрической энергии и подключённый к нему приёмник (нагрузку).

Фазное сопротивление – сопротивление фазы приёмника (нагрузки).

Фазные ЭДС, напряжения и токи – ЭДС, напряжения и токи в фазах трёхфазной цепи.

Фазный ротор – ротор асинхронного двигателя с тремя фазными обмотками, соединёнными звездой, начала которых через контактные кольца и щетки выведены на клеммную колодку для подключения к внешним электрическим цепям.

Феррорезонанс – резонанс в электрической цепи, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником.

Феррорезонансный стабилизатор напряжения (тока) – устройство для поддержания постоянным значения напряжения (тока) в электрической цепи, использующее для этого вольт-амперную характеристику феррорезонансного контура.

Физическая нейтраль – линия, проходящая через точки воздушного зазора с нулевым значением индукции.

Х

Характеристика холостого хода синхронные машины – зависимость величины ЭДС, наводимой магнитным полем ротора в обмотке статора при отключённом питании и номинальной скорости вращения, от величины тока обмотки возбуждения.

Характеристика U-образная синхронной машины – зависимость величины тока статора синхронной машины от величины тока возбуждения, полученная при постоянной нагрузке на валу и имеющая вид кривой с сильно выраженным минимумом, соответствующим режиму работы с чисто активным током.

Ц, Ч

Цикл (петля) гистерезиса – зависимость магнитной индукции от напряжённости магнитного поля при её симметричном циклическом изменении, имеющая форму замкнутой кривой (петли).

Четырёхпроводная трёхфазная система – трёхфазная цепь с нейтральным (нулевым) проводом.

Ш, Щ

Шаблонная обмотка – распределённая обмотка, состоящая из катушек одинаковой формы с одинаковым шагом.

Шаг обмотки (витка, катушки) – расстояние между пазами, в которые уложена обмотка (виток, катушка), выраженное в единицах измерения полюсного деления.

Шаговый (импульсный) двигатель – синхронный двигатель, у которого движение магнитного поля и ротора происходит дискретно (шагами) за счёт поочерёдного переключения питания статорных обмоток.

Шихтование (от нем. *Schichte* - слой) – разделение материала магнитопровода на отдельные изолированные пластины вдоль направления магнитных линий для уменьшения потерь от вихревых токов.

Щётка – проводник, изготовленный из материала с малым коэффициентом трения (графит, бронзо-графит) и образующий скользящий электрический контакт с кольцами или коллектором ротора электрической машины.

Щёточно-коллекторный узел – механический преобразователь постоянного тока в переменный.

Э

Эквивалентные синусоиды – синусоидальные величины тока и напряжения, действующие значения и активная мощность которых равны действующим значениям и активной мощности несинусоидальных периодических величин на входе двухполюсника.

Электрическая машина – электромеханический преобразователь энергии, основанный на принципе электромагнитного взаимодействия.

Электрическая сеть с глухозаземлённой нейтралью – сеть, в которой нейтральная точка (нейтраль) генератора или трансформатора непосредственно присоединена к заземляющему устройству.

Электрическая сеть с изолированной нейтралью – сеть, в которой нейтральная точка (нейтраль) генератора или трансформатора не присоединена к заземляющему устройству.

Электрическая цепь – совокупность технических устройств и объектов, по которым протекает электрический ток, и электромагнитные процессы в которых могут быть описаны понятиями электродвижущей силы, тока и напряжения.

Электрический привод (электропривод) – электромеханическая система, состоящая из электродвигателя, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение рабочего органа машины и управления этим движением.

Электрический ток – направленное движение электрических зарядов.

Электрический фильтр – устройство, предназначенное для усиления или подавления в электрической цепи токов или напряжений определённой частоты или диапазона частот.

Электрическое напряжение (падение напряжения, напряжение) – работа, необходимая для перемещения зарядов на некотором участке электрической цепи и численно равная энергии, отдаваемой единичным зарядом на этом участке.

Электродвижущая сила – сила, действующая на электрические заряды и вызывающая их движение и численно равная энергии, получаемой единичным зарядом на участке действия этой силы.

Электромагнитное рассеяние – явление неполной электромагнитной связи двух индуктивно связанных цепей, вызванное с отвлечением части магнитного потока из магнитопровода в воздушную среду.

Эллиптическое магнитное поле – вращающееся магнитное поле, годограф вектора индукции которого является эллипсом.

Эффективное число витков обмотки – расчётное число витков распределенной обмотки эквивалентное числу витков сосредоточенной обмотки с полным шагом.

Я

Явление гистерезиса – зависимость значения магнитной индукции при данной напряжённости магнитного поля от её предшествующих значений.

Якорное управление – регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока путём изменения напряжения питания якоря.

Якорь – ротор машины постоянного тока.

Якорь с печатной обмоткой – малоинерционный якорь, у которого проводники обмотки выполнены печатным способом.

Список литературы

1. Общая электроника/Под ред. А.Т. Блажкина. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Электроника/Под ред. проф. В.Г. Герасимова. – М: Высшая школа, 1985.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М: Энергоатомиздат, 1983.
4. Иванов И.И., Равдоник В.С. Электротехника. – М: Высшая школа, 1984.
5. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. – М: Энергоатомиздат, 1985.