

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 15.06.2024 10:59:14

Уникальный программный ключ:

9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»

(ЮЗГУ)

Кафедра электроснабжения



## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов,  
изучающих теоретические основы электротехники

Курск 2023



**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ» .....	4
1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ЗАКОНЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ .....	6
2 ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА .....	11
3 ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННЫЕ ЦЕПИ .....	14
4 ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ .....	15
5 ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА .....	16
6 ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИ- СТИКИ .....	18
7 ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ .....	21
8 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ .....	23
9 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ .....	24
10 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ .....	27
11 МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ .....	28
12 ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ .....	32
13 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ .....	34
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	40

## **ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»**

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» изучается студентами технических специальностей и направлений подготовки бакалавров, в первую очередь студентами направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. В зависимости от требований федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования и с учетом утвержденных учебных планов по тем или иным специальностям и направлениям подготовки бакалавров отличается объем изучаемой дисциплины и её содержание (перечень разделов и тем), причем весьма существенно. Также для студентов ряда технических специальностей и направлений подготовки бакалавров в состав изучаемой ими дисциплины «Электротехника» входят разделы, классически относящиеся к теоретическим основам электротехники (разделы, относящиеся к электрическим и магнитным цепям).

Цель данной работы – дать студенту основные понятия, термины и определения, которые должны послужить базой и своеобразными вехами при изучении основных разделов, входящих в дисциплину «Теоретические основы электротехники».

При самостоятельной работе по изучению дисциплины «Теоретические основы электротехники» студент должен твердо помнить, что знания не приобретаются ради знаний. Для изучения данной дисциплины нужны знания и компетенции, полученные и освоенные при изучении физики (в первую очередь разделы электричества и магнетизма) и высшей математики (дифференциальное и интегральное исчисление, функции комплексного переменного и другие разделы). Даже знания и компетенции, полученные и освоенные при изучении дисциплины «Инженерная и компьютерная графика» пригодятся, ведь электрические схемы и схемы замещения электротехнических устройств необходимо уметь «читать» и чертить! В свою очередь знания и компетенции, полученные и освоенные при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники» необходимы будут студенту при изучении последующих профилирующих дисциплин, а также в последующей профессиональной деятельности.

Данное методическое пособие построено следующим образом: основные понятия, термины и определения распределены по разделам. Разделы приведены в том порядке, в каком они представлены в большинстве учебников по теоретическим основам электротехники. Поня-

тия, термины и определения внутри разделов приведены не в алфавитном порядке, а в той последовательности, в которой они, как правило, встречаются при изучении соответствующего раздела учебника. Это должно облегчить студенту изучение материала по учебнику: прочитал определение соответствующего термина, а затем нашел его в учебнике. Или наоборот: встретил в учебнике термин и нашел его объяснение в данном методическом пособии. Рекомендуется следующий порядок использования данного методического пособия: вначале ознакомиться с основными понятиями, терминами и определениями соответствующего раздела данного пособия, а затем приступить к изучению аналогичного раздела учебника или учебного пособия или соответствующего методического указания к лабораторной работе.

Ряд приведенных терминов и определений могут оказаться знакомыми студентам, так как были изучены в курсе физики. При этом одни и те же понятия могут иметь отличное определение, что объясняется тем, что электротехника – это наука о практическом использовании электромагнитных явлений, в то время как физика изучает эти явления с теоретической точки зрения.

Следует обратить внимание, что название ряда разделов данного методического пособия может отличаться от названий, приведенных в разных учебниках или в рабочих программах дисциплин, соответствующих классической дисциплине «Теоретические основы электротехники».

В библиографическом списке, приведенном в конце данного методического пособия, приведены далеко не все учебники и учебные пособия, которыми можно воспользоваться при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники». Студент вправе сам выбрать себе учебник из числа тех, что рекомендует преподаватель или есть в наличии в библиотеке. Рекомендуется пользоваться одним учебником, но когда какой-либо вопрос изложен в нем недостаточно ясно или вообще не нашел отражения, использовать другой учебник или учебное пособие.

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ЗАКОНЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Электрическое поле – одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и её скорости.

Электрическая цепь – совокупность генерирующих, приемных и вспомогательных устройств, соединенных между собой проводами.

Генерирующее устройство (источник электрической энергии) преобразует в электрическую энергию другие виды энергии. Является источником электродвижущей силы (ЭДС). ЭДС характеризует энергию, которую заряды получают от источника, т.е. от сторонних сил.

Источник ЭДС (источник напряжения) – источник электрической энергии, напряжение на выходе которого не зависит от нагрузки (идеальный источник ЭДС) или незначительно снижается при увеличении нагрузки (реальный источник ЭДС). Основным параметром источника ЭДС является его электродвижущая сила  $E$ , которую можно определить как работу сторонних (неэлектрических) сил, присущих источнику, затрачиваемую на перемещение единицы положительного заряда внутри источника от зажима с меньшим потенциалом к зажиму с большим потенциалом.

Источник тока – источник электрической энергии, ток на выходе которого не зависит от нагрузки (идеальный источник тока) или незначительно снижается при увеличении нагрузки (реальный источник тока).

Приемное устройство (потребитель, приемник, нагрузка) преобразует электрическую энергию в другие виды энергии. Однако в цепи переменного тока к приемным устройствам относят индуктивные катушки и конденсаторы, в которых происходит изменение энергии соответственно магнитного поля и электрического поля, при этом преобразование электрической энергии в другие виды энергии может отсутствовать.

Вспомогательные устройства – элементы электрической цепи (измерительные устройства, коммутационная аппаратура и т.д.), без которых электрическая цепь может выполнять свои основные функции по передаче электроэнергии от источника к потребителю. Данные устройства способствуют этому, а также распределению электроэнергии между потребителями и служат для контроля режимов работы электрической цепи и её отдельных элементов.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) – зависимость напряжения на элементе (на входе электрической цепи) от тока в нём. Является основной характеристикой элементов электрической цепи.

Пассивные приемники – элементы электрической цепи, в которых не возникает ЭДС, а их ВАХ проходят через начало координат.

Линейный элемент – пассивный элемент, у которого линейная зависимость напряжения от тока, а ВАХ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат. Параметры линейного элемента не зависят ни от величины протекающего тока, ни от величины приложенного напряжения, ни от времени.

Нелинейный элемент – пассивный элемент, у которого нелинейная зависимость напряжения от тока, а ВАХ представляет собой кривую линию, проходящую через начало координат.

Линейная цепь – электрическая цепь, состоящая из линейных элементов.

Нелинейная цепь – электрическая цепь, в которую входит хотя бы один нелинейный элемент.

Цепи постоянного тока – электрические цепи, в которых основные процессы передачи и преобразования энергии происходят при неизменных во времени токах и напряжениях.

Электрический ток – направленное движение электрических зарядов. Носителями электрических зарядов в твердых проводниках являются электроны, в жидких проводниках – ионы, в полупроводниках – электроны и «дырки». Единица измерения – ампер (А).

Плотность тока – физическая величина, характеризующая распределение электрического тока по сечению проводника, через который он протекает. Единица измерения –  $\text{А/м}^2$ .

Потенциал – напряжение, существующее между двумя произвольно выбранными точками. При определении потенциала какой-либо точки в качестве второй (базовой) точки часто принимается потенциал земли, приравненный к нулю. При определении потенциалов в электрической цепи (в схеме) нередко выбирают одну из точек, потенциал которой приравнивается к нулю.

Напряжение  $U$  – скалярная величина, равная линейному интегралу напряженности электрического поля, единица измерения – вольт (В). Напряжение характеризует затраты энергии, необходимые для перемещения электрического заряда из одной точки электрического поля в другую. Напряжение на участке электрической цепи характеризует энергию, которую движущиеся заряды отдают на этом участке. Это

напряжение еще иначе называют падением напряжения на участке. 1 вольт означает, что каждый кулон заряда получает в случае ЭДС или отдает в случае напряжения 1 джоуль энергии.

Падение напряжения – значение напряжения на участке цепи, по которому протекает электрический ток. Знак (направление) падения напряжения совпадает со знаком (направлением) тока в электрической цепи.

Полупроводник – вещество, основным свойством которого является зависимость его электропроводности от воздействия внешних факторов: температуры, электрического поля, света и т.д.

Изолятор – твердое, жидкое или газообразное вещество, не содержащее свободных носителей зарядов или содержащее незначительное их количество и оказывающее по этой причине большое сопротивление прохождению электрического тока. В группу изоляторов входят также диэлектрики.

Резистор – элемент электрической цепи, предназначенный для использования его электрического сопротивления.

Электрическое сопротивление  $R$  – скалярная величина, равная отношению постоянного напряжения на участке пассивной электрической цепи к постоянному току в нем при отсутствии на данном участке ЭДС. Единица измерения – Ом. Например, сопротивление проводника длиной  $l$  и площадью сечения  $S$  определяется по формуле:  $R = \rho l / S$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника.

Параметр сопротивления  $R$  характеризует свойство элемента поглощать энергию из электрической цепи и преобразовывать её в другие виды энергии. Известно, что мощность преобразования электрической энергии  $P$  пропорциональна квадрату тока, поэтому величина этого параметра определяется отношением  $R = P / I^2$ .

Индуктивность  $L$  – физическая величина, характеризующая способность катушки с током запасать магнитную энергию. Единица измерения – генри (Гн). Свойство элемента цепи создавать собственное магнитное поле (поле самоиндукции), когда в нём имеется электрический ток, характеризуют параметром индуктивности  $L$ . Параметр индуктивности является коэффициентом пропорциональности между током  $I$  и потокосцеплением  $\Psi$  данного устройства:  $\Psi = LI$ . Его называют также коэффициентом самоиндукции. Вебер-амперная характеристика элемента даёт возможность судить об изменении его параметра индуктивности в зависимости от тока (вебер – единица измерения магнитного потока и потокосцепления).

Емкость  $C$  – физическая величина, характеризующая способность конденсатора запасать электрическую энергию. Единица измерения – фарада (Ф). Емкостной параметр  $C$  характеризует свойство элемента накапливать заряды или возбуждать ими электрическое поле. Этот параметр является коэффициентом пропорциональности между напряжением  $U$  и зарядом  $q$  элемента:  $q=CU$ . О величине ёмкостного параметра при разных напряжениях можно судить по кулон-вольтной характеристике элемента (кулон – единица измерения заряда).

Ампер (А) – единица измерения силы электрического тока, названная в честь французского физика Андре Мари Ампера (1775-1836 гг.).

Ватт (Вт) – единица измерения электрической мощности, названная в честь английского инженера Джеймса Ватта (или Уатта – James Watt, 1736-1819 гг.).

Вольт – единица измерения электрического напряжения (В), названная в честь итальянского физика Александра Волта (1745-1827 гг.).

Ом (Ом) – единица измерения сопротивления участка электрической цепи, названная в честь немецкого физика Георга Симона Ома (1787-1854 гг.).

Сименс (См) – единица измерения проводимости, названная в честь немецкого инженера Вернера Сименса (1816-1892 гг.).

Электрическая схема (схема соединения цепи) – графическое изображение цепи с помощью условных обозначений ее элементов.

Схема замещения цепи – графическое изображение цепи с помощью идеальных элементов, каждый из которых выполняет какую-нибудь одну функцию.

Ветвь – участок электрической цепи, состоящий из последовательно включенных источников и приемников при одном и том же протекающем через них токе.

Узел – место соединения трех и более ветвей.

Контур – часть электрической цепи, состоящая из двух и более ветвей, через которые можно провести замкнутый путь.

Двухполюсник – часть электрической цепи с двумя выделенными зажимами – полюсами (выводами). В виде двухполюсника можно представить источники ЭДС и тока и многие потребители энергии, в том числе все резистивные, индуктивные и емкостные элементы. Если в электрической схеме провести сечение, то она разделится на два двухполюсника.

Четырехполюсник – часть электрической цепи, имеющая две пары внешних зажимов (выводов), которые могут быть входными или выходными. В виде четырехполюсника можно представить многие электротехнические и электронные устройства: линии передачи и связи, трансформаторы, фильтры, транзисторы, выпрямители и т.д.

Многополюсник – это часть электрической цепи, имеющая более двух выделенных выводов. Многополюсник – это обобщающее понятие для многих схем и устройств, поэтому в частных случаях проще представлять их в виде двухполюсника или четырехполюсника. Двухполюсник, четырехполюсник или многополюсник называется активным, если он содержит источник ЭДС или источник тока. В противном случае это будет пассивный двухполюсник, четырехполюсник или многополюсник. Понятия «активный» или «пассивный» используют также для ветвей электрической цепи (схемы).

Режим холостого хода (ХХ) – это режим, когда к внешним выводам источника (активного двухполюсника) не подключена нагрузка. При этом  $I = 0$ ,  $U = E$ .

Режим короткого замыкания (КЗ) – это режим, возникающий при соединении между собой внешних выводов источника (активного двухполюсника). При этом  $R = 0$ ,  $I_{КЗ} = E / R_g = \max$ , где  $R_g$  – внутреннее сопротивление источника ЭДС. Для источников электроэнергии, как правило, это аварийный режим (для источников ЭДС, источников напряжения).

Номинальный режим – это режим, при котором устройство (электрическая цепь) работает в режиме, на который оно рассчитано изготовителем, и со значениями электрических величин, равными паспортным (номинальным) значениям.

Согласованный режим – это режим, при котором мощность, отдаваемая источником или потребляемая приемником, достигает максимального значения. Это возможно, если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника ЭДС, источника напряжения или электрической цепи, к которой подключена нагрузка.

Закон Ома – один из основных законов электрических цепей, согласно которому ток прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению. Это формулировка закона Ома для участка цепи:  $I = U/R = UG$ , где  $G$  – проводимость.

Для замкнутой цепи, состоящей, например, из источника ЭДС и нагрузки  $R$  закон Ома имеет вид:  $I = E / (R + R_g)$ , где  $R_g$  – внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Первый закон Кирхгофа – один из основных законов электрических цепей, согласно которому сумма токов, входящих в узел, равна сумме токов, выходящих из этого узла. Назван в честь автора – немецкого физика Густава Роберта Кирхгофа (1824-1887 гг.). Первый закон Кирхгофа применяется к узлам, является следствием закона сохранения заряда. Другая формулировка первого закона Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю, т.е.  $\sum I = 0$ .

Второй закон Кирхгофа – один из основных законов электрических цепей, согласно которому алгебраическая сумма падений напряжений на всех элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в данный контур, т.е.:  $\sum RI = \sum E$ .

В этом уравнении положительные знаки применяются для токов и ЭДС, положительные направления которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода рассматриваемого контура. Второй закон Кирхгофа применяется к замкнутым контурам, является следствием закона сохранения энергии.

В свое время было разработано достаточно много методов расчета электрических цепей. К основным можно отнести следующие методы:

- 1) метод непосредственного использования законов Кирхгофа;
- 2) метод контурных токов;
- 3) метод узловых потенциалов;
- 4) метод эквивалентных преобразований (метод эквивалентного сопротивления или метод свертки);
- 5) метод наложения;
- 6) метод двух узлов;
- 7) метод эквивалентного генератора.

## 2 ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Переменными называют ЭДС, напряжения и токи, которые периодически изменяются во времени.

Значения тока, напряжения или ЭДС в любой момент времени называют мгновенными и обозначаются малыми буквами:  $i$ ,  $u$ ,  $e$ .

Период  $T$  – наименьший интервал времени между двумя одинаковыми, неравными нулю, значениями переменной электрической величины: ЭДС, напряжения, тока.

Частота  $f$  – физическая величина, определяющее количество колебаний в единицу времени переменной электрической величины.

Частота  $f$  – число периодов в секунду:  $f = 1/T$ . Единица измерения – герц (Гц), названная в честь немецкого физика 19 века Генриха Герца.

Амплитудные значения (амплитуды) – наибольшие значения мгновенных электрических величин:  $I_m, U_m, E_m$ .

Действующее значение – среднеквадратичное значение изменяющейся во времени электрической величины, например, переменного тока, действие которого при протекании через некоторое сопротивление идентично действию постоянного тока, значение которого равно данному действующему значению.

Векторная диаграмма – совокупность векторов на плоскости, каждый из которых отображает при  $t=0$  изменяющуюся по синусоидальному закону электрическую величину: ток, напряжение, ЭДС. Длина вектора – амплитудное или действующее значение электрической величины. Угол, под которым строится вектор по отношению к горизонтальной оси – начальная фаза электрической величины.

Активное сопротивление  $R$  – сопротивление резистивного элемента в цепи переменного тока. Активное сопротивление – параметр электрической цепи или её схемы, равный отношению активной мощности пассивной электрической цепи к квадрату действующего значения тока на входе этой цепи. Активное сопротивление характеризует процесс преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Активное сопротивление зависит от частоты тока и всегда больше сопротивления резистивного элемента в цепи постоянного тока: чем выше частота, тем больше активное сопротивление. Объясняется это тем, что с ростом частоты ток вытесняется во внешние слои проводника, т.е. площадь слоя, где протекает ток, уменьшается, а значит сопротивление увеличивается. Это особенно проявляется при высоких частотах. Однако на практике при частоте 50 Гц сопротивления проводника постоянному и переменному току считают равными.

Индуктивное сопротивление  $X_L$  – реактивное сопротивление, обусловленное индуктивностью цепи и равное произведению этой индуктивности и угловой частоты:  $X_L = \omega L$ .

Емкостное сопротивление  $X_C$  – реактивное сопротивление, обусловленное емкостью цепи и равное величине, обратной произведению этой емкости и угловой частоты:  $X_C = 1 / \omega C$ .

Активная мощность  $P$  – мощность электрической цепи переменного тока, преобразуемая в другой вид энергии (не электрической). Единица измерения – ватт (Вт). Активная мощность равна среднему

значению мощности электрической цепи за период:  $P = UI \cos \varphi$ , где  $\cos \varphi$  называется коэффициентом мощности.

Реактивная мощность  $Q$  характеризует ту часть электрической энергии, которая запасается в магнитном поле индуктивной катушки или в электрическом поле конденсатора без преобразования в другие виды энергии:  $Q = UI \sin \varphi$ . Единица измерения – ВАр (вольт-ампер реактивный).

Полная мощность  $S$  – мощность, потребляемая нагрузкой переменного тока, составленной из активного и реактивного (индуктивного, емкостного) сопротивлений. Полная мощность включает в себя активную и реактивную мощности и равна:  $S = UI$ . Полная мощность характеризует способность элементов электрической цепи пропускать электрическую энергию. Единица измерения – ВА (вольт-ампер).

Коэффициент мощности  $\lambda$  – величина, равная отношению активной мощности электрической цепи переменного тока к полной мощности этой цепи:  $\lambda = P / S$ . Для цепи синусоидального тока  $\lambda = \cos \varphi$ , где  $\varphi$  – угол сдвига фаз тока и напряжения в цепи.

Полное электрическое сопротивление  $Z$  – параметр электрической цепи или её схемы, равный отношению действующего значения напряжения на зажимах пассивной электрической цепи к действующему значению тока на входе этой цепи при синусоидальных напряжении и токе. Единица измерения – Ом. Для цепи с последовательным соединением активного, индуктивного и емкостного сопротивлений:

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

Полный ток – ток, потребляемый нагрузкой переменного тока, составленной из разнородных сопротивлений: активного, индуктивного, емкостного. Полный ток определяется как геометрическая сумма активной и реактивной составляющих.

Резонанс – явление, при котором сопротивление контура переменного тока, образованного индуктивностью и емкостью, становится чисто активным.

Резонанс напряжений – резонанс в последовательной цепи, содержащей индуктивное и емкостное сопротивления. Наступает при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений.

Резонанс токов – резонанс в электрической цепи, содержащей параллельно включенные индуктивное и емкостное сопротивления. Наступает при равенстве индуктивной и емкостной проводимостей.

### 3 ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННЫЕ ЦЕПИ

Если изменение тока в одном из элементов цепи приводит к появлению ЭДС в другом элементе цепи, то говорят, что эти два элемента индуктивно связаны.

Взаимоиндукция – это явление наведения ЭДС в каком-либо контуре при изменении тока в другом контуре. Наведенную (индуцированную) ЭДС называют ЭДС взаимной индукции (взаимоиндукции) и обозначают  $e_m$ . Цепи, в которых наводятся ЭДС взаимной индукции, называют индуктивно- или магнитно-связанными цепями.

Потокосцеплением называется алгебраическая сумма магнитных потоков, пронизывающих отдельные витки индуктивной катушки:

$$\psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n.$$

В индуктивной катушке, состоящей из большого числа витков, наводится ЭДС, пропорциональная скорости изменения потокосцепления, т.е. скорости изменения суммы магнитных потоков, сцепленных с отдельными витками данной катушки. Если все витки катушки общим числом  $N$  пронизываются одним и тем же магнитным потоком  $\Phi$ , то  $\Psi = N\Phi$ , а ЭДС взаимной индукции равна:

$$e_m = d\Psi/dt = Nd\Phi/dt.$$

Связь потокосцепления взаимной индукции одной электрической цепи с током в другой цепи, равная отношению потокосцепления взаимной индукции в одной цепи к току в другой цепи, характеризуется взаимной индуктивностью  $M$ , которая, также как и индуктивность, представляет собой скалярную величину. Взаимная индуктивность  $M$  имеет размерность генри (Гн).

Коэффициентом связи  $K$  двух магнитно-связанных катушек с индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$  и взаимной индуктивностью  $M$  называют отношение:

$$K = M / \sqrt{L_1 L_2}.$$

Коэффициент связи всегда меньше единицы. Он равен единице в том случае, когда весь поток, создаваемый первым контуром, сцепляется со вторым.

Если потокосцепление взаимной индукции суммируется с потокосцеплением самоиндукции, т.е. магнитные потоки, созданные токами обеих индуктивных катушек, совпадают по направлению, то такое включение катушек называется согласным. В противном случае имеем

встречное включение катушек (магнитные потоки противоположны по направлению).

Одноименные выводы индуктивно связанных катушек характерны тем, что при одинаковом направлении токов  $i_1$  и  $i_2$  катушек относительно этих выводов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждой катушке складываются. Одноименные выводы катушек помечают точками: как правило, точками обозначают начала обмоток.

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Иначе трансформатор – это устройство для передачи энергии переменного тока из одной цепи или части цепи в другую посредством электромагнитной индукции.

Воздушный трансформатор – это трансформатор без ферромагнитного сердечника, в котором силовые линии магнитного поля замыкаются по воздуху и для которого электрические процессы могут быть описаны линейными дифференциальными уравнениями.

Вносимые сопротивления – это такие сопротивления, которые следовало бы «внести» в первичную цепь воздушного трансформатора, чтобы учесть влияние нагрузки вторичной цепи трансформатора на ток в его первичной цепи.

Развязывание магнитно-связанных цепей (катушек) – это расчетный метод, согласно которому исходную схему с магнитно-связанными индуктивностями путем введения дополнительных индуктивностей и изменения имеющихся преобразуют так, что магнитная связь между всеми индуктивностями в преобразованной схеме отсутствует. Так как преобразования осуществляют на основе составленных по законам Кирхгофа уравнений для исходной схемы, то вновь полученная и исходная схемы в расчетном смысле полностью эквивалентны, а расчет схемы после развязывания упрощается за счет возможности применения метода узловых потенциалов.

## 4 ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Многофазная система – совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой амплитуды и одной и той же частоты, отличающиеся по фазе одна от другой на одну и ту же величину и создаваемые общим источником энергии.

Каждую из однофазных цепей, входящую в многофазную систему и состоящую из источника (обмотки генератора), провода и приемника электрической энергии, принято называть фазой.

Многофазная электрическая цепь называется симметричной, если комплексные сопротивления всех ее фаз равны.

Линейный провод – провод, соединяющий начало фазы источника с началом фазы приемника.

Нейтральный провод – провод, соединяющий нейтральную (нулевую) точку источника и нейтральную (нулевую) точку приемника. Нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке, в первую очередь их равенство.

Линейное напряжение  $U_L$  – напряжение между началами двух фаз источника или приемника.

Фазное напряжение  $U_\phi$  – напряжение между началом и концом одной фазы источника или приемника.

Линейный ток  $I_L$  – ток, протекающий в линейном проводе.

Напряжение смещения нейтрали – напряжение между нейтральными (нулевыми) точками источника и приемника. Возникает при несимметричной нагрузке (в первую очередь в трехфазной цепи, соединенной звездой без нейтрального провода) и вызывает отклонение значения фазных напряжений на нагрузке от номинального значения.

Симметричная (равномерная) нагрузка – нагрузка, у которой комплексные сопротивления всех её фаз равны.

Оператор  $a$  трехфазной системы (фазный множитель) – комплексное число  $\exp(j120^\circ)$ , равное по модулю единице.

Система прямой последовательности – трехфазная система с порядком следования фаз А, В, С.

Система обратной последовательности – трехфазная система с порядком следования фаз А, С, В.

Система нулевой последовательности – трехфазная система, состоящая из трех одинаковых синусоидальных величин, совпадающих по фазе.

## 5 ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Периодические несинусоидальные напряжения (токи) – напряжения (токи), изменяющиеся по несинусоидальному закону.

Действующие значения несинусоидальных напряжений и токов определяются по формулам:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_n^2} ,$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_n^2} .$$

Среднее значение несинусоидального тока определяется, как правило, как среднее значение по абсолютной величине (по модулю):

$$I_{\text{ср.мод}} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt .$$

Активная мощность несинусоидального тока – это среднее значение мгновенной мощности за период первой гармоники:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n$$

где  $\varphi_n$  – фазовый сдвиг между током и напряжением для  $n$  - гармоники.

Графический метод определения коэффициентов  $a_k, b_k$  разложения в ряд Фурье – используется, если сигнал задаётся графически, например, в виде осциллограммы. Его суть заключается в том, что период сигнала  $T$  разбивают на  $n$  интервалов, равных  $\Delta x = T/n$  (обычно  $n$  равно от 18 до 24), причём точка разрыва кривой сигнала не должны попадать на середину участков разбиения. Далее определяют значение сигнала  $x_i(t)$  в середине каждого участка разбиения и находят коэффициенты разложения  $a_k, b_k$  с помощью конечных сумм:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) ; \\ a_k &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) \cos_i k \omega_1 t ; \\ b_k &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) \sin_i k \omega_1 t , \end{aligned} \right\}$$

где  $x_i(t), \cos_i k \omega_1 t, \sin_i k \omega_1 t$  – значения функций  $x(t), \cos(k \omega_1 t), \sin(k \omega_1 t)$  в середине  $i$ -ого интервала.

Расчет цепей несинусоидального тока выполняется с использованием метода наложения. При этом цепь рассчитывают для постоянной составляющей напряжения источника и для каждой из гармоник этого напряжения в отдельности. Расчёт цепи для отдельных гармоник ведётся обычно символическим методом. При этом необходимо учиты-

вать, что при постоянной составляющей входного воздействия индуктивное сопротивление равно нулю, а ёмкостное сопротивление – бесконечности (разрыв цепи). Кроме того с ростом частоты индуктивное сопротивление растёт  $X_{Lk}=k\omega L$ , а ёмкостное сопротивление уменьшается  $X_{Ck}=1/(k\omega C)$ . Активное сопротивление  $R$  на низких и средних частотах можно считать не зависящим от частоты.

После определения искоемых токов и напряжений отдельных гармоник методом наложения находят результирующую реакцию цепи на негармоническое периодическое воздействие. При этом либо определяют мгновенное значение результирующего сигнала на основании расчёта амплитуд и фаз отдельных гармоник, либо его действующее значение.

Закон изменения комплексных амплитуд гармоник в зависимости от частоты называется спектральной плотностью, спектральной функцией (характеристикой) или частотным спектром периодического сигнала  $x(t)$ .

Спектр – это последовательность значений комплексных амплитуд  $x(jk\omega_1)$ , которые указывают, какие гармоники входят в состав функции  $x(t)$  и каковы амплитуды и начальные фазы отдельных гармонических составляющих. Комплексные амплитуды являются функциями равностоящих дискретных значений частоты, кратных основной частоте  $\omega_1$ , поэтому они образуют комплексный дискретный спектр. Их составляющие: амплитуда  $X_{mk}$  и начальная фаза  $\psi_k$ , изображаемые графически в зависимости от дискретных значений частоты  $k\omega_1$ , называются амплитудным и фазовым дискретным спектром соответственно.

## 6 ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Передачной функцией  $W(p)$  называют отношение операторного изображения (изображения по Лапласу) выходной величины к операторному изображению входной величины при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}.$$

Если представить в операторном виде связь между входной и выходной величинами для любой системы, цепи или элемента как

$$A(p)Y(p) = B(p)X(p),$$

то передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n},$$

где  $A(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n$  называется собственным оператором,

$B(p) = b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m$  называется входным оператором, причем входящие в их выражения величины определяются только конфигурацией схемы (схемы замещения) цепи, системы или элемента и параметрами входящих в неё элементов. Т.е. передаточная функция не зависит от вида входного воздействия, а только от схемы электрической цепи и параметров входящих в неё элементов или от вида и параметров конкретного элемента, а значит, характеризует собственные свойства описываемой цепи или элемента.

Нули передаточной функции – это корни многочлена  $B(p)$  (числителя  $W(p)$ ).

Полюсы передаточной функции – это корни многочлена  $A(p)$  (знаменателя  $W(p)$ ).

Комплексной частотной характеристикой (КЧХ) цепи называется отношение комплексных изображений отклика (выходного сигнала) и воздействия (входного сигнала):

$$H_{KL}(j\omega) = \underline{Y}_{mK} / \underline{X}_{mL} = \underline{Y}_K / \underline{X}_L,$$

где  $\underline{Y}_{mK}$ ,  $\underline{Y}_K$  – комплексные амплитуда и действующее значение реакции цепи;  $\underline{X}_{mL}$ ,  $\underline{X}_L$  – комплексные амплитуда и действующее значение внешнего воздействия ( $L$  – входные выводы цепи,  $K$  – выходные выводы цепи).

КЧХ может иметь размерность сопротивления, проводимости или быть безразмерной. В общем виде КЧХ имеет вид:

$$H_{KL}(j\omega) = H_{KL}(\omega) \exp[j\psi_{KL}(\omega)] = H_{KL}'(\omega) + jH_{KL}''(\omega),$$

где модуль (амплитуда)  $H_{KL}(\omega)$  и аргумент (фаза)  $\psi_{KL}(\omega)$  или активная (вещественная)  $H_{KL}'(\omega)$  и реактивная (мнимая)  $H_{KL}''(\omega)$  составляющие являются функциями вещественной частоты и могут быть изображены в виде графиков. Эти функции называются частотными характеристиками цепи. Зависимость модуля КЧХ от частоты называют амплитудной частотной характеристикой (АЧХ), а зависимость фазы КЧХ от частоты – фазовой частотной характеристикой (ФЧХ). Зависимости вещественной и мнимой составляющих КЧХ от частоты

называют соответственно вещественной и мнимой частотными характеристиками. Следовательно, КЧХ сочетает в себе АЧХ и ФЧХ.

Годограф КЧХ – это геометрическое место концов векторов, изображающих КЧХ при изменении частоты от нуля до бесконечности, которые строят на комплексной плоскости. Иначе годограф – это графическое изображение амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ), включающей в себя АЧХ и ФЧХ.

Логарифмическая АЧХ (ЛАЧХ) – это функция  $L(\omega) = 20 \lg H(\omega)$ . При построении ЛАЧХ по оси абсцисс откладывают частоту в логарифмическом масштабе, т.е.  $\lg \omega$ , а по оси ординат –  $L(\omega)$ . Единицей  $L(\omega)$  является децибел, а единицей логарифма частоты – декада. Декадой называется интервал, на котором частота изменяется в 10 раз.

Логарифмическая ФЧХ (ЛФЧХ) – это график зависимости ФЧХ от логарифма частоты  $\lg \omega$ .

КЧХ делятся на входные и передаточные. Если отклик и внешнее воздействие рассматриваются на одних и тех же зажимах цепи, то КЧХ называется входной. Если отклик и внешнее воздействие задаются на разных зажимах, то КЧХ называется передаточной. Различают два вида входных и четыре вида передаточных характеристик:

- комплексное входное сопротивление:  $Z_{LL}(j\omega) = \underline{U}_L / \underline{I}_L$ ;
- комплексная входная проводимость:  $Y_{LL}(j\omega) = \underline{I}_L / \underline{U}_L$ ;
- комплексный коэффициент передачи по напряжению:  $K_{KL}(j\omega) = \underline{U}_K / \underline{U}_L$  (обозначается также как  $K_U(j\omega)$ );
- комплексный коэффициент передачи по току:  $G_{KL}(j\omega) = \underline{I}_K / \underline{I}_L$  (обозначается также как  $K_I(j\omega)$ );
- комплексное передаточное сопротивление:  $Z_{KL}(j\omega) = \underline{U}_K / \underline{I}_L$ ;
- комплексная передаточная проводимость:  $Y_{KL}(j\omega) = \underline{I}_K / \underline{U}_L$ .

Здесь  $L$  – входные выводы цепи,  $K$  – выходные выводы цепи.

Переходной характеристикой  $h(t)$  цепи называют реакцию цепи на воздействие в форме единичной функции:

$$I(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq 0, \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

Импульсной характеристикой  $k(t)$  цепи называют реакцию цепи на воздействие единичной импульсной функции  $\delta(t)$  (дельта-функции или функции Дирака):

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

Функция Дирака является физически нереализуемой математической абстракцией. Формально она может быть получена, например, предельным переходом (при  $\tau \rightarrow 0$ , где  $\tau$  - длительность импульса) единичного импульса, площадь которого равна единице:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1.$$

Переходная и импульсная характеристики называются временными характеристиками. Они определяются при нулевых начальных условиях в цепи. В зависимости от типа реакции и типа воздействия (ток или напряжение) переходные и импульсные характеристики могут быть безразмерными величинами или иметь размерность А/В или В/А. Использование понятий переходной и импульсной характеристик цепи позволяет свести расчёт реакции цепи от действия непериодического сигнала произвольной формы к определению реакции цепи на простейшее воздействие типа единичной  $I(t)$  или импульсной функции  $\delta(t)$ , с помощью которых аппроксимируется исходный сигнал. При этом результирующая реакция линейной цепи находится (с использованием принципа наложения) как сумма реакций цепи на элементарные воздействия  $I(t)$  или  $\delta(t)$ .

Для линейной пассивной цепи импульсная характеристика является производной от переходной характеристики цепи:

$$k(t) = \frac{dh(t)}{dt} = h'(t).$$

## 7 ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ

Многополюсником называется участок идеализированной электрической цепи, соединяющийся с остальной частью цепи с помощью нескольких внешних выводов (полюсов, зажимов).

Многополюсники делятся на линейные и нелинейные, активные и пассивные, автономные и неавтономные.

К неавтономным многополюсникам относятся все пассивные многополюсники, а также те активные многополюсники, которые не содержат неуправляемых источников тока или напряжения. Если многополюсник содержит хотя бы один неуправляемый (независимый) источник напряжения или тока, то он будет автономным.

Четырехполюсник (ЧП) – это устройство или электрическая цепь, имеющие четыре внешних вывода (полюса, зажима). Выводы четы-

рѣхполюсника делятся на входные (вход) и выходные (выход). Четырѣхполюсник называется симметричным, если перемена местами его входных и выходных выводов не изменяет токов и напряжений в цепи, с которой он соединѣн. В противном случае ЧП является несимметричным.

Четырѣхполюсник называется обратимым, если выполняется теорема обратимости, т.е. отношение напряжения на входе к току на выходе (т. е. передаточное сопротивление входного и выходного контуров) не зависит от того, какая из двух пар выводов является входной и какая выходной. В противном случае ЧП называется необратимым. Пассивные линейные ЧП являются обратимыми, несимметричные активные ЧП – необратимы. Симметричные ЧП всегда обратимы.

Уравнения, дающие зависимость между напряжениями на входе и выходе, а также токами, протекающими через входные и выходные зажимы, называются уравнениями передачи четырёхполюсника. Величины, связывающие в уравнениях передачи напряжения и токи, называются параметрами четырёхполюсников.

Первичные параметры четырёхполюсника – это коэффициенты, входящие в уравнения передачи четырёхполюсника, и параметры холостого хода и короткого замыкания (входные сопротивления ЧП со стороны его входных и выходных выводов в режимах холостого хода и короткого замыкания).

Характеристические (собственные) параметры четырёхполюсника – это характеристические сопротивления и постоянная (коэффициент или мера) передачи.

Характеристическое (собственное) сопротивление симметричного четырёхполюсника – это сопротивление, которое будучи подключѣнным в качестве нагрузки обеспечивает входное сопротивление четырёхполюсника, равное этому сопротивлению. Оно определяется через коэффициенты А-формы записи уравнений ЧП:  $Z_C = \sqrt{A_{12}/A_{21}}$ .

Если четырёхполюсник не симметричный, то характеристические сопротивления определяются отдельно со стороны первичных и вторичных зажимов по формулам:

$$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\frac{A_{11}A_{12}}{A_{21}A_{22}}} = \underline{Z}_{BX1} = \underline{Z}_Г,$$

$$\underline{Z}_{C2} = \sqrt{\frac{A_{22}A_{12}}{A_{21}A_{11}}} = \underline{Z}_{BX2} = \underline{Z}_Н.$$

Здесь  $Z_G$  – выходное сопротивление источника (генератора),  $Z_H$  – сопротивление нагрузки.

Характеристические сопротивления можно выразить через параметры холостого хода и короткого замыкания:

$$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\underline{Z}_{X1} \underline{Z}_{K1}} ,$$

$$\underline{Z}_{C2} = \sqrt{\underline{Z}_{X2} \underline{Z}_{K2}} .$$

Постоянная (коэффициент или мера) передачи четырёхполюсника – это коэффициент, учитывающий потери энергии в четырёхполюснике при её передаче от входа к выходу ЧП:

$$\underline{G}_C = 0,5 \ln \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} = a + jb ,$$

где  $a$  – собственное затухание (ослабление) четырёхполюсника,  $b$  – коэффициент фазы.

Управляемый источник напряжения (тока) – невзаимный четырёхполюсник, выходное напряжение (ток) которого пропорционально его входному напряжению (току), а сам он обладает свойством источника напряжения или источника тока. Различают 4 вида управляемых источников:

ИТУН – источник тока, управляемый напряжением;

ИНУТ – источник напряжения, управляемый током;

ИНУН – источник напряжения, управляемый напряжением;

ИТУТ – источник тока, управляемый током.

## 8 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Электрический фильтр – это пассивный четырёхполюсник, пропускающий сигналы некоторой полосы частот с малым затуханием (ослаблением), а сигналы вне этой полосы частот – с большим затуханием.

Полоса пропускания (прозрачности) фильтра – это полоса частот, в которой ослабление сигнала мало.

Полоса задерживания (затухания) фильтра – это полоса частот, в которой ослабление сигнала велико.

Граничную частоту между полосой пропускания и полосой задерживания называют частотой среза  $\omega_c$ . Нередко это целая переходная область частот.

По расположению полосы пропускания на шкале частот различают следующие фильтры:

- фильтры нижних частот (ФНЧ), пропускающие сигналы в частотном диапазоне ниже частоты среза:  $0 < \omega < \omega_c$ ;
- фильтры верхних частот (ФВЧ), пропускающие сигналы в частотном диапазоне выше частоты среза:  $\omega_c < \omega < \infty$ ;
- полосовые фильтры, пропускающие сигналы, относящиеся к некоторой полосе частот, т.е. в частотном диапазоне  $\omega_{c_1} < \omega < \omega_{c_2}$ ;
- заграждающие (режекторные) фильтры, пропускающие сигналы вне некоторой полосы частот, т.е. в частотном диапазоне  $0 < \omega < \omega_{c_1}$ ,  $\omega_{c_2} < \omega < \infty$ , где  $\omega_{c_2} > \omega_{c_1}$ ;
- многополосные фильтры, имеющие несколько полос пропускания.

Фильтры  $k$ -типа – это фильтры, для которых произведение продольного сопротивления на соответствующее поперечное сопротивление представляет собой некоторое постоянное для данного фильтра число (число  $k$ ), не зависящее от частоты. Фильтры, в которых это произведение зависит от частоты, называются фильтрами  $m$ -типа.

Полиномиальные фильтры – пассивные LC-фильтры, имеющие цепную (лестничную) схему (например, продольные индуктивные и поперечные емкостные элементы для НЧ-прототипа) и передаточную функцию вида  $K(p) = b_0 / (b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0)$ .

Фильтры Баттерворта и фильтры Чебышева – полиномиальные фильтры, для описания которых используются соответственно полиномы Баттерворта и Чебышева.

Активные фильтры – RC-фильтры с использованием операционных усилителей или транзисторов.

## 9 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Переходный процесс – это переходный режим в электрической цепи от начала воздействия до установившегося состояния цепи. Фактически это режим, описывающий состояние электрической цепи между двумя установившимися процессами, в котором цепь оказывается за счет внешнего воздействия. Переходный режим работы цепи обусловлен наличием в ней реактивных элементов (индуктивностей, емкостей), в которых накапливается энергия электрического и/или магнитного поля. Эта энергия не может мгновенно измениться по величине при коммутации, поэтому требуется время для её изменения – время переходного процесса.

Коммутацией принято называть любое изменение параметров цепи, её конфигурации, подключение или отключение источников электроэнергии, приводящее к возникновению переходных режимов. Коммутацию будем считать мгновенным действием, однако переходный процесс будет протекать определённое время: теоретически бесконечно большое. На практике это время принимают конечным, зависящим от параметров цепи. Принято считать, что коммутация осуществляется в момент времени  $t=0$ .

Под моментом времени  $t=0-$  понимают последнее мгновение перед коммутацией, а под моментом времени  $t=0+$  (или  $t=0$ ) – первое мгновение после коммутации. В момент  $t=0-$  все напряжения и токи находятся в состоянии установившихся значений для той цепи, которая имеется до коммутации, а в момент  $t=0+$  в цепи начинается переходный процесс.

Первый закон коммутации связан с непрерывностью изменения магнитного поля индуктивной катушки, энергия которого зависит от величины тока  $W_L = \frac{Li^2}{2}$ , и гласит: ток в индуктивности не может изменяться скачком и в начальный момент  $t=0+$  непосредственно после коммутации имеет то же значение, что и в момент  $t=0-$  до коммутации, и с этого начального момента плавно изменяется:

$$i_L(0+) = i_L(0-).$$

Второй закон коммутации связан с непрерывностью изменения электрического поля ёмкости, энергия которого зависит от величины напряжения  $W_C = \frac{Cu^2}{2}$ , и гласит: напряжение на конденсаторе не может изменяться скачком и в начальный момент времени  $t=0+$  непосредственно после коммутации имеет то же значение, что и в момент  $t=0-$  до коммутации, и с этого начального момента плавно изменяется:

$$u_C(0+) = u_C(0-).$$

Значение токов в индуктивности  $i_L(0+)$  и напряжений на ёмкости  $u_C(0+)$ , определяемые с помощью законов коммутации, образуют независимые начальные условия задачи расчета переходного процесса. Начальные условия остальных токов и напряжений, которые могут изменяться скачком, будем называть зависимыми.

Классический метод расчёта переходного процесса в электрических цепях основан на составлении интегрально-дифференциальных уравнений для мгновенных значений токов и напряжений на основе законов Кирхгофа для цепи после коммутации.

Порядок расчёта переходных процессов классическим методом:

- 1) рассчитывается принуждённый режим после коммутации с целью нахождения принужденной составляющей искомой величины;
- 2) составляется характеристическое уравнение для схемы, полученной после коммутации, и определяются его корни, которые обязательно должны быть отрицательными;
- 3) в зависимости от вида корней характеристического уравнения записывается в общем виде выражение для свободной составляющей искомой величины;
- 4) рассчитывается режим до коммутации и определяются независимые начальные условия – значения  $i_L(0)$ ,  $u_C(0)$ . Если этих величин недостаточно для определения постоянных интегрирования, то составляются по законам Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений уравнения для схемы, получившейся после коммутации, вносятся в них значения  $i_L(0)$ ,  $u_C(0)$  и определяются начальные значения остальных токов и напряжений;
- 5) для выражения свободной составляющей находятся постоянные интегрирования на основе начальных условий. При этом, как правило, приходится определять значения производных искомой величины тока или напряжения до порядка  $n-1$ , где  $n$  – порядок характеристического уравнения;
- б) искомая величина записывается как сумма принуждённой и свободной составляющих.

Этапы 1,2 и 4 (нахождение независимых начальных условий) не зависят друг от друга, поэтому могут выполняться в любом порядке.

Операторный метод или иначе метод преобразования Лапласа позволяет производить анализ и расчет электрических цепей, в том числе переходных процессов, при воздействии сигналов любой формы. В основе операторного метода лежит преобразование Лапласа, которое позволяет перенести решение из области функций действительного переменного  $t$  в область комплексного переменного (комплексной частоты)  $p=s+j\omega$ . При этом операции дифференцирования и интегрирования функций времени заменяются соответствующими операциями умножения и деления функций комплексного переменного на оператор  $p$ , что существенно упрощает расчет, т. к. сводит систему интегрально-дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений. В операторном методе учитываются только независимые начальные условия – значения  $i_L(0)$ ,  $u_C(0)$  и отпадает необходимость в зависимых постоянных интегрирования. При этом функция времени

называется оригиналом, а функция комплексной частоты, связанная с оригиналом преобразованиями Лапласа, называется изображением.

Порядок расчёта переходного процесса операторным методом:

1) составляется операторная схема на основе схемы, полученной после коммутации;

2) для операторной схемы записываются уравнения для изображений с учётом независимых начальных условий;

3) уравнения для изображений решаются алгебраически относительно изображения искомой функции;

4) на основе полученного изображения находится оригинал искомой функции как функция времени с помощью обратного преобразования Лапласа, по таблицам соответствия или непосредственным применением формулы разложения, которая применима при любых начальных условиях и любых практически встречающихся в электротехнике формулах питающего напряжения.

## 10 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Нелинейный элемент (НЭ) – пассивный элемент электрической цепи, основным параметр которого зависит от тока или напряжения. Электрическая цепь, содержащая нелинейные элементы, называется нелинейной.

Нелинейное сопротивление – активное сопротивление (резистор), напряжение на зажимах которого нелинейно зависит от значения протекающего через него тока.

Статическое сопротивление НЭ – отношение напряжения на элементе к току в нем в заданной точке его вольт-амперной характеристики (ВАХ), определённые для данной точки. Статическое сопротивление можно определить графически как тангенс угла наклона прямой, проведенной через начало координат и заданную точку.

Дифференциальное сопротивление НЭ – отношение бесконечно малого приращения напряжения к соответствующему приращению тока в заданной точке его ВАХ:

$$R_{\text{диф}} = dU/dI .$$

Дифференциальное сопротивление можно определить графически как тангенс угла наклона касательной к ВАХ, проведенной через заданную точку.

Терморезистор – нелинейный резистор, значение сопротивления которого зависит от температуры, в результате чего протекающий че-

рез него ток является нелинейной функцией сопротивления. Терморезисторы используют в качестве датчиков температуры в системах автоматического регулирования и управления.

Тензорезистор – нелинейный резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации. Тензорезисторы используются в тензометрии. С помощью тензорезисторов можно измерять деформации механически связанных с ними элементов. Тензорезистор является основной составной частью тензодатчиков, применяющихся для косвенного измерения силы, давления, веса, механических напряжений, крутящих моментов и т.д.

Аппроксимация характеристик нелинейных элементов – приближенное аналитическое описание данных характеристик.

Методы расчета нелинейных цепей постоянного тока:

- метод эквивалентных преобразований;
- метод пересечения характеристик;
- метод эквивалентного генератора;
- метод двух узлов;
- метод линеаризации.

## 11 МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

Магнитное поле – одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на движущуюся электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и её скорости. Физически магнитное поле обусловлено движением электрических зарядов.

Магнитная цепь – электрическая цепь (электротехническое устройство), участки которой выполнены из ферромагнитных материалов, по которым замыкается магнитный поток. Магнитная цепь содержит индуктивные катушки с ферромагнитными сердечниками.

Магнитная индукция  $B$  – величина, равная отношению силы, действующей в магнитном поле на единицу длины проводника, перпендикулярного направлению поля, к силе тока в проводнике. Магнитная индукция характеризует степень ориентации элементарных магнитов (доменов) ферромагнитного вещества относительно силовых линий внешнего магнитного поля.

Тесла (Тл) – единица измерения индукции магнитного поля (магнитной индукции), названная в честь чешского физика и электротехника Николы Тесла (1856-1943 гг.).

Магнитный поток  $\Phi$  или иначе поток вектора магнитной индукции через данную поверхность  $S$  определяется числом линий, пронизывающих эту поверхность и равен:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B \cos \alpha dS,$$

где  $\alpha$  - угол между направлением вектора магнитной индукции  $B$  и нормалью к поверхности  $S$  в данной точке.

Для однородного магнитного поля и плоскости:  $\Phi = B S \cos \alpha$ .

Вебер (Вб) – единица измерения магнитного потока, названная в честь немецкого физика Вильгейма Вебера (1804-1891 гг.).

Напряженность магнитного поля  $H$  – векторная величина, характеризующее магнитное поле токов и не зависящее от свойств среды, единица измерения А/м. Напряженность магнитного поля показывает, какая намагничивающая сила участвует в создании магнитного поля.

Магнитная проницаемость – величина, характеризующая магнитные свойства вещества. На практике различают абсолютную  $\mu_a$  и относительную  $\mu$  магнитные проницаемости, связанные между собой формулой:

$$\mu_a = \mu \mu_0 = B/H,$$

где  $B$  – магнитная индукция;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1,256 \times 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума).

Абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$  – величина, характеризующая магнитные свойства вещества, равная отношению модуля магнитной индукции к модулю напряженности магнитного поля. Абсолютная магнитная проницаемость измеряется в Гн/м, а относительная магнитная проницаемость – безразмерная величина. Принято считать, что неферромагнитные вещества и воздух имеют относительную магнитную проницаемость, равную 1, т.е. как у вакуума.

Магнитное сопротивление  $R_m$  характеризует способность вещества препятствовать прохождению через него магнитному потоку, единица измерения 1/Гн.  $R_m = l/\mu_a S$ , где  $l$ ,  $S$  – соответственно средняя длина и площадь сечения участка магнитной цепи.

Закон полного тока определяет взаимную обусловленность протекания тока и возникновения магнитного поля. Математическим выражением этого закона служит формула

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H \cos \alpha dl = \sum_{k=1}^n I_k,$$

где  $H$  – вектор напряжённости магнитного поля в данной точке пространства;

$dl$  – элемент длины замкнутого контура  $l$ ;

$\alpha$  – угол между направлениями векторов  $H$  и  $dl$ ;

$\sum_{k=1}^n I_k$  – алгебраическая сумма токов, пронизывающих контур  $l$ ,

называемая полным током или магнитодвижущей силой  $F$ .

Закон полного тока читается так: *линейный интеграл вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равен полному току, охватываемому этим контуром.*

Ток  $I_k$ , пронизывающий контур  $l$ , считается положительным, если принятое направление обхода контура и направление этого тока связаны правилом буравчика (правоходового винта).

Магнитодвижущая сила (МДС) (иначе – намагничивающая сила, сокращенно НС)  $F$  – величина, характеризующая намагничивающее действие электрического тока и равная циркуляции напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура, единица измерения – ампер (А). Так как магнитное поле в электротехнических устройствах создается в основном индуктивными катушками, то МДС равна:  $F=IN$ , где  $N$  – число витков катушки,  $I$  – ток в катушке.

Вихревые токи – электрические токи в проводящем теле (металлическом изделии), которые вызваны электромагнитной индукцией и которые замыкаются по контурам, образующим односвязную область.

Взаимная индукция – электромагнитная индукция, вызванная изменением сцепляющегося с контуром магнитного потока, обусловленного электрическими токами в других контурах.

Петля гистерезиса – зависимость между индукцией  $B$  и напряженностью  $H$  магнитного поля в ферромагнитных материалах, представленная в графическом виде.

Магнитные потери – потери электрической энергии в магнитопроводе (сердечнике) электромагнитных устройств. Делятся на потери на перемагничивание материала магнитопровода (на гистерезис) и на потери, связанные с вихревыми токами в магнитопроводе.

Электротехническая сталь – сплав железа с кремнием, у которой  $\mu \leq 1000$ . Применяется для изготовления магнитопроводов.

Пермаллой – это сплав железа с никелем с добавлением хрома, меди, молибдена, кремния и алюминия:  $\mu > 1000$ . Применяется для изготовления магнитопроводов.

Ферритами называют ферромагнитные материалы, получаемые из смеси окислов железа, цинка и других металлов. При изготовлении магнитопроводов смесь окислов размалывают, прессуют и обжигают при  $t^\circ \approx 1200^\circ C$ . Ферриты обладают очень большим удельным сопротивлением при  $\mu \approx 500 \dots 10000$  и выше, поэтому потери на вихревые токи в них очень малы и их можно применять при высокой частоте.

Закон Ома для магнитной цепи: *магнитный поток пропорционален МДС и обратно пропорционален магнитному сопротивлению цепи*

$$\Phi = F / R_m,$$

где  $R_m = l_{cp} / \mu_a S$ ,

$l_{cp}$  – средняя длина магнитной силовой линии;

$\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды;

$S$  – площадь сечения, через которое проходят силовые линии.

Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи: *алгебраическая сумма магнитных потоков равна нулю в любом узле магнитной цепи (в силу непрерывности магнитных линий).*

Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи: *алгебраическая сумма магнитных напряжений в любом контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме МДС этого контура.*

Магнитное напряжение – произведение магнитного потока на магнитное сопротивление участка магнитной цепи. Магнитное напряжение также определяют как произведение длины участка на напряженность магнитного поля на данном участке:  $Hl$ .

Прямая задача расчета магнитной цепи предназначена для определения МДС (намагничивающей силы) в неразветвленной магнитной цепи постоянного тока с одной обмоткой. В прямой задаче задано:

- 1) геометрические размеры магнитной цепи (магнитопровода);
- 2) характеристики (кривые намагничивания) ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь (магнитопровод);
- 3) магнитный поток или магнитная индукция, которые надо создать в магнитной цепи (в магнитопроводе).

Обратная задача расчета магнитной цепи предназначена для определения магнитного потока или магнитной индукции в неразветвленной магнитной цепи постоянного тока с одной обмоткой. В обратной задаче задано:

- 1) геометрические размеры магнитной цепи (магнитопровода);
- 2) характеристики (кривые намагничивания) ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь (магнитопровод);
- 3) намагничивающая сила (МДС) обмотки.

Магнитными цепями с переменной магнитодвижущей силой называют такие цепи, магнитное поле которых возбуждается индуктивными катушками, подключёнными к источнику переменного тока.

Поток рассеяния – это часть магнитного потока индуктивной катушки, который замыкается вне магнитопровода.

## 12 ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Цепь с распределёнными параметрами – электрическая цепь, в которой индуктивности, емкости и активные сопротивления распределены по всей длине цепи.

Длинными линиями или линиями с распределёнными параметрами называют такие электрические линии, в которых для одного и того же момента времени ток и напряжение непрерывно изменяются при переходе от одной точки (сечения) линии к соседней точке, т.е. являются функциями времени и пространственной координаты. Эффект непрерывного изменения тока и напряжения вдоль линии вызван тем, что линия обладает распределёнными продольными и поперечными элементами.

Термин «длинная линия» появился применительно к телеграфным и телефонным линиям связи и высоковольтным линиям электропередачи, имеющим значительную длину (десятки-сотни километров). Однако при высокой частоте цепями с распределёнными параметрами (т.е. длинными линиями) могут являться отдельные элементы электрической цепи (например, индуктивные катушки) и даже короткие проводники, их соединяющие (рассматриваются в электронике).

Однородная длинная линия – линия с распределёнными параметрами, у которой равны друг другу все продольные сопротивления участков линии одинаковой длины и равны друг другу все поперечные сопротивления участков линии одинаковой длины. В противном случае длинная линия будет неоднородной.

Комплексное число  $\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0}$  называют постоянной распространения:  $\gamma = \alpha + j\beta$ ,

где  $\alpha$  – коэффициент затухания, характеризующий затухание падающей волны на единицу длины линии;

$\beta$  – коэффициент фазы, характеризующий изменение фазы падающей волны на единицу длины линии;

$Z_0 = R_0 + j\omega L_0$  – комплекс полного продольного сопротивления единицы длины линии;

$Y_0 = G_0 + j\omega C_0$  – комплекс полной поперечной проводимости единицы длины линии;

$R_0$  – продольное активное сопротивление единицы длины линии;

$L_0$  – индуктивность единицы длины линии;

$G_0$  – поперечная активная проводимость единицы длины линии;

$C_0$  – емкость единицы длины линии.

Волновое сопротивление – это комплексное число  $Z_B = \sqrt{Z_0/Y_0} = Z_B \exp(\varphi_B)$ . Является одной из характеристик длинной линии.

Падающей электромагнитной волной называют процесс перемещения электромагнитного состояния (электромагнитной волны) от источника энергии к приемнику, т.е. в направлении увеличения координаты  $x$ . Электромагнитное состояние определяется совокупностью электрического и магнитного полей, обуславливающих друг друга.

Отраженной электромагнитной волной называют процесс перемещения электромагнитного состояния (электромагнитной волны) от приемника к источнику энергии, т.е. в направлении уменьшения координаты  $x$ .

Коэффициент отражения по напряжению – это отношение напряжения отраженной волны к напряжению падающей волны в конце линии:  $K_u = (Z_H - Z_B) / (Z_H + Z_B)$ .

Коэффициент отражения по току:  $K_i = -K_u$ .

При согласованной нагрузке  $K_u=0$ , при холостом ходе  $K_u=1$ .

Фазовой скоростью называют скорость, с которой нужно перемещаться вдоль линии, чтобы наблюдать одну и ту же фазу колебания.

Иначе: фазовая скорость – это скорость перемещения по линии неизменного фазового состояния:

$$v_\phi = dx / dt = \omega / \beta.$$

Длина волны – расстояние, на которое распространяется волна за один период:

$$\lambda = v / T = v / f.$$

Линия без искажений – длинная линия, вдоль которой волны всех частот распространяются с одинаковой фазовой скоростью и затухают в равной степени.

Для того чтобы линия была неискажающей, коэффициент затухания и фазовая скорость не должны зависеть от частоты. Для этого должно выполняться соотношение:  $R_0 / L_0 = G_0 / C_0$ . Тогда:  $\alpha = \sqrt{R_0 G_0}$ ,

$$\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}, v_\phi = 1 / \sqrt{L_0 C_0}, Z_B = \sqrt{L_0 / C_0}.$$

Линия без потерь – длинная линия, у которой  $R_0 = 0$ ,  $G_0 = 0$ . Это возможно только теоретически, но можно создать линию с очень малыми потерями (с очень малыми  $R_0$  и  $G_0$  по сравнению с  $\omega L_0$  и  $\omega C_0$  соответственно) и считать её линией без потерь, для которой:  $\alpha=0$ ,  $\beta=\omega \sqrt{L_0 C_0}$ ,  $Z_B = \sqrt{L_0 / C_0}$ .

Стоячая электромагнитная волна – это процесс, получающийся от наложения падающей и отраженной волн с одинаковыми амплитудами. Иначе: стоячая электромагнитная волна – это волны напряжения и тока, которые не распространяются вдоль линии, а стоят на месте. Они возникают в линиях без потерь при холостом ходе или коротком замыкании в конце линии, а также при чисто реактивной нагрузке.

Четвертьволновый трансформатор – отрезок длинной линии без потерь длиной в четверть волны, применяемый для согласования линии без потерь с активной нагрузкой.

### 13 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Электромагнитное поле – вид материи, характеризующийся совокупностью взаимно связанных и взаимно обуславливающих друг друга электрического и магнитного полей.

Электромагнитное поле обладает характерными для него электрическими и магнитными свойствами, доступными наблюдению. Силовое воздействие поля на электрические заряды и токи положено в основу определения основных векторных величин, которыми характеризуют поле – напряженности электрического поля и индукции магнитного поля.

Электростатическое поле – это частный вид электромагнитного поля, который создается совокупностью электрических зарядов, неподвижных в пространстве по отношению к наблюдателю и неизменных во времени. При этом токи отсутствуют. Электростатическое поле определено, если известен закон изменения напряженности электрического поля или потенциала во всех точках этого поля.

Электростатическое поле – это потенциальное поле. Потенциал произвольной точки поля можно определить как работу, совершаемую силами поля по переносу единичного положительного заряда из данной точки поля в точку поля, потенциал которой равен нулю.

Напряженность электрического поля направлена от более высокого потенциала к более низкому. Если обозначить через  $dn$  расстояние по нормали между эквипотенциальными поверхностями, то мо-

доль напряженности поля равен:  $E = -d\varphi/dn$ , где  $d\varphi$  – приращение потенциала при переходе от точки одной поверхности к точке другой поверхности.

Статические магнитные поля (магнитостатические поля) – это магнитные поля, занимающие такие области пространства, в которых отсутствует плотность токов и которые не изменяются во времени.

Дифференциальный оператор Гамильтона (оператор набла) – это сумма частных производных по трем координатным осям, умноженных на соответствующие единичные векторы (орты).

Свободные заряды – это электрические заряды, которые под воздействием сил электрического поля могут свободно перемещаться в веществе.

Связанные заряды – это электрические заряды, входящие в состав вещества и удерживаемые в определенных положениях внутримолекулярными силами. Такие заряды неотделимы от данного вещества. При этом сумма положительных зарядов равна сумме отрицательных связанных зарядов.

Если какое-либо диэлектрическое тело поместить в электрическое поле, оно поляризуется. Поляризация – это упорядоченное изменение расположения связанных зарядов в теле, вызванное электрическим полем. Это проявляется в том, что отрицательные связанные заряды в теле переместятся в направлении более высокого потенциала, а положительные – в сторону более низкого потенциала насколько позволяют внутримолекулярные силы.

Произведение  $ql$  называют электрическим моментом двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов, находящихся друг от друга на расстоянии  $l$  (диполя). Это векторная величина, направленная от заряда  $-q$  к заряду  $+q$ .

Поляризованность (вектор поляризации)  $P$  – это электрический момент суммы диполей, находящихся в объеме вещества, отнесенный к этому объему при его стремлении к нулю. Единица измерения  $P$  – Кл/м<sup>2</sup>.

Вектор электрического смещения (вектор электрической индукции):  $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_a \vec{E}$ ,

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, характеризующая электрические свойства вакуума;

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость.

Единица измерения  $D$  – Кл/м<sup>2</sup>.

Теорема Гаусса в интегральной форме (соответствует закону Кулона и принципу наложения) можно сформулировать тремя способами:

1) поток вектора электрического смещения через любую замкнутую поверхность, окружающую некоторый объем, равен алгебраической сумме свободных зарядов внутри этой поверхности;

2) поток вектора напряженности электрического поля сквозь любую замкнутую поверхность равен сумме свободных зарядов, находящихся внутри этой поверхности, разделенной на произведение  $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ ;

3) поток вектора напряженности электрического поля через любую замкнутую поверхность создается не только суммой свободных зарядов, но и суммой связанных зарядов, находящихся внутри этой поверхности.

Задачи электростатики в зависимости от того, что задано и что определяют, можно разделить на три типа:

1) *задачи первого типа*: по заданному закону распределения потенциала в пространстве  $\varphi(x,y,z)$  найти распределение свободных зарядов, вызвавших поле. Такого рода задачи можно решать с помощью уравнения Пуассона;

2) *задачи второго типа*: задан закон распределения свободных зарядов в пространстве в функции координат  $\rho_{своб}(x,y,z)$  ( $\rho_{своб}$  – объемная плотность свободных зарядов). Найти закон изменения потенциала в пространстве  $\varphi(x,y,z)$ . Принципиально задача состоит в решении уравнения Пуассона относительно  $\varphi$ , т.е. в решении дифференциального уравнения второго порядка в частных производных;

3) *задачи третьего типа*: известны потенциалы (или полные заряды) и геометрия тел, создающих поле. Требуется найти закон изменения  $E$  или  $\varphi$  во всех точках поля.

Ток проводимости – упорядоченное движение свободных электронов в металле и ионов в жидкости под действием электрического поля.

Плотность тока  $J$  – это векторная величина, направленная по напряженности электрического поля и численно равная отношению тока  $\Delta i$ , протекающего через элемент поверхности  $\Delta S$  (перпендикулярный направлению напряженности электрического поля в данной точке), к величине  $\Delta S$  этой поверхности.

Если поверхность имеет конечные размеры, то ток есть поток

вектора плотности тока: 
$$I = \int_S \vec{J} d\vec{S} .$$

Обобщенный закон Ома в дифференциальной форме для областей, занятых источниками ЭДС, имеет вид:

$$\vec{J} = \gamma(\vec{E} + \vec{E}_{стор}),$$

где  $E_{стор}$  – напряженность стороннего поля.

Первый закон Кирхгофа в дифференциальной форме:  $div\vec{J} = 0$ , т.е. в установившемся режиме (при постоянном токе) в любой точке поля нет ни истока, ни стока линий тока проводимости.

Уравнение Лапласа: для электрического поля в однородной и изотропной проводящей среде:  $div\vec{E} = 0$ . Так как  $\vec{E} = -grad\varphi$ , то  $div(-grad\varphi) = \nabla^2\varphi = 0$  - уравнение Лапласа.

Таким образом, поле в однородной проводящей среде подчиняется уравнению Лапласа. Поле постоянного тока в проводящей среде является полем потенциальным. В нем в областях, не занятых источниками, выполняется равенство:

$$\oint \vec{E}d\vec{l} = 0.$$

Основные величины, характеризующие магнитное поле: магнитная индукция  $B$ , намагниченность  $M$ , напряженность магнитного поля  $H$ , связанные между собой соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0\mu\vec{H} = \mu_a\vec{H},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость.

Интегральная форма закона полного тока: количественная связь между циркуляцией вектора  $H$  по замкнутому контуру и током внутри контура определяется законом полного тока в интегральной форме – линейный интеграл от напряженности магнитного поля вдоль любого замкнутого контура равен полному току, пронизывающему замкнутый контур:

$$\oint \vec{H}d\vec{l} = I.$$

Здесь под полным током  $I$  понимают весь ток (ток проводимости и ток смещения), пронизывающий контур интегрирования.

Дифференциальная форма закона полного тока:  $rot\vec{H} = \vec{J}$ . Ротор – это функция, характеризующая поле в рассматриваемой точке в отношении способности к образованию вихрей.

Стационарное электрическое поле – электрическое поле в области пространства, где все плотности электрических зарядов и все токи

постоянны. Стационарное электрическое поле – это поле постоянного тока в среде с конечной проводимостью.

Стационарное магнитное поле – это магнитное поле постоянного тока.

Магнитный поток есть поток вектора магнитной индукции через некоторую поверхность:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}$$

Так как линии вектора магнитной индукции (силовые линии) нигде не прерываются (они представляют собой замкнутые сами на себя линии), то и магнитный поток, вошедший внутрь любого объема, равен магнитному потоку, вышедшему из того же объема, что говорит о непрерывности магнитного потока.

Скалярный магнитный потенциал  $\varphi_m$  характеризует магнитное поле в каждой отдельной точке области, не занятой током:

$$\vec{H} = -\text{grad}\varphi_m.$$

Падение магнитного напряжения – разность скалярных магнитных потенциалов между двумя точками. Если на пути от одной точки до другой точки есть магнитодвижущая сила (МДС), то нужно говорить не о падении магнитного напряжения, а о магнитном напряжении.

Магнитный экран – устройство, предназначенное для ослабления магнитного поля в заданной области пространства по сравнению с магнитным полем вне экрана.

Задачи расчета магнитных полей:

1) первый тип – определение индуктивности какого-либо контура или взаимной индуктивности двух контуров;

2) второй тип – определение сил, действующих в магнитном поле на движущийся электрон, неподвижный проводник с током, ферромагнитные массы в магнитном поле;

3) третий тип – расчет поля, создаваемого заданным распределением токов в пространстве;

4) четвертый тип – расчет магнитных экранов;

5) пятый тип – нахождение распределения токов в некотором объеме для получения заданной картины магнитного поля.

Переменное электромагнитное поле – это совокупность электрического и магнитного полей, изменяющихся во времени и взаимно связанных и обуславливающих друг друга. Оно определяется двумя векторными величинами – напряженностью электрического поля  $E$  и

напряженностью магнитного поля  $H$ . При исследовании процессов в переменном электромагнитном поле пользуются уравнениями Максвелла – системой из четырех уравнений, которую дополняют уравнение непрерывности и теорема Умова-Пойнтинга.

Первое уравнение Максвелла выражает связь между ротором напряженности магнитного поля и плотностью тока в той же точке поля:

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{J} + d\vec{D}/dt .$$

Смысл первого уравнения Максвелла состоит в том, что всякое изменение электрического смещения во времени в некоторой точке поля (т.е. возникновение в ней тока смещения) на таких же правах, как и ток проводимости, вызывает в этой точке вихрь магнитного поля, т.е. вызывает вихревое магнитное поле. Данное уравнение – это фактически закон полного тока в дифференциальной форме.

Второе уравнение Максвелла определяет связь между ротором напряженности электрического поля и скоростью изменения магнитного поля в той же точке поля:

$$\operatorname{rot}\vec{E} = d\vec{B}/dt .$$

Физический смысл второго уравнения Максвелла состоит в том, что всякое изменение магнитного поля во времени в какой-либо точке поля возбуждает в этой точке вихрь или ротор электрического поля, т.е. вызывает вихревое электрическое поле. Данное уравнение – это дифференциальная форма закона электромагнитной индукции.

Третье уравнение Максвелла  $\operatorname{div}\vec{B} = 0$  выражает принцип непрерывности магнитного потока.

Четвертое уравнение Максвелла  $\operatorname{div}\vec{E} = \mu_{\text{своб}}/\varepsilon_a$  выражает связь между истоком напряженности электрического поля и плотностью свободных зарядов в той же точке поля.

Формальная аналогия между векторными и скалярными величинами электрического и магнитного полей:

Электрические величины	Магнитные величины
Напряженность электрического поля $E$	Напряженность магнитного поля $H$
Электрическая индукция $D$	Магнитная индукция $B$
Поляризованность $P$	Намагниченность $M$
Электрический потенциал $\varphi$	Магнитный потенциал $\varphi_M$
Электрическая постоянная $\varepsilon_0$	Магнитная постоянная $\mu_0$
Относительная диэлектрическая	Относительная магнитная прони-

Электрические величины	Магнитные величины
проницаемость $\varepsilon$	цаемость $\mu$
Электрический ток $I$	Магнитный поток $\Phi$
Электродвижущая сила $E, e$	Магнитодвижущая сила $F$
Электрическое сопротивление $R$	Магнитное сопротивление $R_m$
Падение напряжения $U$	Падение магнитного напряжения $Hl$ или $\Phi R_m$

Сверхпроводимость – особое состояние проводящей среды, возникающее при понижении температуры до некоторой критической величины, при которой удельное сопротивление среды становится равным нулю при одновременном скачкообразном изменении магнитных и тепловых свойств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с. - Текст : непосредственный.

2. Попов, В. П. Основы теории цепей : учебник для вузов / В. П. Попов. - 3-е изд., испр. - М. : Высшая школа, 2000. - 575 с. - Текст : непосредственный.

3. Бакалов, В. П. Основы теории электрических цепей и электроники : учебник для вузов / В. П. Бакалов, А. Н. Игнатов, Б. И. Крук. – М.: Радио и связь, 1989. – 525 с. - Текст : непосредственный.

4. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. - Текст : непосредственный.

5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов / Л. А. Бессонов. – 8-е изд., переработ. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 262 с. - Текст : непосредственный.