

**Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации**

Технологический институт-филиал ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

И.Р. Салахутдинов
С.А. Сутягин
А.А. Хохлов
А.Л. Хохлов

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

краткий курс лекций



Димитровград - 2019

УДК 629
ББК 39.3
С - 16

Салахутдинов, И.Р. Общая электротехника и электроника: краткий курс лекций / И.Р. Салахутдинов, С.А. Сутягин, А.А. Хохлов, А.Л. Хохлов, - Димитровград: Технологический институт – филиал УлГАУ, 2019.- 20 с.

Рецензенты: Глущенко Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

Ротанов Евгений Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные и технические дисциплины», ПКИУПТ (филиал) ФГБОУ ВО «МГУТУ ИМ. К.Г.РАЗУМОВСКОГО (ПКУ)»

Общая электротехника и электроника: краткий курс лекций предназначен для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Утверждено
на заседании кафедры «Эксплуатация транспортно-
технологических машин и комплексов»
Технологического института – филиала
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ,
протокол № 1 от 4 сентября 2019г.

Рекомендовано
к изданию методическим советом Технологического
института – филиала
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ
Протокол № 1 от 5 сентября 2019г.

© Салахутдинов И.Р., Сутягин С.А., Хохлов А.А., Хохлов А.Л., 2019
© Технологический институт – филиал ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ	4
Лекция 2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	5
Лекция 3 ОДНОФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК	6
Лекция 5 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА	7
Лекция 6 МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА	9
Лекция 7 ТРАНСФОРМАТОРЫ	12
Лекция 8 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ	14
Лекция 9 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	15

Лекция 1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Электрические цепи постоянного тока и элементы электроцепей. Схемы замещения источников электрической энергии. Понятие узла, ветви, графа, дерева, двухполюсника, четырехполюсника. Закон Ома, законы Кирхгофа, баланс мощностей. Эквивалентное преобразование сопротивлений при различных видах соединения приемников. Сложная схема с одним источником и анализ и расчет электрических цепей с нелинейными элементами.

ОСНОВНЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Основными топологическими понятиями теории электрических цепей являются *ветвь*, *узел*, *контур*, *двухполюсник*, *четырёхполюсник*, *граф* *схемы электрических цепей*, *дерево графа* *схемы*. Рассмотрим некоторые из них.

Ветвью называют участок электрической цепи с одним и тем же током. Она может состоять из одного или нескольких последовательно включенных элементов. Так, схема цепи на рис. 1.7 состоит из пяти ветвей.

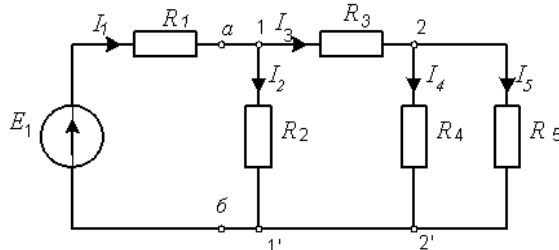
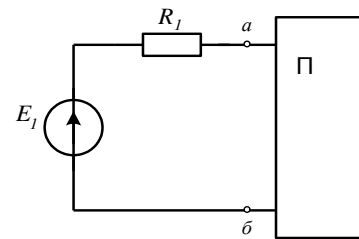


Схема замещения разветвленной электрической цепи с одним источником Э.Д.С.

Узлом называют место соединения двух элементов. Место соединения трех и более ветвей называют *сложным узлом*. Сложный узел обозначается на схеме точкой. Сложные узлы, имеющие равные потенциалы, объединяются в один *потенциальный узел*. На схеме рис.1.7 узлы 1' и 2' могут быть объединены в один потенциальный узел. Поэтому схема имеет три сложных потенциальных узла.

Контуром называют замкнутый путь, проходящий через несколько ветвей и узлов электрической цепи. Для схемы рис. 1.7 один из контуров включает позиции 2; R5; 2'; R4. *Независимым* называется контур, в состав которого входит хотя бы одна ветвь, не принадлежащая соседним контурам. Так, схема рис.1.7 содержит три независимых контура.

Двухполюсником называют часть электрической цепи с двумя выделенными зажимами – *полюсами*. Двухполюсник обозначают прямоугольником с индексами «А» или «П». Индекс «А» применяют для обозначения активного двухполюсника, в составе которого есть источники Э.Д.С. Индекс «П» применяют для обозначения пассивного двухполюсника. Например, часть схемы рис.1.7 с зажимами *a* и *b* может быть представлена пассивным двухполюсником.



Пассивный двухполюсник

ЗАКОНЫ ОМА И КИРХГОФА

Все электрические цепи подчиняются законам Ома и Кирхгофа. Краткая информация об этих законах заключается в следующем.

Закон Ома для участка цепи без Э.Д.С. устанавливает связь между током и напряжением на этом участке

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{или} \quad U = I \cdot R. \quad (1.14)$$

Закон Ома для участка цепи, содержащего Э.Д.С., позволяет найти ток этого участка

$$I = \frac{U_{ab} \pm E}{R}. \quad (1.15)$$

здесь *a*, *b* – крайние точки участка; *E* – значение Э.Д.С.

В (1.15) знак «плюс» ставится при совпадении направления тока, протекающего по участку, с направлением Э.Д.С.

Первый закон Кирхгофа имеет две формулировки.

Сумма токов, протекающих через любой узел, равна нулю.

Сумма токов, втекающих в узел, равна сумме токов, вытекающих из него.

Второй закон Кирхгофа можно сформулировать так:

Алгебраическая сумма падений напряжений в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме Э.Д.С. вдоль этого контура, т.е.

$$\sum_{i=1}^n R_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^m E_i.$$

В каждую из сумм слагаемые входят со знаком «плюс», если они совпадают с направлением обхода контура.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите элементы электрических цепей и приведите их условные графические обозначения. Как влияют характеристики элементов на название электрических цепей?
2. Что служит расчетным эквивалентом источника электрической энергии? В чем отличие идеального источника Э.Д.С. от идеального источника тока?

3. Как делятся все приемники электрической энергии? Приведите основные соотношения между током и напряжением для R , L и C элементов.
4. В каких целях введены топологические понятия электрических цепей?
5. Сформулируйте законы коммутации электрических цепей. Приведите математические соотношения, иллюстрирующие эти законы.
6. Определите внутреннее сопротивление источника Э.Д.С., если его ВАХ имеет наклон к оси токов под углом $\alpha = 30^\circ$.
7. На схеме источник Э.Д.С. $E = 10 \text{ В}$, сопротивление $R = 10 \text{ Ом}$, а емкость $C = 0,1 \text{ мкФ}$. Определите напряжение на емкости и ток цепи в момент включения ключа К.

Лекция 2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Метод контурных токов. Метод наложения (суперпозиции). Метод двух узлов или междуузлового напряжения. Метод эквивалентного активного двухполюсника (эквивалентного генератора). Режимы работы активных двухполюсников. Особенности согласованного режима.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАКОНОВ КИРХГОФА

Реальные электротехнические устройства и системы имеют сложные схемы. Перед специалистами стоят задачи расчета их параметров. Процесс расчета параметров в теории электротехники принято называть «анализом схем». Электрические схемы любой сложности подчиняются законам Ома и Кирхгофа. Однако применение только этих законов часто приводит к неоправданно сложным решениям. Поэтому был разработан ряд методов анализа, адаптированных к топологии электрических цепей и упрощающих процесс расчета их параметров. В лекции рассматриваются некоторые из таких методов.

При анализе электрических цепей определяют значение токов в их ветвях, падение напряжения на элементах или потребляемую мощность по заданному значению Э.Д.С., а также значение сопротивлений, проводимостей или других параметров по заданным значениям тока или напряжения. Для определенности будем полагать, что расчету подлежит значение токов ветвей схемы, приведенной на рис. 2.1.

Суть анализа электрических цепей применением законов Кирхгофа заключается в составлении системы из N независимых линейных уравнений, причем

$$N = (n - 1) + \kappa,$$

где: n – число сложных потенциальных узлов, κ – число независимых контуров.

По первому закону Кирхгофа составляется $(n - 1)$ уравнение, по второму закону – κ уравнений.

Схема рис. 2.1 содержит 5 ветвей ($N=5$), 3 сложных потенциальных узла ($n = 3$) и 3 независимых контура ($\kappa=3$). Значит, в систему необходимо включить два уравнения по первому закону Кирхгофа (например, для узлов 1 и 2) и три уравнения по второму закону Кирхгофа (для контуров I, II, III).

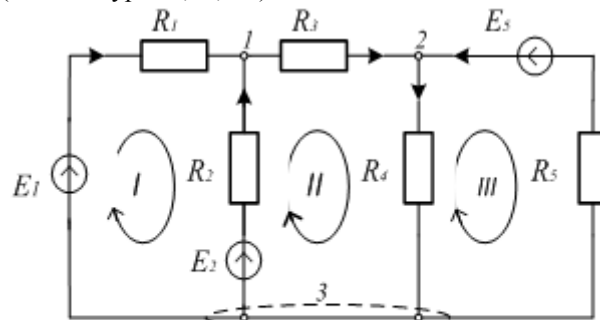


Схема замещения электрической цепи с несколькими источниками Э.Д.С.

Обозначим на схеме стрелками условно принятые положительные направления токов ветвей и направления обхода контуров. Будем полагать, что индексы токов ветвей совпадают с индексами пассивных приемников электрической энергии. Тогда система уравнений по законам Кирхгофа принимает вид:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ I_4 = I_3 + I_5 \\ R_1 \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 = E_1 - E_2 \\ R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 + R_4 \cdot I_4 = E_2 \\ -R_5 \cdot I_5 - R_4 \cdot I_4 = -E_3 \end{cases}$$

Далее необходимо решить систему из пяти уравнений относительно токов. Точность расчетов может быть проверена с помощью уравнения баланса мощностей источников и приемников электрической энергии:

$$\sum_{\kappa=1}^n E_{\kappa} \cdot I_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^m R_{\kappa} \cdot I_{\kappa}^2.$$

В левой части уравнения слагаемые имеют знак плюс, если направления Э.Д.С. и токов совпадают. В противном случае они имеют знак минус.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяются знаки членов уравнений, составленных: а) по первому закону Кирхгофа, б) по второму закону Кирхгофа?
2. Какое соединение участков электрической цепи называется последовательным? Приведите соотношение для эквивалентного сопротивления цепи из n последовательно соединенных сопротивлений.
3. Какое соединение участков электрической цепи называется параллельным?

- Приведите соотношение для эквивалентного сопротивления цепи из n параллельно соединенных сопротивлений.
4. В каких случаях возможно и целесообразно применять к анализу электрических цепей метод эквивалентных преобразований? В чем состоит суть этого метода?
 5. В каких случаях целесообразно применение метода контурных токов? Как определяются значения контурных сопротивлений и контурных Э.Д.С., взаимных сопротивлений?
 6. В чем состоит суть междузвонного метода анализа электрической цепи? Как определяются знаки Э.Д.С. в выражении для междузвонного напряжения?
 7. Для каких случаев расчета электрических цепей применяется метод активного эквивалентного двухполюсника?

Лекция 3 ОДНОФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Получение синусоидальной ЭДС. Параметры цепей переменного тока. Неразветвленные и разветвленные электрические цепи с R, L и C элементами и одним источником электрической энергии. Анализ электрического состояния неразветвленных и разветвленных электрических цепей с несколькими источниками путем законов Кирхгофа. Представление синусоидальных величин графиками, вращающимися векторами и комплексными числами. Комплексный метод расчета линейных цепей переменного тока. Виды мощностей. Явление резонанса. Коэффициент мощности. Показатели качества электроэнергии. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников. Контроль качества электрической энергии.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

В практике электротехники в качестве переменного тока широкое применение нашел ток синусоидальной формы. Это обусловлено рядом преимуществ:

- генераторы синусоидального тока значительно дешевле в производстве, чем генераторы постоянного тока;
- переменный ток легко преобразуется в постоянный;
- трансформация и передача электрической энергии переменным током требует меньших затрат, чем передача постоянным током;
- двигатели переменного тока имеют простую конструкцию, высокую надежность и относительно низкую стоимость.

В настоящее время переменный ток применяется в промышленном приводе и в электроосвещении, в сельском хозяйстве и на транспорте, в технике связи и в быту. Производство электрической энергии также осуществляется на переменном токе. Огромную роль в деле внедрения переменного тока сыграли русские ученые П.Н. Яблочков и М.О. Доливо-Добровольский.

Переменным называют ток (напряжение, Э.Д.С.), изменяющийся во времени по величине и направлению. Синусоидальный ток может быть представлен посредством действительной функции времени – синусной или косинусной, например,

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i), \quad (3.1)$$

где I_m – максимальная амплитуда тока (амплитудное значение);

ω – угловая частота, причем $\omega = 2\pi \cdot f$; $\omega = 2\pi/T$; f – частота колебаний [Гц]; T – период [С]; φ_i – начальная фаза, определяет значение тока в момент времени $t=0$, т.е.

$$i(t=0) = I_m \cdot \sin \varphi_i.$$

На рис. 3.1 приведен график двух колебаний с разными начальными фазами φ_1 и φ_2 , причем $\varphi_1 < \varphi_2$. Амплитуда гармоник проходит через нуль, когда

$$\omega t + \varphi = \pi, (n = 0, 1, 2, \dots),$$

т.е. в моменты

$$t = \frac{\pi n - \varphi}{\omega}.$$

Так как $\varphi_1 < \varphi_2$, то t_2 имеет место раньше t_1 .

Начальная фаза часто задается в градусах. Поэтому при определении мгновенного значения тока аргумент синуса (слагаемые ωt и φ) нужно привести к одной единице измерения (радиан или градус).

Иногда гармоническое колебание представляется в косинусной форме. Легко видеть, что для перехода к такой форме в (3.1) достаточно изменить лишь начальную фазу, т.е.

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) = I_m \cdot \cos\left(\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{2}\right).$$

Промышленная частота переменного тока в России и всех странах Европы равна 50 Гц, в США и Японии – 60 Гц, в авиации – 400 Гц. Снижение промышленной частоты ниже 50 Гц ухудшает качество освещения. Увеличение частоты ухудшает условия передачи электроэнергии на большие расстояния.

Выражение для синусоидального напряжения аналогично (3.1), т.е.

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_u). \quad (3.2)$$

Кроме уже названных параметров в практике электротехники часто пользуются понятиями среднего и действующего значений тока и напряжения. Рассмотрим их.

Под средним значением синусоидального тока понимают его среднее значение за половину периода:

$$I_{cp} = I_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{2}{T} I_m \left(-\frac{1}{\omega} \cdot \cos \omega \cdot \frac{T}{2} + \frac{1}{\omega} \cdot \cos \omega \cdot 0 \right) = \frac{2 \cdot I_m}{\omega \cdot T} (\cos 0 - \cos \pi) = \frac{2 \cdot I_m \cdot 2 \cdot T}{2\pi T} = \frac{2I_m}{\pi} \quad (3.3)$$

Видим, что среднее значение синусоидального тока составляет $2/\pi \approx 0,64$ от амплитудного значения. Аналогично определяется среднее значение синусоидального напряжения:

$$U_{cp} = U_0 = \frac{2U_m}{\pi}$$

Действующим называют среднее квадратичное значение синусоидального тока (напряжения) за период

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2 \omega \cdot t \cdot dt}$$

Так как

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2 \omega \cdot t \cdot dt = \frac{I_m^2}{T} \cdot \int_0^T \left[\frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \omega \cdot t)) \right] dt = \frac{I_m^2}{2 \cdot T} \cdot \left(\int_0^T t \cdot dt - \int_0^T \cos(2 \cdot \omega \cdot t) \cdot dt \right) = \frac{I_m^2}{2}$$

то

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

Видим, что действующее значение синусоидального тока составляет 0,707 от амплитудного значения. Аналогично определяется действующее значение синусоидального напряжения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Если говорят о значениях переменного тока или напряжения, то, как правило, подразумевают их действующие значения. Например, напряжение в однофазной сети переменного тока 220 В - действующее. При этом амплитудное значение $U_m \cong 310 \text{ В}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Можно ли на одной векторной диаграмме изобразить синусоидальные токи, имеющие разные частоты?
2. Что называют топографической векторной диаграммой электрической цепи? Сформулируйте правила построения векторных диаграмм.
3. Для каких действий над синусоидальным током удобно применять комплексную алгебраическую форму его представления?
4. Для каких действий над синусоидальным

5. Каким образом (в каком удобном) применять комплексную показательную форму его представления? Приведите соотношения между токами и напряжениями на R , L , и C элементах в комплексной показательной форме.
6. Каковы фазовые соотношения между током и напряжением на R , L и C элементах?
7. Что привело к необходимости ввести понятия комплексного сопротивления и комплексной проводимости R , L и C элементов электрической цепи?

Лекция 5 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Получение трехфазной системы ЭДС. Схемы соединения фаз источников и приемников. Фазные и линейные напряжения и тока. Трехпроводные и четырехпроводные цепи. Симметричный режим трехфазной цепи. Соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями. Несимметричная нагрузка, роль нейтрального провода. Мощность трехфазной цепи.

ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА Э.Д.С.

Разработка трехфазных цепей была исторически обусловлена. Необходимость в их разработке вызывалась требованиями развивающегося промышленного производства. Возможность решения этой проблемы определялась успехами в области изучения электрических и магнитных явлений, опытом практического использования уже освоенных электротехнических устройств.

В разработку трехфазных систем большой вклад сделали ученые и инженеры разных стран: Н. Тесла, М. О. Доливо-Добровольский, Ф. Хазельвандер, М. Депре, Ч. Бредли. Наибольшая заслуга среди них принадлежит выдающемуся русскому ученому М. О. Доливо-Добровольскому. Он сумел придать своим работам практический характер и создал трехфазные асинхронный двигатель, трансформатор, разработал четырехпроводную и трехпроводную электрические цепи.

При активном участии М. О. Доливо-Добровольского в 1891 г. была сооружена первая линия электропередачи. Линия имела длину 170 км, напряжение $U=15 \text{ кВ}$ и высокий, по тем временам, к. п. д. $\eta=75\%$. С этого времени началось бурное развитие электрофикации.

В современных энергетических системах генерирование и передача больших потоков энергии осуществляется трехфазными цепями (системами). Их широкое распространение объясняется, главным образом, тремя основными причинами:

- а) передача энергии на большие расстояния трехфазным током экономически более выгодна, чем переменным током с иным числом фаз;
- б) элементы трехфазной системы - трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный трансформатор весьма просты в производстве, экономичны и надежны в работе;

в) трехфазная система обладает свойством неизменности величины мгновенной мощности за период синусоидального тока в том случае, если нагрузка во всех фазах трехфазного генератора одинакова.

Под симметричной трехфазной системой Э.Д.С. понимают совокупность трех синусоидальных Э.Д.С. одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на 120° . График их мгновенных значений представлен на рис. 7.1, а векторная диаграмма - на рис. 7.2.

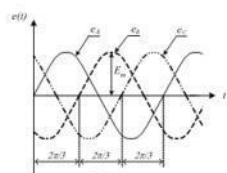
Трехфазную систему Э.Д.С. получают при помощи трехфазного генератора, в пазах статора которого размещены три электрически изолированные друг от друга обмотки - фазные обмотки генератора. Плоскости обмоток смещены в пространстве на 120° . При вращении ротора генератора в обмотках наводятся Э.Д.С., одинаковые по амплитуде, но сдвинутые по фазе на 120° .

Чтобы отличить три Э.Д.С. трехфазного генератора друг от друга, их обозначают соответствующим образом. Если одну из Э.Д.С. обозначить $e_A(t)$ или \dot{E}_A , то Э.Д.С., отстающую от нее на 120° , следует обозначить $e_B(t)$ или \dot{E}_B , а опережающую на 120° - $e_C(t)$ или \dot{E}_C . Поэтому аналитическое представление трех Э.Д.С. имеет вид:

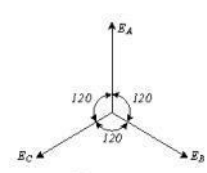
$$\begin{aligned} e_A(t) &= E_m \cdot \sin \omega t, \\ e_B(t) &= E_m \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3), \\ e_C(t) &= E_m \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3), \end{aligned}$$

а комплексное:

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= E, & \dot{E}_B &= E \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}, \\ \dot{E}_C &= E \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}}. \end{aligned}$$



Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы Э.Д.С.



Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы Э.Д.С.

На электрической схеме трехфазный генератор изображают в виде трех обмоток, расположенных друг к другу под углом 120° . При соединении «звездой» одноименные зажимы (например, концы - X, Y, Z) трех обмоток объединяются в один узел, который называют *нулевой или нейтральной точкой генератора* и обозначают буквой «O» (рисунки). Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называют *нейтральным*.

Начала обмоток генератора обозначают буквами A, B, C. Провода, соединяющие начала фаз обмоток генератора и приемника, называют *линейными*. Для соединения такого генератора с приемником, как правило, требуется четыре прово-

да. Поэтому цепь называют *трехфазной четырехпроводной*.

При соединении обмоток генератора "треугольником" конец первой обмотки генератора соединяется с началом второй, конец второй - с началом третьей, конец третьей - с началом первой (рис.7.4).

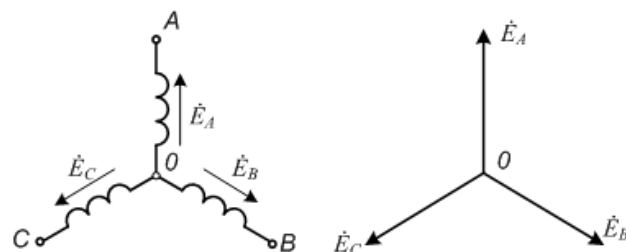


Схема соединения фаз генератора звездой и векторная диаграмма фазных Э.Д.С.

Геометрическая сумма Э.Д.С. в треугольнике, при симметрии Э.Д.С., равна нулю. Поэтому, если к зажимам A, B, C не присоединена нагрузка, то по обмоткам генератора ток протекать не будет. В случае нарушения симметрии Э.Д.С., уже при холостом ходе возникнут токи, которые вызовут нагревание обмоток и, как следствие, увеличение потерь энергии.

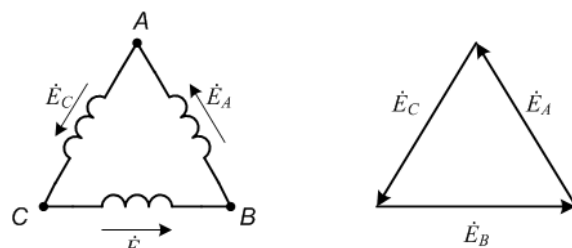


Схема соединения фаз генератора треугольником и векторная диаграмма Э.Д.С.

Для соединения такого генератора с приемником потребуется три провода, поэтому цепь называют *трехфазной трехпроводной*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем была вызвана необходимость разработки трехфазных цепей? Почему они получили широкое практическое применение?
2. Приведите условные графические обозначения симметричной системы Э.Д.С. трехфазного генератора?
3. Перечислите способы включения приемников электрической энергии в трехфазных цепях. Чем отличаются симметричные приемники от однородных, равномерных и несимметричных?
4. Назовите способы соединения трехфазных цепей. Какие способы и почему получили большее распространение?

- Перечислите токи и напряжения трехфазных четырехпроводных электрических цепей. Приведите соотношение между линейным и фазным напряжениями цепи.
- Какова роль нейтрального провода в четырехпроводной цепи? Почему в нейтральный провод не включают элементы коммутации и предохранители?
- В каких случаях можно отказаться от нейтрального провода?

Лекция 6 МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Характеристики ферромагнитных материалов. Магнитные системы и магнитные цепи. Однородные и неоднородные магнитные цепи. *Анализ и расчет* неразветвленных и разветвленных *магнитных цепей*. Особенности магнитных цепей переменного тока. Магнитные потери. Технические характеристики магнитных материалов в переменных полях. Электромагнитные реле, контакторы, магнитные пускатели, автоматические выключатели.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И СООТНОШЕНИЯ

Нагрузкой электрических цепей в общем случае являются электромагнитные устройства. Их работа основана на использовании энергии электрического и магнитного поля. К электромагнитным устройствам относятся *трансформаторы, генераторы, электродвигатели, преобразователи, электроизмерительные приборы, реле, муфты* и другие.

Чтобы понять принципы построения и работы таких устройств, усвоить методы их расчета, необходимо изучить теорию магнитного поля. В рамках курса лекций рассмотрим ее основы.

Основные физические величины, описывающие магнитное поле, известны из курса физики. К ним относятся магнитная индукция, магнитный поток, намагниченность, напряженность магнитного поля, магнитная проницаемость.

Магнитная индукция B определяется силой, испытываемой единичным зарядом Q , движущимся в магнитном поле со скоростью V :

$$\vec{B} = \vec{F} / Q\vec{V}. \quad (8.1)$$

Магнитная индукция измеряется в теслах [Тл].

Магнитный поток $\vec{\Phi}$ - это поток вектора магнитной индукции через площадь S :

$$\vec{\Phi} = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (8.2)$$

В однородном магнитном поле, перпендикулярном площади S , магнитный поток можно определить произведением скалярных величин:

$$\Phi = B \cdot S. \quad (8.3)$$

Магнитный поток измеряется в веберах [Вб]:

$$1\text{Вб} = 1\text{Тл} \cdot 1\text{м}^2.$$

Намагниченность есть магнитный момент единицы объема вещества:

$$\vec{M} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{m}}{V}, \quad (8.4)$$

где \vec{m} - вектор магнитного момента элементарного контура:

Напряженность магнитного поля H связана с магнитной индукцией B и намагниченностью M зависимостью:

$$\vec{B} = \mu_0 [\vec{H} + \vec{M}], \quad (8.5)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, причем,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

Намагниченность и напряженность магнитного поля измеряются в А/м.

Для магнитного поля в ферромагнитной среде связь между магнитной индукцией и напряженностью поля определяется выражением:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H, \quad (8.6)$$

где μ_r - относительная магнитная проницаемость.

О наличии магнитного поля судят по воздействию, которое оно оказывает на помещенные в него тела. Различают *индукционное* и *электро-механическое* воздействия.

Индукционное воздействие магнитного поля состоит в том, что при перемещении проводника в постоянном магнитном поле в проводнике наводится электродвижущая сила. Если же это поле переменное, то Э.Д.С. возникает в неподвижном проводнике. На индукционном действии магнитного поля основана работа таких электромагнитных устройств, как трансформаторы, электрические генераторы, электроизмерительные приборы и др.

Электромеханическое воздействие магнитного поля заключается в том, что на проводник с током в магнитном поле действует сила со стороны поля. На электромеханическом действии магнитного поля основана работа электрических двигателей, реле, электромагнитных муфт и др. устройств.

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

Практическим результатом теории магнитного поля является математический аппарат и методы расчета электромагнитных устройств. Любое электромагнитное устройство состоит из *намагничивающих элементов* (намагничивающих катушек, постоянных магнитов) и *магнитопровода*. Расчет заключается в определении материалов и геометрических размеров магнитопровода, тока катушки, числа ее витков и ее размеров.

Намагничивающая катушка создает магнитное поле в магнитопроводе и в окружающем пространстве. Так как μ_r ферромагнитных материалов много больше μ_0 , то основная часть ли-

ний магнитного поля проходит по магнитопроводу. Совокупность ферромагнитных тел и сред, по которым замыкается магнитный поток, называется магнитной цепью.

При анализе магнитных цепей допускаются следующие упрощения:

1. Магнитное поле изображается распределением магнитных силовых линий в магнитопроводе. Если поле равномерно распределено по сечению

магнитопровода, то его изображают параллельными линиями.

2. Магнитная индукция и напряженность считаются равномерно распределенными по объему магнитопровода.

3. Магнитный поток считается сосредоточенным только в магнитопроводе.

Магнитные цепи делятся на *однородные* и *неоднородные*, *разветвленные* и *неразветвленные*, *симметричные* и *несимметричные*.

Однородная неразветвленная магнитная цепь приведена на рис. 8.1. Это замкнутый магнитопровод с равномерной обмоткой. Каждый виток обмотки создает линии магнитной индукции, которые замыкаются по магнитопроводу. Совокупность витков создает общий магнитный поток.

На практике широко применяются неоднородные магнитные цепи. В таких цепях обмотка сосредоточена в одном месте, а магнитопровод имеет участки с различной магнитной проницаемостью μ_r (например, участок с воздушным зазором l_3 , рис. 8.5, а).

С учетом перечисленных упрощений считается, что весь магнитный поток Φ проходит по магнитопроводу. Он одинаков как в ферромагнитном материале, так и в воздушном зазоре. Площадь воздушного зазора принимается равной площади сечения ферромагнитного материала $S_3 = S_{\Phi M} = S$. Так как магнитная индукция $B = \Phi/S$, то видим, что она одинакова в любой точке магнитопровода. Однако напряженность магнитного поля H в ферромагнитном материале и в воздушном зазоре различна, поэтому такая цепь называется неоднородной.

Примерами разветвленных магнитных цепей могут служить цепи электрических машин, трансформаторов, поляризованных реле. Пример одной из таких цепей приведен на рис. 8.5, б. Магнитная цепь на рис. 8.5, б симметрична, если в ней $\Phi_1 = \Phi_2$, обе ее части справа и слева от штрих-пунктирной линии одинаковы в геометрическом отношении и изготовлены из одного материала, а $I_1 = I_2$; $\varpi_1 = \varpi_2$. Достаточно изменить один из перечисленных параметров или изменить направление одного из токов, чтобы цепь стала несимметричной.

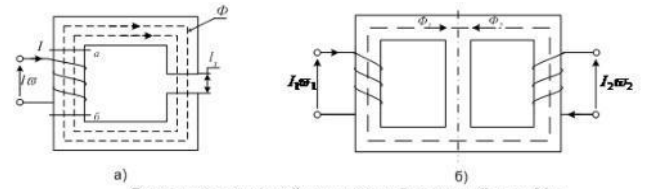


Схема неразветвленной неоднородной магнитной цепи (а) и разветвленной симметричной магнитной цепи (б)

Суть анализа магнитных цепей сводится к определению их основных параметров: магнитного потока Φ , напряженности магнитного поля H , магнитной индукции B , сечения магнитопровода S , тока катушки I и др. При этом пользуются понятиями *магнитодвижущей силы*, *закона полного тока*, *магнитного напряжения* U_M и *магнитного сопротивления* R_M .

Если по намагничивающей обмотке протекает ток I , то *магнитодвижущей силой обмотки* F называют произведение величины тока на число витков:

$$F = I \cdot \varpi. \quad (8.7)$$

Связь между магнитодвижущей силой F и напряженностью магнитного поля H устанавливает закон полного тока:

$$\oint_l H \cdot dl = \varpi \cdot I = F. \quad (8.8)$$

При анализе магнитных цепей пользуются значением средней линии магнитопровода, поэтому:

$$H \cdot l_{cp} = F. \quad (8.9)$$

Выделим в магнитопроводе рис. 8.5, а участок длиной «аб».

Произведение

$$H \cdot l_{ab} = U_{Маб} \quad (8.10)$$

называют *магнитным напряжением*.

Если магнитная цепь содержит два неоднородных участка длиной $l_{\Phi M}$ и l_3 , то

$$H_{\Phi M} \cdot l_{\Phi M} + H_3 \cdot l_3 = \varpi \cdot I$$

или:

$$U_{M\Phi} + U_{M3} = \varpi \cdot I = F. \quad (8.11)$$

Таким образом, *алгебраическая сумма магнитных напряжений на участках цепи равна магнитодвижущей силе обмотки*. Выражение (8.11) представляет собой второй закон Кирхгофа для магнитной цепи.

Аналогом первого закона Кирхгофа является теорема Гаусса: *поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю*:

$$\vec{\Phi} = \oint_S \vec{B} \cdot dS = 0. \quad (8.12)$$

Определим выражение для магнитного сопротивления. Для этого преобразуем (8.10) и

выделим множитель, определяемый только параметрами цепи:

$$U_M = H \cdot l_{cp} = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot l_{cp} = \Phi \frac{l_{cp}}{\mu_0 \mu_r \cdot S}$$

Обозначим выражение:

$$\frac{l_{cp}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} = R_M \text{ [Гн}^{-1}\text{]},$$

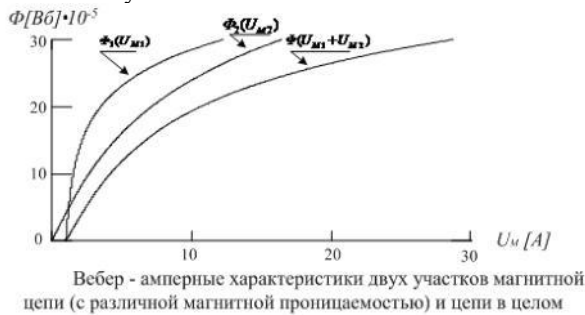
где R_M - магнитное сопротивление.

Тогда

$$U_M = \Phi \cdot R_M, \text{ [A]} \quad (8.13)$$

Равенство (8.13) представляет собой закон Ома для магнитной цепи.

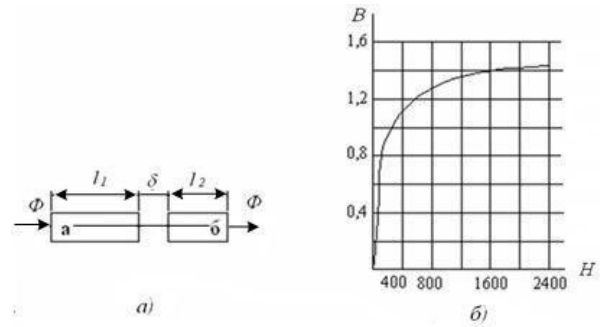
Если основной характеристикой электрической цепи является вольтамперная характеристика, то для магнитной цепи - это *вебер-амперная характеристика - зависимость магнитного потока от падения магнитного напряжения, т.е. $\Phi = f(U_M)$* , рис.3.6. Вебер-амперные характеристики часто применяют для анализа сложных магнитных цепей. Рис. 8.6 демонстрирует возможности такого применения. На нем вебер-амперная характеристика сложной магнитной цепи, состоящей из участков с различной магнитной проницаемостью μ_1 и μ_2 , построена сложением ординат вебер-амперных характеристик этих участков.



Вебер-амперные характеристики адекватны гистерезисным - $B = f(H)$, так как магнитный поток Φ прямо пропорционален магнитной индукции (8.3), а падения магнитного напряжения - напряженности магнитного поля H :

$$U_{M_{a\bar{b}}} = H \cdot l_{a\bar{b}}$$

Вебер-амперные характеристики в готовом виде не задаются. Перед расчетом магнитных цепей их надо построить с помощью кривых начальной намагниченности ферромагнитных материалов, входящих в магнитную цепь. Порядок построения вебер-амперной характеристики рассмотрим на примере магнитной цепи, приведенной на рисунке 8.7, а.



а) Схема магнитной цепи (а) и график кривой начальной намагниченности (б)

Пусть участки

$l_1 = 10 \text{ см}$ и $l_2 = 5 \text{ см}$; $S = 5 \text{ см}^2$ выполнены из ферромагнитного материала, кривая $B = f(H)$ которого приведена на рис. 8.7, б. Участок δ - воздушный зазор длиной $\delta = 0,005 \text{ см}$. Требуется построить вебер-амперную характеристику участка цепи между точками «а» и «б».

Порядок построения:

1. При построении учитываем введенные упрощения, в частности, о том, что $\Phi = const$ по всей длине магнитопровода от «а» до «б».

2. Считаем, что сечение воздушного зазора равно сечению участков l_1 и l_2 .

3. Задаемся рядом произвольных значений магнитной индукции:

$$B = : 0; 0,5; 0,8; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 \text{ Тл.}$$

По формуле $\Phi = B \cdot S$ рассчитываем соответствующие значения магнитного потока:

$$\Phi = : 0,25 \cdot 10^{-5}; 40 \cdot 10^{-5}; 50 \cdot 10^{-5}; 55 \cdot 10^{-5}; 60 \cdot 10^{-5}; 65 \cdot 10^{-5}; 70 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

4. По каждому из заданных значений B , для участков из ферромагнитного материала - l_1 и l_2 , находим H по графику рис. 8.7, б. Например, для

$$B = 0,5 \text{ Тл} \quad H_1 = H_2 = 40 \text{ (А/м).}$$

Для

$$B = 0,8 \text{ Тл} \quad H_1 = H_2 = 130 \text{ (А/м).}$$

5. Для воздушного зазора рассчитываем H_δ :

$$H_\delta = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,5}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 = 0,4 \cdot 10^6 \text{ (А/м).}$$

6. Определяем падение магнитного напряжения между точками «а» и «б» - $U_{M_{a\bar{b}}}$:

$$U_{M_{a\bar{b}}} = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_\delta \cdot \delta = 40 \cdot 0,1 + 40 \cdot 0,05 + 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 26 \text{ А.}$$

Подобные расчеты проводим для каждого из выбранных значений B . По результатам расчетов строим график $\Phi = f(U_M)$ (см. рис. 8.8).



Подводя итог рассмотренным вопросам, отметим, что магнитный поток в магнитной цепи — это аналог тока в электрической цепи. Магнитодвижущая сила — аналог ЭДС. Как и электрические цепи, магнитные цепи характеризуются магнитным сопротивлением, подчиняются законам Ома и Кирхгофа в трактовке магнитных цепей.

Вебер-амперная характеристика участка магнитной цепи является аналогом вольтамперной характеристики нелинейного элемента (НЭ) электрической цепи. Поэтому методы и приемы расчета электрических цепей с НЭ приемлемы и к расчету магнитных цепей. Одним из таких методов является метод двух узлов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите соотношения для основных физических величин магнитного поля.
2. Сформулируйте понятие относительной магнитной проницаемости. Приведите выражение для его определения.
3. Чем отличаются магнитомягкие ферромагнитные материалы от магнитотвердых материалов?
4. Что называют кривой начального намагничивания?
5. Поясните физическую сущность зависимости $B = f(H)$ при циклическом изменении H .
6. Из каких материалов конструируют магнитопроводы электромагнитных устройств и почему?
7. Приведите определение магнитной цепи. Назовите признаки однородных и неоднородных, разветвленных и неразветвленных, симметричных и несимметричных магнитных цепей.

Лекция 7 ТРАНСФОРМАТОРЫ

Назначение, устройство и принцип действия трансформатора. Применение трансформаторов. Уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмоток. Энергетические диаграммы. Нагревание и охлаждение трансформатора. Потери энергии в трансформаторах и его КПД. Внешняя характеристика трансформатора; трехфазные трансформаторы. Искажение синусоиды тока. Коэффициенты искажения.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ

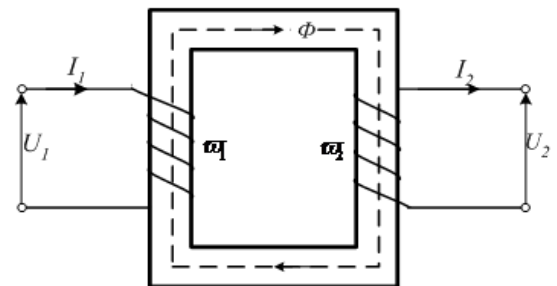
Для практических целей трансформатор впервые был применен в 1876 году П.Н. Яблочковым. Он использовался в цепи питания элект-

рических свечей. Широкое применение трансформаторы получили после того, как М.О. Доливо-Добровольским была предложена трехфазная система передачи электроэнергии и разработана конструкция первого трехфазного трансформатора (1891г.).

Под трансформатором понимают статическое (т.е. без движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины, но той же частоты.

Трансформатор состоит из двух и более обмоток, электрически изолированных друг от друга и охваченных общим магнитным потоком (рис. 10.1). Для усиления индуктивной связи между обмотками они размещаются на магнитопроводе. Передача энергии от источника к нагрузке происходит посредством переменного магнитного поля в магнитопроводе.

Магнитопроводы трансформаторов, предназначенных для работы в области низких частот, выполняют двух типов: пакетные и спиральные. Пакетные магнитопроводы состоят из тонких пластин ферромагнитного материала кольцевой, П или Ш-образной формы. Спиральные магнитопроводы изготавливают из тонкой ферромагнитной ленты в виде туго навитой часовой пружины. Пластины и отдельные витки спирали изолируют друг от друга лаком, жидким стеклом и т.п. веществами и запекают. Для уменьшения вихревых токов, магнитопроводы собирают из листовой электротехнической стали.



Упрощенная схема однофазного трансформатора

Под воздействием переменного тока в магнитопроводе возникает переменный магнитный поток $\Phi(t)$. В плоскости листа, перпендикулярной магнитному потоку, наводится Э.Д.С., которая вызывает ток, называемый вихревым. Вихревые токи по закону Ленца стремятся создать поток, встречный основному, что равноценно потерям энергии.

Потери на гистерезис и вихревые токи

$P_{Г.В.}$ пропорциональны действующему значению приложенного к индуктивности напряжения

и обратнопропорциональны сопротивлению

$R_{Г.В.}$

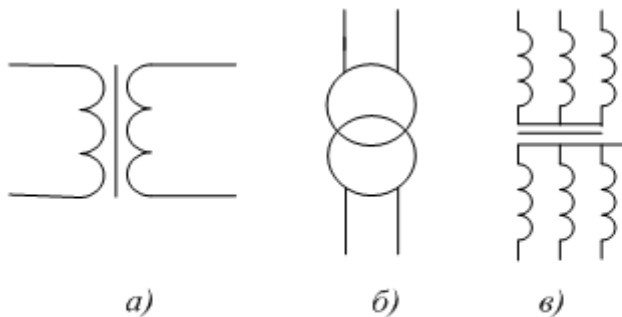
$$P_{Г.В.} = \frac{U^2}{R_{Г.В.}}$$

Для уменьшения потерь увеличивают $R_{Г.В.}$. В этих целях сердечник изготавливают из тонких листов высококачественного магнитомягкого материала. Часто потери на гистерезис и вихревые токи объединяют и называют потерями в стали – P_C .

Обмотка трансформатора, соединенная с источником питания, называется *первичной*. Все величины, относящиеся к этой обмотке: число витков, напряжение, ток и т.д., – также именуется первичными. Их буквенные обозначения снабжаются индексом 1, например, ϖ_1, U_1, I_1 (здесь применяются обозначения действующих значений тока и напряжения). Обмотка, к которой подключается нагрузка (потребитель электроэнергии) и относящиеся к ней величины, называются *вторичными*. Они снабжаются индексом 2.

Различают *однофазные* (для цепей однофазного тока) и *трехфазные* (для трехфазных цепей) трансформаторы. У трехфазного трансформатора первичной или вторичной обмоткой принято называть соответственно совокупность трех фазных обмоток одного напряжения.

Основные условные графические обозначения однофазного (а, б) и трехфазного (в, г) трансформаторов показаны на рис. 10.2.



Примеры условных графических обозначений однофазного (а, б) и трехфазного (в, г) трансформаторов

На паспортном щитке трансформатора указывается его *номинальное напряжение* – *высшее и низшее*, в соответствии с чем следует различать обмотку высшего напряжения (ВН) и обмотку низшего напряжения (НН) трансформатора. Кроме того, на щитке указывается *полная номинальная мощность* (В·А или кВ·А), *токи* (А) *при полной номинальной мощности*, *частота*, *число фаз*, *схема соединения*, *режим работы* (длительный или кратковременный) и *способ охлаждения* (воздушный или масляный).

Если первичное напряжение U_1 трансформатора меньше вторичного U_2 , то он работает как повышающий трансформатор; в противном случае ($U_1 > U_2$) – как понижающий.

Одним из основных параметров трансформаторов является *коэффициент полезного действия* (КПД) – η . Его оценивают отношением активной мощности, передаваемой в нагрузку – P_2 , к активной мощности, поступающей в первичную обмотку трансформатора – P_1 , т. е.

$$\eta = P_2/P_1.$$

Как и любое техническое устройство, трансформатор имеет потери энергии. Это *потери в стали* – P_C и *потери в проводах* – $P_{ПР}$ первичной и вторичной обмоток трансформатора. Распределение потерь наглядно демонстрирует энергетическая диаграмма рис. 10.3.



Следует подчеркнуть, что диаграмма иллюстрирует только качественную картину распределения потерь активной мощности на элементах конструкции трансформатора. Количественно потери составляют единицы процентов от общей мощности. Трансформаторы обладают очень высоким КПД, значение которого, для мощных силовых трансформаторов достигает 99%.

Трансформаторы играют важную роль в электроэнергетических системах. Они осуществляют многоступенчатую трансформацию напряжений, обеспечивая экономичную передачу электроэнергии. Число ступеней трансформации практически совпадает с сеткой номинальных напряжений: 0,22; 0,38; 0,66; 1,0; 3,0; 6,0; 10; 20; 35; 110; 150; 220; 350; 500; 750; 1050 кВ.

Трансформаторы, используемые в системах распределения электроэнергии, называются *силовыми*. Они имеют полную номинальную мощность от 10 кВ·А до 1 млн. кВ·А.

В *сварочных трансформаторах* используется возможность снизить напряжение до безопасного уровня и обеспечить гальваническую развязку рабочего места с цепью высокого напряжения.

В устройствах промышленной электроники применяют *высокочастотные и импульсные* трансформаторы, мощность которых изменяется в пределах от нескольких милливатт до 1000 В·А.

Свойства трансформаторов используются в измерительной технике. Они позволяют измерять параметры цепей высокого напряжения на стороне вторичной обмотки, имеющей низкое напряжение и хорошее заземление.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите определение трансформатора и его упрощенную схему.
2. Для чего и в каких случаях в конструкцию трансформатора входит магнитопровод?

3. Перечислите основные параметры трансформатора.
4. При каких условиях к анализу трансформатора можно применить математический аппарат линейной алгебры?
5. Как определяется коэффициент трансформации трансформатора?
6. Приведите векторные диаграммы идеализированного и реального трансформаторов. В чем их существенное отличие?
7. Какие параметры трансформатора определяют в опыте холостого хода?

Лекция 8 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Основные понятия. Виды и методы измерений. Погрешности измерений. Электромеханические приборы и измерительные преобразователи. Регистрирующие приборы прямого преобразования. Электронные аналоговые и цифровые вольтметры. Методы *электрических измерений*: измерение тока и напряжения; измерение мощности и энергии в электрических цепях. Понятие об измерении неэлектрических величин.

КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Средства измерений - это технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики. От средств измерений зависит правильное определение значения измеряемой величины. Поэтому в рамках темы 3 будут рассмотрены классификация средств измерений, применяемых в области электротехники, основные метрологические характеристики, принцип построения и работы измерительных приборов.

Многообразие средств приводит к многоступенчатой классификации. На первой ступени все средства разделяются на два класса: по функциональному назначению и по выполняемым метрологическим функциям.

По выполняемым метрологическим функциям все средства делятся на *эталонные, образцовые и рабочие* средства. *Эталонные* – это средства измерений, предназначенные для хранения, воспроизведения и передачи размеров единиц физических величин рабочим средствам. Различают первичные эталоны, эталоны-копии, эталоны сравнения и рабочие эталоны.

Первичные эталоны воспроизводят размеры единиц физических величин с наивысшей точностью, достижимой в данной области измерений. Первичные эталоны, принятые в стране в качестве исходных, называются *государственными эталонами*.

Эталонные - копии предназначены для передачи размера единиц физических величин рабочим эталонам, которые служат для поверки и калибровки образцовых и наиболее точных рабочих средств измерений.

Эталонные сравнения предназначены для взаимного сличения.

Деление средств по функциональному

назначению – это вторая ступень классификации. На этой ступени все средства делятся по пяти признакам: *меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и измерительно-вычислительные средства*.

По количеству воспроизводимых значений единиц физических величин меры разделяют *однозначные* и *многозначные*. К однозначным мерам относят измерительные катушки сопротивлений, катушки индуктивностей, измерительные конденсаторы постоянной емкости, нормальные элементы и стабилизированные источники питания. К многозначным мерам относят измерительные генераторы, калибраторы напряжения, тока и фазового сдвига, измерительные конденсаторы переменной емкости, вариометры, магазины сопротивлений, индуктивностей, емкостей.

Деление измерительных преобразователей приведено на рисунке выше. *Первичными преобразователями* называются датчики электрических сигналов. Они преобразуют значение физической величины (температуры, давления, размера и т. п.) в пропорциональное изменение параметра электрического сигнала (напряжения, тока, фазы). Такие преобразования значительно расширяют область применения электроизмерительных приборов, делая их универсальными средствами измерений

Масштабным называют измерительный преобразователь, предназначенный для изменения измеряемой величины в заданное число раз. К ним относят шунты, делители напряжения, измерительные усилители и измерительные трансформаторы.

Аналоговые преобразователи применяют для преобразования одной величины (например, мощности или напряжения) в другую (например, в частоту), более удобную для измерения. *Аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП)* преобразователи широко применяются в устройствах и системах цифровой обработки сигналов.

Измерительной установкой называют совокупность функционально и конструктивно объединенных средств измерений и вспомогательных средств для рациональной организации измерений.

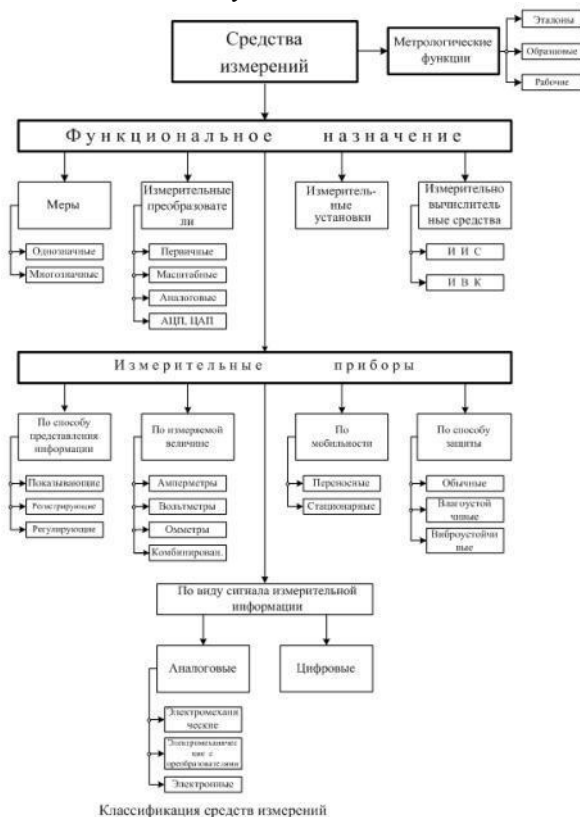
Измерительно-вычислительные (процессорные) *средства* включают в свой состав:

измерительно-информационные системы (ИИС) – совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и вспомогательных средств для получения измерительной информации;

измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) – совокупность автоматизированных средств измерений и свободно программируемой ЭВМ, которая обрабатывает результаты измерений, управляет процессом измерения и воздействует на объект.

Многообразие измерительных приборов требует ввести третью ступень классификации. Все измерительные приборы делят по пяти признакам:

- по виду сигнала измерительной информации,
- по способу представления информации,
- по измеряемой величине,
- по мобильности,
- по способу защиты.



Классификация средств измерений

Состав групп приборов, выделенных по каждому из перечисленных признаков, приведен на рис. 11.1 и не требует дополнительных пояснений. Однако необходимо отметить, что многообразие используемых в измерительных приборах сигналов измерительной информации стало причиной еще одной, четвертой ступени классификации.

На четвертой ступени все приборы разделяют на аналоговые и цифровые. Следует отметить, что класс цифровых измерительных приборов достаточно широк. Он разделяется по способу преобразования аналоговой величины в цифровой код, по измеряемой физической величине, по значению измеряемого параметра, по области применения и т. д.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные признаки классификации средств измерений.
2. Чем отличаются рабочие средства измерений от эталонов?
3. Для чего предназначены аналоговые преобразователи?
4. По каким признакам разделяются измерительные преобразователи?
5. Приведите способы выражения предела основной допускаемой погрешности.
6. Приведите условное обозначение класса точности измерительного прибора, если для его определения использован предел

относительной основной допускаемой погрешности.

Перечислите основные метрологические характеристики средств измерений.

Лекция 9 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ. Асинхронные двигатели, разновидности их, устройство и принцип действия. Уравнения электрического состояния обмоток статора и ротора. Магнитное поле машины. Электромагнитный момент. Механическая и рабочие характеристики. Энергетическая диаграмма. Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Регулирование частоты вращения и реверс. Пульсации момента, сглаживание пульсаций.

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. Области применения МПТ. Устройство и принцип действия двигателя и генератора постоянного тока. Искрение щеток на коллекторе. Способы возбуждения МПТ. Эксплуатационные характеристики генераторов постоянного тока. Общие свойства и характеристики двигателей. Способы регулирования напряжения генератора постоянного тока и скорости вращения двигателей постоянного тока. Торможение двигателей постоянного тока. Потери энергии и КПД МПТ. Временная зависимость напряжения генераторов постоянного тока. Коэффициент пульсаций.

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ. Устройство и принцип действия синхронного генератора и двигателя. Способы пуска синхронного двигателя. Уравнения электрического состояния, векторные диаграммы при изменении тока возбуждения. Работа синхронных двигателей в качестве компенсаторов реактивной мощности.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Электрические машины классифицируются по четырем признакам:

- по назначению,
- по роду тока,
- по мощности,
- в зависимости от частоты вращения.

Схема классификации приведена на рис. 15.2. Кратко рассмотрим особенности электрических машин, в зависимости от их принадлежности к признаку классификации.

По назначению электрические машины разделяют на электромашинные генераторы, электродвигатели, электромашинные преобразователи, компенсаторы, усилители и электромеханические преобразователи сигналов.

Электромашинные генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую. Их применяют на электрических станциях и в различных транспортных средствах. В ряде случаев генераторы используют в качестве источников питания в установках связи, измерительной техники, в системах автоматики.

Электрические двигатели преобразуют

электрическую энергию в механическую. Электрические двигатели приводят во вращение различные машины, механизмы и устройства. В современных системах автоматического управления их используют в качестве исполнительных, регулирующих и программирующих органов.

Электромашинные преобразователи преобразуют переменный ток в постоянный и наоборот. Они изменяют величину напряжения переменного и постоянного тока, частоту, число фаз и др. параметры.

Электромашинные компенсаторы осуществляют генерирование реактивной мощности.



Классификация электрических машин

Электромашинные усилители применяют для управления большой мощностью с помощью малой мощности, подаваемой на их обмотки управления.

Электромеханические преобразователи сигналов генерируют, преобразуют и усиливают различные сигналы. Выполняются, как правило, в виде электрических микромашин. Применяются в системах автоматического регулирования, измерительных и решающих устройствах в качестве датчиков, дифференцирующих и интегрирующих элементов, сравнивающих и регулирующих органов.

По роду тока электрические машины делят на машины переменного и постоянного тока.

Машины переменного тока, в зависимости от особенностей электромагнитной системы, подразделяют на асинхронные, синхронные и коллекторные. К ним относятся также трансформаторы, у которых процесс преобразования энергии во многом подобен электрическим машинам.

Асинхронные машины используют в качестве электрических двигателей трехфазного тока. Простота устройства и высокая надежность позволяют применять их в различных отраслях техники. В системах автоматического регулирования используют одно и двухфазные асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы, преобразующие механическое вращение в электрический сигнал, а также сельсины, осуществляющие синхрон-

ный поворот или вращение нескольких, не связанных друг с другом механических осей.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты на электрических станциях, а также в качестве генераторов повышенной частоты в автономных источниках питания (на кораблях, самолетах и т. п.). В качестве электродвигателей синхронные машины применяют в электрических приводах большой мощности. Синхронные машины малой мощности широко применяют в устройствах автоматики.

Коллекторные машины переменного тока применяют сравнительно редко и главным образом в качестве электродвигателей. Коллекторные машины имеют асинхронное вращение ротора относительно поля, но ввиду наличия у них коллектора они выделяются в отдельный вид. Они имеют сложную конструкцию и требуют тщательного ухода, поэтому используются сравнительно редко, в основном в устройствах автоматики и электробытовых приборах.

Машины постоянного тока применяют в качестве генераторов и электродвигателей в устройствах электропривода, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах. В системах автоматического регулирования машины постоянного тока используются в качестве электромашинных усилителей, исполнительных двигателей и тахогенераторов.

По мощности электрические машины условно разделяют на микромашины (мощностью от долей ватта до 500 ватт), машины малой (от 0,5 до 10 кВт), средней (от 10 до нескольких сотен киловатт) и большой (свыше нескольких сотен киловатт) мощности.

В зависимости от частоты вращения машины условно разделяют на тихоходные (до 300 об/мин), средней быстроходности (300 ÷ 1500 об/мин), быстроходные (1500 ÷ 6000 об/мин) и сверхбыстроходные (свыше 6000 об/мин).

ПРИНЦИП РАБОТЫ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока широко применяются в качестве двигателей и меньше в качестве генераторов. Это объясняется тем, что двигатели постоянного тока допускают плавное регулирование частоты вращения простыми способами и, при равных токах, имеют больший вращающий момент, чем другие двигатели. Поэтому их используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте.

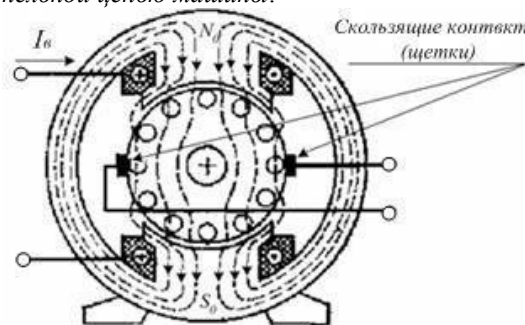
Генераторы и двигатели постоянного тока взаимно заменяемые. Однако применение генераторов ограничено. Их используют в промышленности (для питания электролитических ванн, для зарядки аккумуляторов, в прокатных станах), а также в составе электрооборудования подвижных средств (автомобильных, судовых, самолетных).

Как правило, машины постоянного тока – коллекторные. Поэтому их работа может сопровождать-

ся возникновением дуги или множества мелких электрических разрядов. Такое явление называют *круговым огнем*. Искрение снижает надежность машин постоянного тока, требует дополнительных затрат на обслуживание, усложнения конструкции.

Конструкция машины.

Магнитная система двухполюсной машины постоянного тока приведена на рис 16.1. Как и на рис. 15.3, здесь обмотка возбуждения размещена на статоре, а рабочая обмотка — на роторе. Обмотка возбуждения состоит из двух последовательно соединенных катушек, каждая из которых размещается на своем полюсе. Катушки образуют цепь возбуждения, которая называется *вспомогательной цепью машины*.



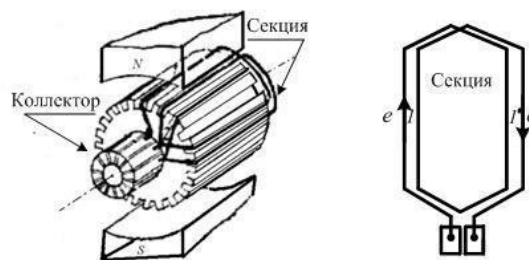
Магнитное поле двухполюсной машины

На рис. 16.1 силовыми линиями изображено магнитное поле возбуждения. Магнитная система и поле машины симметричны относительно продольных осей полюсов $N_0 - S_0$. Линия, проходящая посередине между смежными полюсами, называется *геометрической нейтралью*.

Ротор с рабочей обмоткой в машинах постоянного тока называют *якорем*. Для равномерного распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между полюсами и якорем используются *полюсные наконечники*. Обмотка якоря состоит из уложенных в пазах ротора активных проводников.

С помощью лобовых частей активные проводники соединяются в витки так, что обмотка образует замкнутый контур. Стороны витков расположены под разноименными полюсами так, что Э.Д.С. в них складываются. В реальных обмотках якоря число активных проводников большое. Обозначим это число N , тогда число витков равно $N/2$.

Для улучшения формы Э.Д.С. и для ее увеличения соседние витки объединяются в секции, как показано на рис.16.2, по a витков в секции. Так как якорь вращается, то соединение его обмотки (секций) с внешней цепью осуществляется *скользящим контактом*, с помощью неподвижных электрографических *щеток*. Цепь якоря называют *главной цепью машины*.



Пример укладки проводников и схема секции обмотки якоря

В реальных машинах выводы каждой секции соединяются с пластинами коллектора. Коллектор якоря имеет несколько десятков пластин (в общем случае $N/2a$). Поэтому щетки скользят по пластинам коллектора. Устанавливают их так, чтобы касание осуществлялось в точках, расположенных на линии геометрической нейтрали (рис.16.3).

При таком размещении обмотка якоря представляет собой замкнутый контур. Это хорошо видно по рис. 16.3, *а*. Щетками этот контур делится на две равные части так, что под каждым из полюсов находится равное число активных проводников.

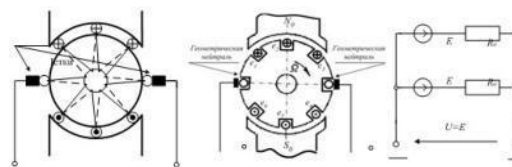


Схема (а), размещение простейшей обмотки якоря (б) и схема замещения обмотки (в)

При вращении ротора в каждой группе проводников будут наводиться одинаково направленные Э.Д.С., сумма которых максимальна и постоянна. Схема замещения обмотки якоря приведена на рис. *в*. Эквивалентное сопротивление параллельно соединенных ветвей обмотки R_a называют внутренним сопротивлением якоря и обозначают $R_{я}$. Обычно оно не превышает единиц *Ом*.

Работа машины в режиме генератора.

Чтобы машина постоянного тока работала как генератор, ее якорь необходимо вращать с помощью какого-либо приводного двигателя. В этом случае в активных проводниках якоря возникают Э.Д.С., направление которых можно определить по правилу правой руки. Значение Э.Д.С. в каждом из активных проводников определено выражением (15.2), которое имеет вид:

$$E = l \cdot v_{отн} \cdot B_{\delta}$$

где B_{δ} — действующее значение магнитной индукции в зазоре.

Если общее число проводников якоря равно N , а число параллельных ветвей $2a$, то каждая ветвь содержит $N/2a$ проводников. Тогда

$$E = l \cdot v_{отн} \cdot \sum_{i=1}^{N/2a} B_{\delta} \quad (16.1)$$

В (16.1) линейная скорость движения

проводника определяется выражением:

$$v_{отн} = \frac{D}{2} \cdot \Omega, \quad (16.2)$$

где Ω – угловая скорость якоря.

Выразим сумму $\sum_{i=1}^{N/2a} B_{\delta}$ через среднее

значение магнитной индукции B_{cp} на полюсном делении τ :

$$\sum_{i=1}^{N/2a} B_{\delta} = \frac{N}{2a} \cdot B_{cp}, \quad (16.3)$$

где $B_{cp} = \frac{\Phi}{\tau \cdot l}$ – среднее значение магнитной

индукции; $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$ – полюсное деление.

Подставив (16.2) и (16.3) в (16.1), получим:

$$E = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot \Omega. \quad (16.4)$$

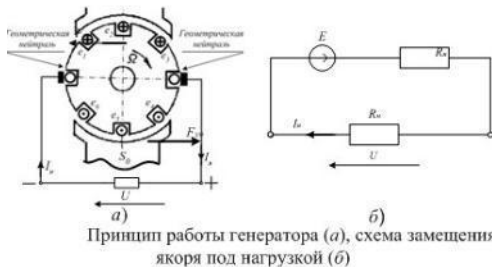
Обозначим первый множитель в (16.4) индексом c . Учтем, что $n = 60 \cdot \Omega / 2 \cdot \pi$ об/мин.

Введем обозначение $c_E = p \cdot N / 60 \cdot a$. Тогда выражение (16.4) приходит к виду:

$$E = c_E \cdot n \cdot \Phi. \quad (16.5)$$

Теперь очевидно, что Э.Д.С. якоря пропорциональна частоте его вращения и магнитному потоку полюсов.

Если к зажимам якоря подключить приемник (рис.16.4, а), то Э.Д.С. якоря вызовет в цепи ток. Но на проводники с током, пересекающие магнитное поле, действует сила со стороны магнитного поля (электромагнитная сила).



Токи в проводниках якоря направлены так же, как и вызвавшие их Э.Д.С. Электромагнитные силы создают момент, противодействующий вращению якоря. Если скорость вращения якоря Ω постоянна, то вращающий момент приводного двигателя равен противодействующему электромагнитному моменту генератора:

$$M_{вр} = M_{пр} = M.$$

Таким образом, для производства электроэнергии машинами постоянного тока необходимо затрачивать механическую энергию.

Схема замещения генератора (рис. 16.4, б) позволяет записать равенство:

$$E = U + R_{я} \cdot I_{я} \quad (16.6)$$

Умножим это выражение на $I_{я}$

$$E \cdot I_{я} = U \cdot I_{я} + R_{я} \cdot I_{я}^2. \quad (16.7)$$

Первое слагаемое правой части (16.7) представляет мощность приемника, второе – мощность электрических потерь в обмотке якоря. Левая часть (16.7) представляет электромагнитную мощность, развиваемую генератором и равную механической мощности приводного двигателя.

Работа машины в режиме электродвигателя.

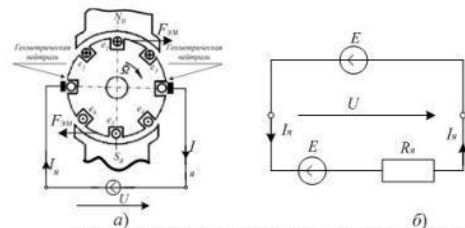
Чтобы машина постоянного тока работала как двигатель, необходимо подать напряжение от источника постоянного тока на обмотку якоря, как показано на рис. 16. 5. В обмотке якоря возникнет ток $I_{я}$. В результате взаимодействия тока $I_{я}$ с полем возбуждения появятся электромагнитные силы, создающие электромагнитный момент. Под действием этого момента якорь приходит во вращение. Машина работает в качестве электродвигателя.

Если скорость вращения ротора Ω постоянна, то вращающий момент равен противодействующему моменту на валу двигателя:

$$M_{вр} = M_{пр} = M.$$

В активных проводниках якоря, пересекающих магнитное поле возбуждения, наводится противо – Э.Д.С. Ее направление противоположно направлению тока якоря. Схема замещения якоря приведена на рис. 16.5. Она представляет замкнутый контур, для которого справедлив второй закон Кирхгофа. Поэтому можем записать:

$$U = E + I_{я} \cdot R_{я}. \quad (16.8)$$



Отсюда определим ток якоря двигателя:

$$I_{я} = (U - E) / R_{я}. \quad (16.9)$$

Уравнение баланса мощности цепи якоря имеет вид:

$$U \cdot I_{я} = E \cdot I_{я} + R_{я} \cdot I_{я}^2. \quad (16.10)$$

Выражение (16.10) показывает, что электрическая мощность $P_{эл} = U \cdot I_{я}$, подводимая к двигателю от внешнего источника, превращается в электромагнитную мощность $P_{эм} = E \cdot I_{я}$ и мощность потерь в обмотке якоря. Электромагнитная мощность равна механической мощности, развиваемой двигателем:

$$E \cdot I_{я} = P_{эл} = M \cdot \Omega. \quad (16.11)$$

Электромагнитный момент для двигателя и для генератора одинаков и определяется как момент машины постоянного тока. Для его определения обратимся к выражению (15.6), которое имеет вид:

$$F_{cp} = l \cdot B_{\delta} \cdot I_a$$

В поле одного полюса находится $N/2a$ проводников якоря с одинаковым током параллельной ветви $I_a = I_{я}/2a$. Все силы одинаково направлены по касательной к окружности якоря. Используя те же обозначения, что и при выводе формулы Э.Д.С. E , выразим момент сил, действующих на проводники одной ветви:

$$M_1 = \frac{D}{2} \cdot \sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta} \cdot I_a \cdot l = \frac{D \cdot l \cdot I_{я}}{4 \cdot a} B_{cp} \cdot \frac{N}{2 \cdot p} = \frac{N}{4 \cdot \pi \cdot a} \cdot I_{я} \cdot \Phi. \quad (16.12)$$

Общий момент машины в $2p$ раз больше M_1 :

$$M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot I_{я} \cdot \Phi. \quad (16.13)$$

Проведенный анализ показал, что физические процессы, происходящие в генераторах и двигателях постоянного тока и определяющие преобразование энергии, одинаковы. Это объясняет их взаимозаменяемость. Однако, как генераторы, так и двигатели постоянного тока имеют специфические параметры, характеристики и особенности эксплуатации. Кратко рассмотрим эти особенности в следующих вопросах лекции.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Из общего перечня электрических машин переменного тока (рис. 15.2) большее распространение нашли асинхронные и синхронные машины. Несмотря на различия в устройстве, эти машины имеют много общего в принципе работы. Их принцип действия основан на использовании двух явлений: на явлении искусственно созданного вращающегося магнитного поля и на воздействии этого поля на проводники с токами.

Асинхронные машины используют, в ос-

новном, как двигатели. Трехфазные асинхронные двигатели находят самое широкое применение в различных областях народного хозяйства. Их широкое распространение обусловлено простотой конструкции и надежностью в работе. Недостатком асинхронных машин является относительная сложность регулирования их эксплуатационных характеристик.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов и двигателей. Синхронные генераторы служат основным источником электрической энергии. Мощность современных синхронных генераторов, применяемых на электростанциях, достигает 1200 MВт и более.

Синхронные двигатели обычно применяют в приводах большой мощности, до нескольких десятков MВт . Двигатели малой мощности используют в устройствах, где требуется строгое постоянство скорости вращения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите упрощенную структурную схему электропривода. Определите назначение ее функциональных узлов.
2. Перечислите основные группы электропривода. Назовите их отличительные особенности.
3. Назовите основные признаки классификации электрических машин.
4. Приведите деление электрических машин по назначению. Определите область применения каждого из классов электрических машин.
5. Приведите признаки деления электрических машин по роду тока. Определите область применения каждого из классов электрических машин.
6. Какой вид взаимодействия магнитного поля и проводника с током положен в основу работы электрических машин?
7. В чем отличие процесса формирования Э.Д.С. в электрических машинах и в трансформаторах? Существуют ли общие признаки процесса?

Ильмас Рифкатович Салахутдинов
Сергей Алексеевич Сутягин
Антон Алексеевич Хохлов
Алексей Леонидович Хохлов

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА:

краткий курс лекций

для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» - Димитровград: Технологический институт – филиал УлГАУ, 2019.- 20 с.