

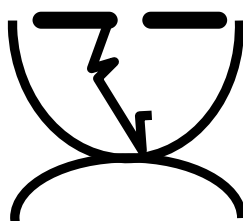
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ
(образован в 1953 году)**

Кафедра «Информационные технологии»

Иноземцев И.М., Краснов А.Е.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

*Учебно-практическое пособие
для студентов всех специальностей и всех форм обучения*



www.msta.ru

**Москва
2007**

УДК. 621.317

© Иноземцев И.М., Краснов А.Е. Электротехника и электроника. Общая электротехника и электроника. Электротехника. Учебно-практическое пособие. – М., МГТУТУ. 2007.

Рекомендовано институтом информатизации образования РАО.

В учебно-практическом пособии в систематическом виде изложено основное содержание дисциплин «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», а также «Электротехника», изучаемых студентами различных специальностей. В зависимости от числа часов, выделяемых на изучение этих дисциплин, изменяется глубина проработки тех или иных ее разделов, но не ее содержание. Это обстоятельство позволяет использовать при изучении перечисленных предметов одно учебное пособие. После изложения каждой темы приведены вопросы и тестовые задачи, позволяющие студенту самостоятельно контролировать степень усвоения раздела. В заключительной части пособия приведены вопросы к экзамену. В приложении приведены международные обозначения основных величин и основные используемые термины.

Пособие составлено в соответствии с программами по электротехническим дисциплинам для всех специальностей.

Авторы: Иноземцев Игорь Матвеевич проф., д. т. н.
Краснов Андрей Евгеньевич проф., д. ф-м. н.

Рецензенты: проф., д. т. н. С.Г. Сапфиров, к.п.н. С.А Пеняева.

Редактор: Н.И. Свешникова.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ.....	7
ТЕМА 1. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ – ИСХОДНАЯ БАЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ.....	7
1.1. Введение.....	7
1.2. Основные характеристики электромагниты полей.....	7
1.3. Распространение электромагнитного поля в вакууме и других средах ...	9
1.4. Понятие о векторе Умова-Пойтинга	10
1.5. Передача электроэнергии на большие расстояния	10
1.6. Распространение электромагнитного поля вдоль проводящих каналов, сформированных в диэлектриках и полупроводниках	12
1.7. Вопросы для самоконтроля по теме 1	13
1.8. Тест по теме 1	13
ТЕМА 2. МЕТОДЫ ПРИБЛИЖЕННОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ	14
2.1. Введение.....	14
2.2. Приближенное представление электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля напряжениями и токами	14
2.3. Приближенное представление э.д.с., напряжений и токов гармоническими функциями со случайными, медленно меняющимися амплитудами и фазами.....	15
2.3.1. Аналитическое представление э.д.с., напряжений и токов	16
2.3.2. Учет флуктуаций амплитуды и фазы при выполнении операций дифференцирования и интегрирования	17
2.4. Упрощенное описание э.д.с., напряжений и токов гармоническими функциями с постоянными параметрами.....	18
2.4.1. Представление элементов электрических цепей в комплексном виде..	19
2.4.2. Законы Ома и Кирхгофа в комплексном виде.....	20
2.4.3. Построение векторных диаграмм на вращающейся комплексной плоскости	21
2.4.4. Резонанс напряжений в цепи, состоящей из последовательно включенных катушки индуктивности и конденсатора	21
2.4.5. Резонанс токов при параллельном включении катушки индуктивности и емкости.....	23
2.4.6. Несинусоидальные периодические напряжения и токи.....	25
2.5. Вопросы для самоконтроля по теме 2	26
2.6. Тест по теме 2	26
ЧАСТЬ 2. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	27
ТЕМА 3. МНОГОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	27
3.1. Введение.....	27
3.2. Особенности построения многофазных электрических сетей	28

3.3. Включение приемников энергии по схеме «звезда»	29
3.4. Включение приемников по схеме «треугольника».....	30
3.5. Измерение напряжений, токов и мощности в трехфазных электрических системах	31
3.5.1. Измерение мощностей в четырехпроводных трехфазных системах	31
3.5.2. Измерения мощностей в трехпроводных трехфазных сетях	31
3.6. Вопросы для самоконтроля по теме 3	34
3.7. Тест по теме 3	35
ТЕМА 4. ТРАНСФОРМАТОРЫ	35
4.1. Однофазные трансформаторы.....	35
4.2. Трехфазные трансформаторы	37
4.3. Автотрансформаторы.....	37
4.4. Трансформаторные подстанции	39
4.5. Вопросы для самоконтроля по теме 4	39
4.6. Тест по теме 4.....	39
ЧАСТЬ 3. ЭЛЕКТРОНИКА.	
ТЕМА 5. ТРАНЗИСТОРЫ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ	41
5.1. Введение	41
5.2. Биполярные транзисторы	41
5.3. Мощные выходные усилители на биполярных транзисторах.....	44
5.4. Полевые каналные транзисторы с управляющим р-п переходом	44
5.5. МДП-транзистор с индуцированным проводящим каналом.....	45
5.6. МДП-транзисторы с встроенным проводящим каналом.....	45
5.7. Усилители сигналов на МДП-транзисторах.....	47
5.7.1. Усилитель импульсных сигналов на КМДП-транзисторах	48
5.7.2. Усилители слабых сигналов на КМДП-транзисторах.....	49
5.7.3. Автогенератор на КМДП-транзисторах.....	49
5.7.4. Логические схемы на МДП-транзисторах	49
5.8. Интегральные операционные усилители	50
5.9. Автогенераторы колебаний напряжения.....	52
5.9.1. Условия существования установившихся колебаний напряжения.....	53
5.9.2. Условия самовозбуждения колебаний напряжения.....	52
5.9.3. Автогенератор с мостом Вина в цепи обратной связи.....	53
5.9. Вопросы для самоконтроля по теме 5	55
5.10. Тест по теме 5	56
ТЕМА 6. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ТИРИСТОРЫ, ВЫПРЯМИТЕЛИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ	57
6.1. Полупроводниковые диоды	57
6.2. Выпрямители на полупроводниковых диодах	59
6.3. Мостиковый выпрямитель на полупроводниковых диодах	61
6.4. Тиристоры	62
6.5. Управляемые выпрямители на тиристорах	64
6.6. Импульсный выпрямитель с инвертором на мощном биполярном транзисторе	66

6.7. Стабилизаторы напряжения	67
6.7.1. Параметрические стабилизаторы напряжения.....	67
6.7.2. Компенсационные стабилизаторы напряжения.....	68
6.8. Вопросы для самоконтроля по теме б	69
6.9. Тест по теме б	70
Решение тренировочных заданий.....	70
Тест по дисциплине.....	70
Вопросы к экзамену	72
Список рекомендуемой литературы.....	74
Словарь основных понятий	74
Список принятых сокращений	75
Международная система единиц Си	75
Десятичные приставки, используемые при обозначении величин	76
Ответы на тесты.....	76

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплины «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника» и «Электротехника» для студентов неэлектрических специальностей включают в себя широкий круг вопросов, относящихся как к проблемам обеспечения предприятий пищевой промышленности электроэнергией, так и к проблемам использования последних достижений электроники в системах автоматического контроля и управления параметрами пищевых сред. При построении учебно-практического пособия учитывалось, что выпускники университета не будут в своей производственной деятельности заниматься разработкой и проектированием электротехнических систем и электронных устройств, а будут в основном сталкиваться с эксплуатацией готового оборудования. Поэтому изучение, например, особенностей проектирования магнитных цепей, необходимых разработчику трансформаторов, по мнению авторов, не является остро необходимым для технологов пищевых предприятий.

Второй не менее важный фактор, определяющий принятое построение учебного пособия – очень быстрое развитие электротехники и электроники. Практически каждые два-три года происходит смена элементной базы компьютеров, систем автоматизации и другого электронного и электротехнического оборудования. В связи с этим совершенно бессмысленно изучать построение конкретных электронных устройств, так как они к моменту окончания университета могут быть заменены новыми, построенными на других принципах.

Поэтому в первой части курса основное внимание уделяется рассмотрению принципиальных основ электротехники и электроники, а также упрощенных методов подхода к анализу и синтезу электротехнических и электронных систем. Изучение этих вопросов создает прочную базу фундаментальных знаний и позволяет будущему специалисту легко ориентироваться во вновь разработанных устройствах. При построении учебно-практического пособия учитывалось, то обстоятельство, что, многие физические процессы, используемые в основе электротехники и электроники, например, происходящие в твердом теле изучаются в курсе физики. В первой части пособия (темы 1 и 2) кратко рассматри-

ваются основные положения теории электромагнитного поля, приближенные методы представления основных параметров электромагнитного поля, а также вопросы передачи электроэнергии с помощью проводов и проводящих каналов

Во второй части курса (темы 3 и 4) рассматриваются основные проблемы электроснабжения предприятий и многофазные (трехфазные) электрические цепи.

Третья часть учебного пособия посвящена электронике. В теме 5 изучаются современные электронные устройства на интегральных полупроводниковых микросхемах. Тема 6 посвящена рассмотрению выпрямителей на полупроводниковых диодах и тиристорах. В том числе рассматриваются импульсные выпрямители с инверторами, используемые в ЭВМ и устройствах автоматического управления электродвигателями.

В зависимости от числа часов, выделяемых на изучение электротехники и электроники, изменяется глубина проработки тех или иных ее разделов, но не их содержание. Это обстоятельство позволяет использовать при изучении перечисленных предметов одно учебное пособие. Студенты неэлектрических специальностей с малым числом часов, выделяемых на изучение дисциплины, могут ограничиваться ознакомлением темами 1 и 2 без глубокого их изучения. Они большее внимание должны уделять изучению тем 5,6, а также 3,4, в которых рассмотрены особенности электроснабжения предприятий и других потребителей электрической энергии с помощью многофазных электрических сетей. Студентам технологических специальностей большее внимание необходимо уделять изучению вопросов построения контрольно-измерительной систем и изучению особенностей использования электротехнических устройств в технологических процессах и т.д.

ВВЕДЕНИЕ

Изложение теоретических основ электромагнитного поля и само построение курса «Электротехника и электроника» во многом зависит от тех упрощающих предположений, которые делаются теми или другими авторами.

Известно, (см. например [1, 2, 5]), что строгое рассмотрение процессов распространения и особенно воздействия электромагнитных полей на различные среды может быть проведено только при использовании теории случайных процессов. Однако при этом естественно возникают существенные математические трудности. Поэтому, как правило, авторы учебников используют упрощения, позволяющие с тем или иным приближением решать практические задачи с допустимой степенью погрешности. При этом во многих учебных пособиях вопросы допустимости сделанных предположений часто даже не обсуждаются.

К сожалению, при выборе упрощенных методов часто забывают об ограниченности полученных результатов и недопустимости делать на основании их выводы о действительном характере реальных физических процессов.

Часто в погоне за кажущейся простотой объяснения протекающих в электрических и электронных цепях физических процессов, вводятся понятия и развиваются представления, не имеющие никакого отношения к действительным. Так введение понятия электрического тока сопровождается вычислениями ско-

рости дрейфа электронов и положительных зарядов в полупроводниках. В то время как давно теоретически и экспериментально установлено, что электромагнитные поля распространяются вдоль проводников и других проводящих каналов со скоростью близкой к скорости света.

Большинство упрощенных подходов к анализу и синтезу электрических систем, хотя они иногда и позволяют получать правдоподобные результаты, не предохраняют от принципиальных ошибок. Например, пренебрежение нелинейными эффектами в электрических цепях приводит к рекламированию в средствах массовой информации различных устройств типа вечных двигателей с коэффициентом полезного действия больше единицы. Примером таких ошибочных подходов является также упрощенное рассмотрение ряда задач в электростатике и теории цепей постоянного тока.

В окружающей нас природе не существует неизменных во времени зарядов и постоянных электрических полей. Параметры всех без исключения электромагнитных полей изменяются во времени, как и изменяются характеристики среды, в которой распространяются электромагнитные поля.

В настоящем учебном пособии делается попытка обосновать те упрощающие предположения, которые делаются при рассмотрении тех или иных процессов в электротехнических и электронных системах.

ЧАСТЬ 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

ТЕМА 1 .ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ – ИСХОДНАЯ БАЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

Принципы работы электротехнических систем и электронных устройств могут быть хорошо поняты и усвоены только при хорошем знании основных положений теории электромагнитного поля. Поэтому целесообразно начать изучение электротехники и электроники с напоминания основных положений теории электромагнитного поля. При этом основное внимание уделяется рассмотрению характеристик реальных электромагнитных полей, а также тем разделам, которые связаны с изучением особенностей распространения электромагнитного поля вдоль проводов и проводящих каналов.

1.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Электромагнитное поле представляет собой вид материи, имеет массу, и характеризуется взаимосвязанными случайными векторами напряженности электрической составляющей поля \vec{E} [В/м] и напряженности магнитной составляющей \vec{H} [А/м].

В квантовой электродинамике электромагнитное поле рассматривается одновременно как волна и частица и вводится понятие кванта. Принято, что энергия отдельного кванта ($\hbar\omega$) электромагнитного поля измеряется в электронвольтах ($1\text{эВ}=1,6\cdot 10^{-19}$ эрг) и пропорциональна средней частоте колебаний

электромагнитного поля:

$$\dot{W} = h \cdot f \quad [\text{эВ}], \quad (1.1)$$

где h – постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек

f – средняя частота спектра колебаний векторов электромагнитного поля.

Величина кванта электромагнитного излучения меняется в очень широких пределах и очень мала для низкочастотных электромагнитных полей. Поэтому при анализе и синтезе электротехнических и электронных устройств, работающих на относительно низких частотах использование понятия кванта затруднительно. Существенным недостатком использования понятия кванта, в этих случаях является также усложнение учета изменения интенсивности электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля.

Основные свойства электромагнитного поля могут быть достаточно строго описаны совокупностью взаимно связанных случайных векторов, характеризующих напряженности электрической и магнитной составляющей поля. Векторы напряженности электрической и магнитной составляющей поля повернуты в пространстве на 90 градусов и являются в общем случае случайными нестационарными непрерывно изменяющимися во времени величинами.

При этом всякое изменение напряженности электрической составляющей поля, в том числе вызванное изменением параметров среды, приводит к изменению напряженности магнитной составляющей поля. Чем быстрее меняется напряженность электрической составляющей поля (\vec{E}), тем больше напряженность магнитной составляющей поля (\vec{H}). Аналогично всякое изменение напряженности магнитной составляющей приводит к изменению электрической составляющей поля.

Частоты колебаний электромагнитных полей, используемых в различных электротехнических и электронных устройствах, изменяются в очень больших пределах от 10^{20} Гц для гамма-лучей до единиц Герца в системах сверхдальней связи. К широко используемым в электронике диапазонам частот относятся сверхнизкие (единицы и десятки Герц), низкие (50...60 Герц), радиочастоты, сверхвысокие частоты, инфракрасные, оптические видимые частоты, рентгеновские, ультрафиолетовые и даже гамма-излучения. Во всех этих диапазонах частот создано множество различных устройств и приборов. Особенно интенсивно освоение новых частотных диапазонов происходит в настоящее время в результате все увеличивающегося использования новых открытий. Необходимо отметить, что в основе разработки все новых приборов и устройств лежат теоретические исследования, базирующиеся на применении основных положений квантовой электродинамики, учитывающий как волновую природу электромагнитного поля, так и особенности квантования излучения энергии.

В тех случаях, когда скорость изменения напряженности электрической составляющей поля очень мала в некоторых работах делаются попытки пренебрегать влиянием неизбежно возникающей вихревой составляющей магнитного поля и приближенно рассматривать воздействие только электрической составляющей (электростатика, цепи постоянного тока). Однако использование такого приближения, как правило, не допустимо и в ряде случаев приводит к ошибоч-

ным результатам и выводам.

Действительно, практически все существующие в природе электромагнитные поля непрерывно изменяются во времени и эти изменения имеют случайный характер. При анализе синтезе систем не желательно также отдельно рассматривать действие электрических и магнитных составляющих поля. Строгий анализ воздействия электромагнитного поля на любые среды может быть проведен только при учете влияния как электрической, так и магнитной составляющей поля и что особенно важно при учете того, что электромагнитное поле представляет собой случайный процесс.

1.3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ВАКУУМЕ И ДРУГИХ СРЕДАХ

Электромагнитное поле представляет собой один из видов материи и состоит из неразрывной совокупности, непрерывно изменяющихся во времени и пространстве взаимосвязанных электрических и магнитных составляющих. Характерная особенность электромагнитного поля - непрерывное распространение его в окружающей среде во все стороны пространства от точки возникновения. При этом в вакууме электромагнитное поле распространяется со скоростью света приближенно равной $c=3 \cdot 10^8$ м/сек.

В изотропной среде с постоянными во времени параметрами ϵ_a и μ_a скорость распространения электромагнитного поля (v) определяется выражением:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} * \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = c \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad (1.2)$$

где

ϵ_a – абсолютное значение диэлектрической постоянной среды, в которой распространяется электромагнитное поле,

ϵ_0 – значение диэлектрической постоянной для вакуума,

$\epsilon = \epsilon_a / \epsilon_0$ – относительная диэлектрическая постоянная среды, в которой распространяется электромагнитное поле,

μ_a – абсолютное значение магнитной проницаемости среды, в которой распространяется электромагнитное поле,

μ_0 – значение магнитной проницаемости для вакуума,

$\mu = \mu_a / \mu_0$ – относительное значение магнитной проницаемости среды.

В тех случаях, когда среда, в которой распространяется электромагнитное поле, анизотропна, то есть ее параметры не одинаковы в различных направлениях, для описания ее свойств обычно используется тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости среды.

При распространении электроэнергии вдоль проводов без изоляции, находящихся в свободном воздушном пространстве, значения ϵ и μ близки к единицы и электромагнитная энергия практически передается от электростанции к потребителю со скоростью света в вакууме. При использовании проводов, покрытых диэлектриком скорость распространения электромагнитного поля уменьшается и определяется выражением:

$$V=c/\sqrt{\epsilon}, \quad (1.3)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика, покрывающего провода.

Аналогично при передаче электроэнергии по силовым экранированным кабелям, заполненным пластическим материалом с $\mu =1$, $\epsilon =9...16$ скорость передачи энергии уменьшается соответственно в 3 ...4 раза.

Среды, в которых распространяются электромагнитные поля, в общем случае могут быть как линейными, так и нелинейными. При этом их параметры могут оставаться постоянными или изменяться во времени (параметрические среды), а также изменяться под воздействием интенсивного электромагнитного поля (нелинейные среды). Кроме этого параметры реальных сред непрерывно и случайным образом изменяются во времени. Соответственно непрерывно изменяются и напряженности электрической и магнитной составляющих поля. Естественно непрерывно случайным образом изменяются во времени и скорость распространения электромагнитной волны. Таким образом, в общем случае скорость распространения электромагнитного поля в реальных средах является случайной величиной. Соответственно при решении теоретических задач необходимо учитывать особенности распространения электромагнитного поля в различных материальных анизотропных средах с изменяющимися во времени случайным образом параметрами.

1.4. ПОНЯТИЕ О ВЕКТОРЕ УМОВА-ПОЙТИНГА

Направление распространение электромагнитного поля в пространстве определяется вектором Умова-Пойтинга ($\vec{\Pi}$), представляющим собой векторное произведение \vec{E} и \vec{H} и определяющим поток энергии через площадку в 1 м^2

$$\vec{\Pi}=[\vec{E} \cdot \vec{H}], \text{ размерность } [B \cdot A / \text{ м}^2], \quad (1.4)$$

где: \vec{E} – напряженность электрической составляющей поля, измеряемая в Вольтах на метр [В/м],

\vec{H} – напряженность магнитной составляющей поля, измеряемая в Амперах на метр [А/м].

При распространении электромагнитной энергии вдоль сверхпроводящих проводов вектор Умова-Пойтинга направлен вдоль проводов и вся электромагнитная энергия распространяется в пространстве вдоль проводов со скоростью близкой к скорости света. При распространении электромагнитного поля вдоль медных или алюминиевых проводов часть энергии поля теряется на их нагрев. Соответственно появляется составляющая вектора Умова-Пойтинга, направленная перпендикулярно к проводам. Величина потерь на нагрев проводов естественно зависит от интенсивностей составляющих электромагнитного поля и материала проводов.

1.5. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

В настоящее время электроэнергия вырабатывается преимущественно мощными электростанциями, расположенными далеко от потребителей. В результате этого возникает необходимость ее передачи на большие расстояния.

В принципе электромагнитную энергию можно передавать от источника к потребителю в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) и в оптическом диапазоне частот. Именно в таком виде поступает на Землю электромагнитная энергия от Солнца. Спектр излучения Солнца постигается от крайне низких частот, порядка нескольких Герц, до ультрафиолетовых и даже рентгеновских частот. Однако при настоящем уровне развития техники передача больших количеств электроэнергии через свободное пространство практически затруднительна. Поэтому в настоящее время электроэнергия передается по открытым линиям передачи с помощью проводов из алюминия и меди или с помощью экранированных кабелей.

При этом в тех случаях, когда электрическая энергия вырабатывается на относительно низких частотах (50 или 60 Гц), экономически более выгодно передавать ее с помощью высоковольтных линий электропередачи. Как уже отмечалось, в этом случае электромагнитное поле распространяется в диэлектрике, окружающем металлический провод и только незначительная часть энергии проникает в провод и тратится на его нагревание. Для передачи электроэнергии на большие расстояния в настоящее время в основном используются проводящие каналы из металлических алюминиевых или медных проводов. При этом используются как открытые воздушные линии, так и экранированные подземные кабели. В обоих случаях электромагнитная энергия распространяется в диэлектрике, окружающий проводник и только незначительная часть ее (доли процента) теряется на нагрев проводника. При использовании открытых проводников некоторая часть передаваемой энергии излучается в свободное пространство.

Излучаемая в свободное пространство энергия незначительна (доли процента), если длина линии передачи значительно меньше половины длины волны равной 6000 км при частоте 50 Гц и практически линейно возрастает по мере увеличения длины линии передачи.

Как уже отмечалось выше, передача электроэнергии в настоящее время производится с использованием переменного напряжения. Это объясняется возможностью использования для изменения величины переменного напряжения трансформаторов.

Практически электромагнитное поле проникает в металл проводов на глубину несколько сот нанометров. В общем случае величина потерь в проводах зависит от мощности передаваемой электроэнергии, концентрации примесей в металле проводов и температуры. Естественно, чем сильнее нагревается провод, тем больше потери. Поэтому провода приходится выбирать тем толще, чем больше передаваемая по ним мощность и чем больше в металле проводов примесей. Окисление проводов в влажной среде, приводит к образованию на их поверхности пленки диэлектрика и также естественно увеличивает потери.

Серьезной проблемой при использовании открытых линий передачи на большие расстояния является возрастание потерь, вызванных увеличением излучения электроэнергии в свободное пространство.

Необходимо помнить, что при передаче электроэнергии на постоянном токе (при $f=0$ Гц), электромагнитное поле также распространяется вдоль проводов со

скоростью близкой к скорости света. При этом резко уменьшаются потери энергии на излучение в свободное пространство. Потери энергии в проводах в этом случае практически не уменьшаются. Существенно можно их уменьшить при использовании сверхпроводников. В настоящее время передача электроэнергии с использованием сверхпроводников практически не используется, главным образом из-за того, что их необходимо охлаждать до очень низкой температуры. При этом энергия, требующаяся на охлаждение, превышает потери электроэнергии при передаче ее по экранированным проводам.

1.6. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВДОЛЬ ПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ, СФОРМИРОВАННЫХ В ДИЭЛЕКТРИКАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В электронных устройствах и приборах наряду с проводниками из металла широко используется передача электромагнитного поля вдоль искусственно создаваемых специальных проводящих каналов. Как правило, проводящий канал образуется искусственно в диэлектрике или полупроводнике путем повышения концентрации электронов или ионов. Чем больше концентрация электронов или ионов в образованном канале, тем больше его проводимость. Это позволяет создавать активные полупроводниковые элементы, в которых возможно управление интенсивностью электромагнитного излучения на выходе элемента. На этом принципе построены полевые транзисторы, тиристоры, фототранзисторы и ряд других полупроводниковых приборов.

Устройства этого типа принято использовать для усиления, т.е. управления мощностью электрического сигнала на их выходе. Наибольшее распространение получили усилители сигналов на полевых транзисторах. Именно полевые транзисторы используются при построении микропроцессоров и устройств памяти электронно-вычислительных машин (ЭВМ). В этом случае электромагнитное поле, создаваемое источником питания, распространяется в полупроводнике, окружающем проводящий канал. Электромагнитное поле распространяется со скоростью близкой к скорости света.

Благодаря тому, что напряжения и токи очень малы, только незначительная часть энергии поля тратится на нагрев самого проводящего канала. Это обстоятельство позволило создать совершенные полупроводниковые приборы (МДП-транзисторы и конденсаторы) с очень малыми размерами (сотни нанометров) и очень малым потреблением энергии (доли микроватта) и размещать на одном квадратном сантиметре полупроводникового кристалла до миллиона транзисторов.

Необходимо отметить, что проводящие каналы возникают в диэлектриках в естественных условиях. Примером образования такого проводящего канала в диэлектрике является разряд молнии. В этом случае проводящий канал в воздухе (диэлектрике) образуется между отрицательно заряженной поверхностью Земли и положительно заряженными облаками. Часто образование проводящего канала происходит между облаками, носящими заряды противоположного знака. Иногда предвестником образования проводящего канала между поверхностью Земли и облаками является образование тлеющего разряда (огни Эль-

ма). Наиболее часто проводящий канал образуется в результате ионизации молекул воздуха короткими импульсами, возникающими при быстром перемещении облаков. В некоторых случаях проводящие каналы образуются потоками корпускулярных частиц, достигающих поверхности Земли при вспышках на Солнце. Возможно образование проводящих каналов высокоэнергетическими потоками космических лучей.

Во всех этих случаях при разряде молнии электромагнитное поле распространяется в диэлектрике (воздухе) вдоль предварительно образовавшегося проводящего канала. Большие напряженности электромагнитного поля, распространяющегося вдоль проводящего канала, при разряде молнии приводят к возникновению ряда опасных явлений: в том числе интенсивным световым, акустическим и механическим воздействиям на окружающую среду.

Характерная особенность разряда молнии – самоуничтожение проводящего канала интенсивным магнитным полем. Аналогичное явление самоуничтожения проводящего канала отмечается при пробое МДП – конденсаторов, используемых в устройствах динамической памяти ЭВМ.

Создание и управление проводимостью искусственно организованных проводящих каналов широко используются в полупроводниковых полевых МДП-транзисторах. В этом случае проводящий канал между истоком и стоком транзистора образуется путем подачи управляющего напряжения на затвор транзистора и накопления отрицательных или положительных зарядов на обкладке МДП-конденсатора, образующего затвор транзистора.

1.7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ 1.

1. С какой скоростью распространяется электромагнитное поле в вакууме и свободном воздушном пространстве?
2. С какой скоростью распространяется электромагнитное поле в кабеле, заполненном газом с относительной диэлектрической постоянной, равной 9?
3. Как направлен вектор Пойтинга-Умова при передаче электроэнергии по сверхпроводящему кабелю. Почему в этом случае нет потерь на нагрев проводов и излучение энергии в пространство?
4. Почему потери энергии уменьшаются при увеличении диаметра провода?
5. Какие дополнительные составляющие вектора Умова-Пойтинга появляются при передаче электроэнергии вдоль открытых воздушных проводов из меди или алюминия?
6. Как проявляется взаимосвязанность электрической и магнитной составляющей электромагнитного поля?
7. Как воздействуют электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля высоковольтных линий электропередачи на человека, животных, растения?
8. Какими параметрами характеризуется электромагнитное поле?
9. Как связана энергия кванта электромагнитного излучения с его частотой?
10. Чем отличается спектр излучения оптического квантового генератора от спектра излучения нагретого тела?

1.8. ТЕСТ ПО ТЕМЕ 1.

1. Определить длину волны колебаний электромагнитного поля изменяющегося с частотой 10 МГц, распространяющихся в среде, с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 20 и относительной магнитной проницаемостью, равной 5. **Ответы**, один из которых правильный: 3м; 5м; 10м; 1м.
2. Определить скорость распространения электромагнитного поля в экранированном кабеле, если диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего кабель, равна 9. **Ответы**, один из которых правильный: 10^8 м/с; $4 \cdot 10^8$ м/с; $9 \cdot 10^8$ м/с; $0,5 \cdot 10^8$ м/с.
3. Определить центральную частоту излучения светодиода, излучающего зеленый свет. **Ответы**, один из которых правильный: 10^{15} Гц; $0,6 \cdot 10^{15}$ Гц; $2 \cdot 10^{15}$ Гц; $0,8 \cdot 10^{15}$ Гц.
4. Определить, как изменится скорость распространения электромагнитного поля при вхождении луча оптического квантового генератора в среду с диэлектрической проницаемостью, равной 9. **Ответы**, один из которых правильный: 1, 2, 3, 4, 5.
5. Определить частоту излучения оптического квантового генератора, если длина волны его в вакууме, равна 0,1 мкм. **Ответы**, один из которых правильный: 10^{15} Гц, $0,42 \cdot 10^{15}$ Гц, $2 \cdot 10^{15}$ Гц, $5 \cdot 10^{15}$ Гц

ТЕМА 2. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

2.1. ВВЕДЕНИЕ

Как уже отмечалось, строгое рассмотрение процессов происходящих в электрических и электронных системах с учетом их случайного характера в большинстве случаев приводит к большим математическим трудностям. Поэтому для упрощенного анализа электрических цепей и для приближенных инженерных расчетов широко используются упрощенные методы. При этом делается ряд предположений, которые в той или иной степени выполняются на практике. Основой для существенного упрощения методов анализа и синтеза систем в тех случаях, когда электромагнитное поле создается в виде случайных гармонических колебаний, являются различия в скорости изменения параметров электромагнитного поля.

Действительно в этом случае основные характеристики поля остаются случайными, то есть непрерывно и случайно изменяющимися во времени, но амплитуда колебаний и их начальная фаза более медленно изменяются по сравнению со скоростью изменения частоты колебаний. Это справедливо и для излучений оптического квантового генератора и для близких по форме к гармоническим колебаниям напряжения в электрических сетях частоты 50 Гц.

2.2. ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ТОКАМИ

Существенное упрощение анализа и синтеза электрических систем достигается при представлении электрической составляющей поля эквивалентными электродвижущими силами и напряжениями. При этом вводимое понятие на-

пряжение связано с модулем вектора напряженности электрического поля \vec{E} простым соотношением:

$$U = |\vec{E}| \cdot d, \quad (2.1)$$

где d – расстояние между проводниками или электрическими зарядами.

Еще большее упрощение достигается при введении вместо магнитной составляющей электромагнитного поля понятия об эквивалентном электрическом токе. Известно, что напряженность магнитной составляющей поля можно представить как интеграл по замкнутому контуру от условного понятия тока будто бы протекающего через контур (закон полного тока). Иногда понятие тока вводится как поток движущихся в рассматриваемой среде положительных или отрицательных зарядов (см. например, [1, 2]).

Такое представление напряженности магнитной составляющей электромагнитного поля является чисто условной абстракцией, но существенно упрощает анализ и синтез электрических цепей и систем. Введенное таким образом понятие тока, который измеряется в Амперах, широко используется в литературе и является привычным для студентов, так как вводится в курсе физики. Ниже понятие тока будет использоваться при рассмотрении как электротехнических, так и электронных систем и устройств.

Еще раз считаем необходимым напомнить, что введенное понятие тока – чистая абстракция, так как вдоль проводов и любых проводящих каналов распространяются электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля и никакого потока движущихся электронов внутри проводов нет.

2.3. ПРИБЛИЖЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭДС, НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ ГАРМОНИЧЕСКИМИ ФУНКЦИЯМИ СО СЛУЧАЙНЫМИ, МЕДЛЕННО МЕНЯЮЩИМИСЯ АМПЛИТУДАМИ И ФАЗАМИ

Как уже отмечалось, параметры электромагнитного поля – случайные величины и при их описании необходимо использовать математический аппарат теории случайных процессов. Особенно удобно использовать математический аппарат случайных процессов в тех случаях, когда электродвижущие силы и напряжения носят колебательный характер и могут быть представлены случайными функциями времени. Такое представление хорошо согласуется с экспериментальными данными и может использоваться для описания электромагнитных полей, создаваемых как оптическими квантовыми генераторами (ОКГ), так и генераторами электромагнитных излучений всех типов, работающих на более низких частотах вплоть до долей Герца.

В системах электроснабжения предприятий случайный характер изменения напряжений и тока определяется прежде всего непрерывными изменениями величины тока нагрузки. Кроме того величина напряжения, вырабатываемого каждым из генераторов, изменяется случайным образом вследствие изменения во времени магнитного потока, параметров цепей возбуждения и нестабильности скорости вращения ротора генератора. Случайные флуктуации мощности возникают в линиях передачи электроэнергии также из-за нелинейности характеристик нагрузок электрической сети.

Из-за случайного характера колебаний напряжения в электрической сети

ширина энергетического спектра на уровне -3 дБ, оказывается обычно равной 1..2 Гц; а на уровне - 80 дБ, равным -40 Гц . Центральная частота спектра часто не совпадает с номинальной частотой, равной 50 Гц. Как показывают измерения, в некоторых энергетических системах центральная частота спектра отличается на 1-2 Гц от номинальной.

2.3.1. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ Э.Д.С., НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Таким образом, при достаточно общих предположениях, хорошо выполняющихся на практике, электродвижущую силу (э.д.с.), переменное напряжение и ток, можно представить в виде произведения случайной амплитуды $U_m(t)$ и гармонической функции случайной фазы $\Psi(t)$.

Как известно, такое представление электрических величин требует наложения определенных ограничений на сомножители, которые в общем случае нельзя выбирать произвольно. Для устранения неоднозначности наиболее целесообразно использовать представление переменного напряжения в электрической цепи в комплексном аналитическом виде:

$$\hat{U}(t) = u(t) + j\hat{u}(t) = U_m(t) \exp[j\psi(t)]; \quad (2.4)$$

$$\text{где } U_m(t) = |\hat{U}(t)| = \sqrt{u^2(t) + \hat{u}^2(t)}; \quad (2.5)$$

$$\psi(t) = \arctg \frac{\hat{u}(t)}{u(t)}, \quad (2.6)$$

$u(t)$ - реальное напряжение в электрической цепи;

$\hat{u}(t)$ -дополняющая компонента, связанная с $u(t)$ преобразованием Гильберта:

$$\hat{u}(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(\tau)}{\tau - t} d\tau \quad (2.7)$$

$$u(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{u}(\tau)}{\tau - t} d\tau \quad (2.8)$$

При этом выражение для реального напряжения может быть представлено в виде:

$$u(t) = \text{Re}\{\hat{U}(t)\} = U_m(t) \cos \psi(t) \quad (2.9)$$

Такое представление переменного (в общем случае случайного) напряжения $u(t)$ имеет следующие преимущества:

а) амплитуда и фаза напряжения связаны между собой единственным обра-

зом, что исключает неоднозначность;

б) комплексный спектр напряжения $U(\omega)$ отличен от нуля только при положительных ω , причем спектры напряжений $u(t)$ и $\hat{u}(t)$ совпадают по форме и отличаются только масштабным множителем, т.е. спектр комплексного напряжения в этом случае имеет ту же структуру, что и спектр исходного реального напряжения $u(t)$;

в) представление переменного напряжения в комплексном виде (2.9) может быть применимо как к быстро, так и к медленно изменяющимся напряжениям в электрических и электронных цепях,

В тех случаях, когда зависимость напряжения от времени $u(t)$ характеризуется быстрым изменением со средней круговой частотой $\omega_{cp} = 2\pi f_{cp}$, можно считать, что за время, равное по крайней мере нескольким периодам, амплитуда и фаза остаются практически неизменными.

Выражение для комплексного аналитического представления переменного флуктуирующего напряжения может быть записано в виде:

$$U(t) = U_m(t) \exp\{j[\omega_{cp}t + \varphi(t) + \varphi_0]\} \quad (2.10)$$

или
$$U(t) = \dot{U}_m(t) \exp\{j\omega_{cp}t\} \quad (2.11)$$

где $\hat{U}_m(t)$ - комплексная огибающая узкополосного случайного процесса:

$$\dot{U}(t) = U_m(t) \exp\{j[\varphi(t) + \varphi_0]\} \quad (2.12)$$

ω_{cp} - средняя круговая частота, определяемая выражением:

$$\omega_{cp} = \frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \omega U(\omega) d\omega \quad (2.13)$$

где σ - дисперсия флуктуаций напряжения, квадрат которой определяется из выражения:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega) d\omega \quad (2.14)$$

$U(\omega)$ - энергетический спектр напряжения $u(t)$, определяющийся выражением:

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \exp[-j\omega t] dt \quad (2.15)$$

2.3.2. УЧЕТ ФЛУКТУАЦИЙ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАЦИЙ ДИФЕРЕНЦИРОВАНИЯ И ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Флуктуации амплитуды и фазы напряжения и тока в электрической цепи

необходимо учитывать при выполнении операций дифференцирования и интегрирования. Пусть, например,

$$a(t) = R_e \{ A(t) \exp \{ j[\omega t + \varphi(t)] \} \} \quad (2.16)$$

В случае, когда $A(t) = A_0$ или $\varphi(t) = \varphi_0$, т.е. амплитуда и фаза постоянны, первая производная имеет вид:

$$\frac{da(t)}{a(t)} = R_e \{ (j\omega) A_0 \exp [j\omega t + \varphi_0] \} \quad (2.17)$$

Собственно n-ая производная равна

$$\frac{d^n a(t)}{dt} = R_e \{ (j\omega)^n A_0 \exp [j(\omega t + \varphi_0)] \} \quad (2.18)$$

Из рассмотрения выражений (2.17) и (2.18) видно, что операция дифференцирования эквивалентна умножению исходного выражения (2.16) на « $j\omega$ ».

Аналогично оказывается, что операция интегрирования эквивалентна делению выражения (2.16.) на « $j\omega$ ». Соотношения (2.17), (2.18) положены в основе широко применяемого символического метода расчета электрических цепей

При анализе или синтезе реальных электрических и электронных цепей с учетом флуктуаций амплитуды и фазы напряжения производную по времени от выражения (2.16.) необходимо представлять в следующем виде:

$$\frac{da(t)}{dt} = \text{Re} \left\{ \left[j \left(\omega - \frac{d\varphi(t)}{dt} + \frac{1}{A(t)} \frac{dA(t)}{dt} \right) \right] A(t) e^{j[\omega t + \varphi(t)]} \right\} \quad (2.19)$$

Соответственно n-ая производная по аналогии с (2.19) принимает вид:

$$\frac{d^n a(t)}{dt} = \text{Re} \left\{ \left[j \left(\omega - \frac{d\varphi(t)}{dt} + \frac{1}{A(t)} \frac{dA(t)}{dt} \right) \right]^n A(t) e^{j[\omega t + \varphi(t)]} \right\} \quad (2.20)$$

Как следует из выражений (2.19) и (2.20), оператор « $j\omega$ », используемый при символическом методе, следует везде заменить на оператор:

$$\left\{ \left[\omega + \frac{d\varphi}{dt} \right] - j \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right\}. \quad (2.21.)$$

2.4. УПРОЩЕННОЕ ОПИСАНИЕ Э.Д.С., НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ ГАРМОНИЧЕСКИМИ ФУНКЦИЯМИ С ПОСТОЯННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Основным преимуществом такого представления электромагнитного поля является существенное упрощение расчетов электрических цепей, а также возможность графического решения ряда задач. Например, анализ процессов в электрической цепи состоящей из последовательно или параллельно включенных резистора (R), индуктивности (L) и емкости (C), которые описываются в общем случае интегрально-дифференциальными уравнениями, может быть проведен путем достаточно простых построений на комплексной плоскости.

В основе этого широко используемого упрощенного метода анализа электрических цепей положено представление гармонического колебания (э.д.с., напряжения, токов) в следующем виде:

$$a(t) = A \operatorname{Re} \left\{ e^{j(\omega t + \varphi)} \right\} = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.22)$$

или $a(t) = A \operatorname{Im} \left\{ e^{j(\omega t + \varphi)} \right\} = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.23)$

где A и φ - амплитуда и начальная фаза гармонического колебания;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота колебаний; [радиан/с],

f - частота колебаний, [Гц.],

$\operatorname{Re}\{ \}$ -символ, означающий, что берется действительная часть,

$\operatorname{Im}\{ \}$ -символ, означающий, что берется комплексная часть

Обычно символы Re или Im опускают и полагают, что

$$a(t) = A e^{j(\omega t + \varphi)} = \dot{A} e^{j\omega t}, \quad (2.24)$$

где $\dot{A} = A e^{j\varphi}$ – комплексная амплитуда.

В выражении (2.24.) комплексная амплитуда A принимается постоянной величиной, не зависящей от времени.

Представление э.д.с., напряжений и токов в виде радиус- векторов на комплексной плоскости является условным, но весьма удобным приемом.

При графической интерпретации колебания предполагают, что вектор A вращается на комплексной плоскости против часовой стрелки с неизменной угловой скоростью. При сложении или вычитании нескольких гармонических колебаний одной частоты, представленных в виде $\dot{A} e^{j\omega t}$, множитель $e^{j\omega t}$ опускают и производят все операции над комплексными амплитудами, используя аппарат векторной алгебры. После определения амплитуды и фазы результирующего колебания мгновенное значение $a(t)$ может быть определено из выражений (2.22) или (2.23).

При таком представлении колебаний напряжения или тока, алгебраическому сложению или вычитанию мгновенных или действующих значений синусоидальных величин соответствуют геометрическое сложение или вычитание радиус-векторов.

Необходимо еще раз напомнить, что использование такого описания процессов в цепях переменного тока допустимо только при условии, что A и φ в выражениях (2.22)...(2.24) являются постоянными величинами, и что представление переменного напряжения или тока гармоническими функциями (2.22), (2.23) является идеализацией, не учитывающей того, что реальная форма напряжения, вырабатываемого генераторами близка к трапеции.

2.4.1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В КОМПЛЕКСНОМ ВИДЕ

Для упрощения расчетов электрических цепей целесообразно также перейти к комплексному представлению элементов электрических цепей. При этом комплексные величины элементов цепи принято выделять подчеркиванием снизу. При этом выражение для полного сопротивления последовательно включенных элементов электрической цепи R - L - C записывается в следующем виде:

$$\underline{Z} = |\underline{Z}| \exp[j\varphi] = R + j\underline{X}, \quad (2.25)$$

где - $|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ – модуль полного комплексного сопротивления ($Z=R+jX$) цепи, состоящей из последовательно включенных элементов R-L-C, $\varphi = \arctg X/R$ -сдвиг фаз между напряжением подводимым к цепи и током, протекающим в ней,

$j=\sqrt{-1}$ – обозначение корня квадратного из минус единицы буквой (j) принято в электротехнике, так как буква i занята для обозначения тока.

Необходимо помнить следующую особенность такого представления: реактивных сопротивлений: X_L и X_C равны не вещественной или мнимой части комплексного числа, а модулю комплексного числа. При этом $X=X_L-X_C$ – полное реактивное сопротивление цепи, равное алгебраической разности индуктивного и емкостного сопротивлений,

$X=X_L-X_C$ – полное реактивное сопротивление цепи, равное алгебраической разности индуктивного и емкостного сопротивлений,

R – активное сопротивление цепи,

$\underline{X}=\underline{X}_L+\underline{X}_C$ – полное комплексное реактивное сопротивление цепи,

$\underline{X}_L=j\omega L=j|\underline{X}_L|$ – комплексное представление сопротивления индуктивности,

$\underline{X}_C=1/j\omega C=-j|\underline{X}_C|$ – комплексное представление сопротивления емкости,

$X_L=\omega L=2\pi fL$ – индуктивное сопротивление цепи для переменного напряжения,

$X_C=1/\omega C=1/2\pi fC$ – емкостное сопротивление цепи для переменного напряжения,

2.4.2. ЗАКОНЫ ОМА И КИРХГОФА В КОМПЛЕКСНОМ ВИДЕ

Закон Ома в комплексном виде:

$$\underline{I}=\underline{U}/\underline{Z} \text{ или } \underline{I}=\underline{Y}\cdot\underline{U}, \quad (2.26)$$

где \underline{I} – ток, протекающий в электрической цепи,

\underline{U} – напряжение, приложенное к электрической цепи,

\underline{Y} – комплексная проводимость электрической цепи,

\underline{Z} – комплексное сопротивление электрической цепи.

Первый закон Кирхгофа. Сумма токов в проводах, сходящихся в узле электрической цепи равна нулю:

$$\sum_{n=1}^N \underline{I}_n = 0. \quad (2.27)$$

Второй закон Кирхгофа. Сумма комплексных э.д.с. или напряжений, действующих в замкнутом контуре, равна сумме падений напряжений на элементах этого контура.

$$\sum_{k=1}^K \underline{U}_k = \sum_{n=1}^N \underline{I} * \underline{Z}_n \quad (2.28)$$

Законы Ома и Кирхгофа справедливы как для мгновенных, так и для действующих значений э.д.с. напряжений и токов.

Действующие(эффективное или среднеквадратическое напряжение) определяется выражением:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad (2.29)$$

где T – период колебаний напряжения, равный $1/f$,
 f – частота колебаний напряжения.

При строго синусоидальной форме колебаний действующее напряжение, равно: $U = U_m / \sqrt{2}$, (2.30)
 где U_m – максимальное значение напряжения $u(t)$.

Аналогично определяются действующие значения э.д.с. и токов.

2.4.3. ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ НА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ

Для облегчения построения векторных диаграмм на вращающейся плоскости необходимо запомнить следующие основные положения:

- а) В цепи с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе.
- б) В идеализированной цепи только с индуктивным сопротивлением без потерь напряжение по фазе опережает ток на угол, равный 90 градусов
- в) В цепи с чисто емкостным сопротивлением без потерь ток опережает по фазе напряжение на угол +90 градусов.

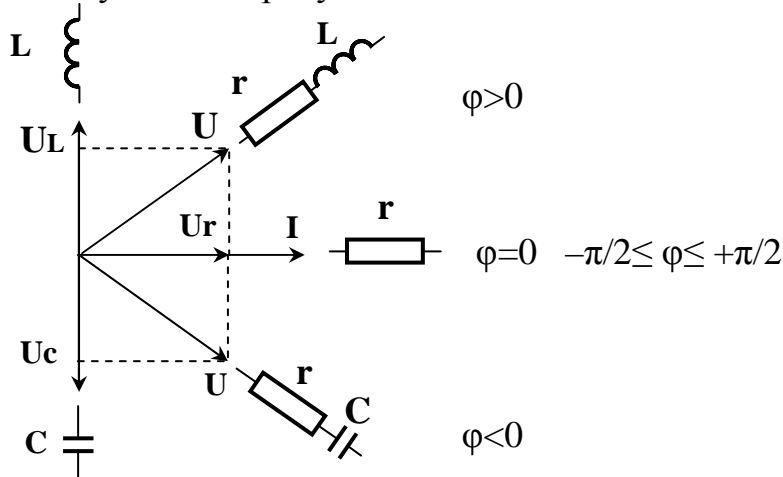


Рис.2.1. Мнемоническая схема, поясняющая возможные повороты радиусов-векторов при различном включении r - L - C элементов.

При построении векторных диаграмм надо начинать построение с вектора напряжения или тока общего для всей анализируемой цепи. В частности при последовательном включение элементов цепи надо начинать с построения вектора тока, протекающего через все элементы цепи. При параллельном включении элементов цепи построение векторной диаграммы надо начинать с вектора общего приложенного напряжения, а затем строить вектора токов, протекающих через каждую из ветвей электрической цепи. Возможные сдвиги фаз векторов напряжения в электрических цепях, состоящих из различных комбинаций r - L - C элементов, приведены на мнемонической схеме (см. рис.2.1.).

Радиус-вектора на схеме и ниже выделяются жирным шрифтом или точками (черточками) над ними.

2.4.4. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПИ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА

Рассмотрим примеры такого анализа в предположении, что величины сопротивления, емкости и индуктивности не изменяются во времени и не зависят от приложенного напряжения и токов (см. рис.2.2).

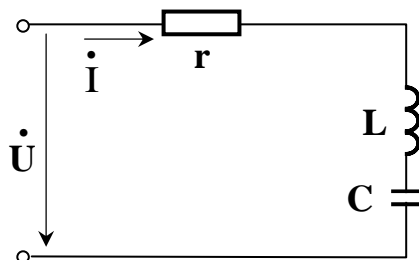


Рис.2.2.Электрическая схема последовательно включенных r - L - C - элементов.

Процессы, происходящие в исследуемой цепи (в соответствии со вторым законом Кирхгофа) описываются (при постоянстве величин элементов во времени и независимости их от величины протекающего тока) линейным интегрально-дифференциальным уравнением:

$$u(t)=ri(t)+Ldi(t)/dt+1/C \int i(t)dt, \quad (2.31)$$

где $u(t)$ – переменное напряжение, подаваемое от источника на колебательный контур,

$i(t)$ – переменный ток, протекающий в цепи,

L – индуктивность,

r – активное сопротивление катушки индуктивности,

C – емкость конденсатора.

Сопротивление (r), индуктивность (L) и емкость (C) образуют колебательный контур, в котором возможен резонанс напряжений. Термин «резонанс напряжения» подразумевает, что при равенстве $X_L=X_C$, переменные напряжения на элементах контура L и C увеличивается в Q раз по сравнению с напряжением подаваемым от источника на контур. Под величиной Q понимается добротность контура, равная $Q=X_C/r$.

При принятых предположениях уравнение (2.31) может быть представлено в следующем виде:

$$u(t)=i(t)*\{r+j[X_L+X_C]\}. \quad (2.32)$$

Откуда следует выражение для комплексного сопротивления контура

$$\underline{Z}=r+j\{X_L-X_C\}.$$

При резонансе напряжений, когда $X_L=X_C$, $\underline{Z}=r$, то есть сопротивление контура оказывается активным, а ток, протекающий через контур, достигает максимальной величины, равной $i(t)_{\max}=u(t)/r$.

В данном случае построение векторной диаграммы надо начинать с общего для цепи вектора тока (\dot{I}), затем строятся векторы напряжений. При последовательном соединении катушки индуктивности и емкости общее реактивное сопротивление цепи X равно алгебраической разности индуктивного и емкостного сопротивлений X_L и X_C . Приложенное к такой цепи напряжение можно представить в виде векторной суммы вектора падения напряжения на активном сопротивлении (U_r), совпадающего по фазе с вектором тока; вектора падения напряжения на индуктивности (U_L), опережающего ток по фазе на угол 90° и век-

тора падения напряжения на емкости (U_C), отстающего по фазе от вектора тока на угол 90° . При этом возможны следующие случаи:

а) Индуктивное сопротивление больше емкостного ($X_L > X_C$). В этом случае входное напряжение будет опережать ток по фазе на угол φ (см. рис. 2.3.).

б) Емкостное сопротивление больше индуктивного ($X_L < X_C$). При этом ток опережает напряжение на угол φ . Векторная диаграмма тока и напряжений показана на рис. 2.4.

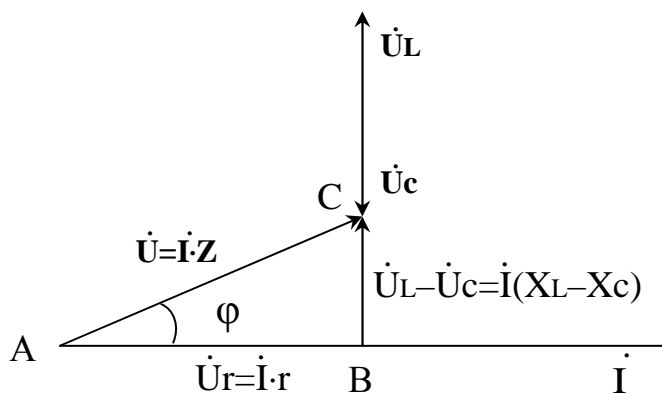


Рис. 2.3

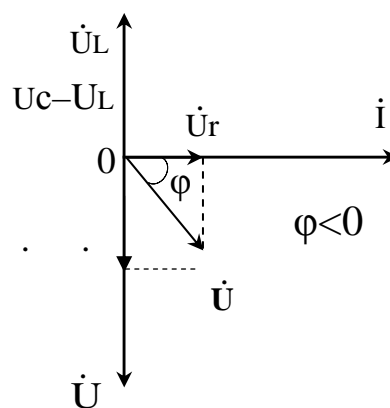


Рис. 2.4

в). Индуктивное сопротивление равно емкостному ($X_L = X_C$). Соответственно полное реактивное сопротивление цепи (X) равно нулю, а полное сопротивление цепи $Z = r$, т.е. достигает своего минимального значения. При этом ток будет по фазе совпадать с напряжением, т.е. угол $\varphi = 0$. Векторная диаграмма токов и напряжений для этого случая приведена на рис. 2.5.

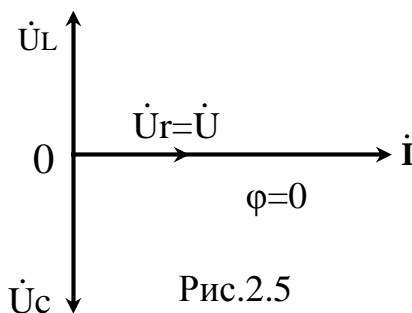


Рис. 2.5

Явление резонанса напряжений происходит также в кварцевых резонаторах, которые широко используются в автогенераторах колебаний.

2.4.5. РЕЗОНАНС ТОКОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВКЛЮЧЕНИИ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ.

Параллельное включение катушки индуктивности наиболее широко используется в приемных устройствах и других электронных цепях для настройки их на заданную частоту и ослабления сигналов от других передающих станций. В электротехнических цепях параллельное включение батареи конденсаторов используется для уменьшения реактивной нагрузки индуктивного характера, создаваемой обмотками электродвигателей. Принципиальная схема электрической цепи, состоящей параллельно включенной катушки индуктивности и емкости приведена на рис. 2.6.

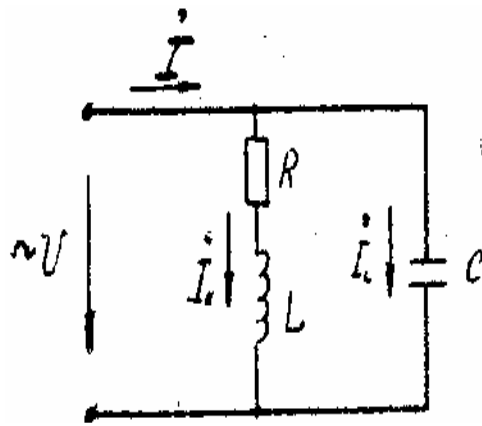


Рис.2.6. Принципиальная схема электрической цепи, состоящей из параллельно включенных катушки индуктивности и емкости.

Катушка индуктивности обычно наматывается на сердечнике из электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, относительная магнитная проницаемость которых велика ($\mu=10\ 000$ и более) $L=K*\mu*\dot{W}$, где μ - относительная магнитная проницаемость сердечника, \dot{W} -число витков провода катушки, K - коэффициент, зависящий от конструкции катушки и сердечника. Эквивалентная схема катушки индуктивности состоит из двух элементов – индуктивности (L) и активного сопротивления провода (R). Величина сопротивления индуктивности переменному току ($X_L=\omega L=2\pi fL$) обычно велика, в то время как величина активного сопротивления относительно мала (единицы Ома).

Отношение $\omega L/R=Q$ называется добротностью колебательного контура. В электронных цепях величина добротности контура может быть сделана очень большой, особенно если катушка индуктивности выполнена из сверхпроводящих проводов. При равенстве сопротивлений $X_L=X_C$ в колебательном контуре возникает резонанс токов и контурный ток, протекающий между индуктивностью и емкостью, оказывается в Q раз больше тока потребляемого от источника напряжения ($I_k=Q*I$). Это позволяет использовать такой колебательный контур также для накопления энергии ($\mathcal{E}=L*I_k^2/2$).

В электротехнических цепях включение батареи конденсаторов параллельно обмоткам статоров асинхронных электродвигателей используется для уменьшения угла сдвига фаз между потребляемым током и подводимым напряжением (φ). Реактивная мощность, потребляемая статорными обмотками электродвигателей пропорциональна $\sin \varphi$. Особенно велика потребляемая реактивная мощность при работе асинхронных электродвигателей в режиме холостого хода. При этом значение коэффициента мощности $\cos \varphi =P/S$ оказывается равным 0,2.

Включение параллельно обмоткам электродвигателей батареи конденсаторов позволяет увеличить величину коэффициента мощности до величин 0,95...0,97 и соответственно улучшает использование мощности трансформаторов и генераторов переменного напряжения.

Векторная диаграмма, характеризующая процессы в параллельном колебательном контуре приведена на рис.2.7.

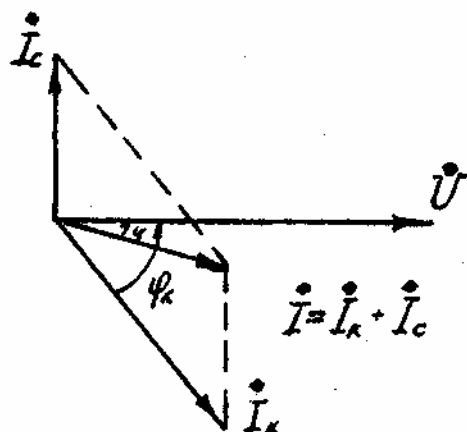


Рис.4.2. Векторная диаграмма, иллюстрирующая влияние емкости, включенной параллельно с катушкой индуктивности, на величину угла сдвига фаз (φ) между векторами тока \mathbf{I} и напряжения \mathbf{U} .

Рис.2.7. Векторная диаграмма, иллюстрирующая влияние подключения емкости параллельно катушки индуктивности на величину φ .

На диаграмме показаны вектор напряжения (\dot{u}) и токов протекающих через емкость и катушку индуктивности, а также вектор тока потребляемого от сети: $\dot{I} = \dot{I}_K + \dot{I}_C$. При отсутствии конденсатора (С) вектор тока \dot{I}_K сдвинут относительно вектора напряжения (\dot{u}) на угол (φ_K). Как следует из диаграммы при подключении конденсатора угол (φ) между напряжением приложенным к контуру и током, потребляемым от сети существенно уменьшается. Для полной компенсации реактивной мощности потребовалось бы использовать

очень большие конденсаторы и поэтому обычно ограничиваются уменьшением угла (φ) до величины, равной нескольким градусам.

При равенстве сопротивлений $X_L=X_C$ суммарный ток (\dot{I}) и напряжение (\dot{u}) совпадают по фазе и контур представляет для источника внешнего напряжения чисто активное сопротивление.

2.4.6. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКИ

Реальные напряжения, вырабатываемые генераторами на электростанциях отличаются от строго синусоидальных и ближе по форме к трапеции. При такой форме колебаний кроме основной гармоники появляются ряд высших гармоник. Измерения спектра мощности в Московской энергосети ЕЭС показали, что уровень 23-ей гармоники равен - 80 дБ ниже уровня основной составляющей на частоте 50 Гц. В электронных и электрических системах широко используются также импульсные сигналы различной формы и длительности. Чем короче длительность импульса, тем больше ширина спектра. Для прямоугольных и трапецевидных видеоимпульсов ширина главного лепестка спектра приближенно равна $1/\tau$, где τ -длительность импульса.

Во всех этих случаях наиболее целесообразно э. д. с., напряжения и токи представлять в виде ряда Фурье:

$$u(t) = U_0(t) + \sum_{k=1}^K U_{mk}(t) \cos[k\omega(t) + \varphi_k(t)] \quad (3.33)$$

где $U_0(t)$ – постоянная составляющая напряжения,

$U_{mk}(t)$ – амплитуда k -ой гармоники,

φ_k – начальная фаза k -ой гармоники.

При таком представлении $u(t)$ действующее (среднеквадратическое напряжение) определяется выражением:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2} \quad (2.34)$$

где U_0 – постоянная составляющая напряжения,

U_k – эффективное (действующее) напряжение k -ой гармоники.

Аналогичными выражениями описываются действующие значения токов и э.д.с.

Выражения для активной и реактивной мощности записываются в следующем виде:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^K U_k I_k \cos \varphi_k \quad (2.35)$$

$$Q = \sum_{k=1}^K U_k I_k \sin \varphi_k \quad (2.36)$$

При этом полная мощность периодического несинусоидального напряжения, равна

$$S = U * I > \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.37)$$

2.5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ 2

1. В чем заключается и как проявляется явление резонанса напряжений в электрических цепях?
2. При каких условиях возникает резонанс напряжений?
3. Какие параметры колебательного контура нужно изменить, чтобы получить резонанс напряжений?
4. Построить амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики резонансного контура.
5. Как используется явление резонанса напряжений в электронике?
6. Как определяется мгновенная мощность в электрической цепи?
7. Какими приборами измеряются полная, активная и реактивная мощность в трехфазных системах?
8. Какой смысл понятия «Коэффициент мощности». Технико-экономическое значение повышения коэффициента мощности?
9. Зачем и как повышают коэффициент мощности?
10. Какими приборами измеряется среднеквадратическое напряжение?

2.6. ТЕСТ ПО ТЕМЕ 2

1. Определить частоту, на которой будет наблюдаться резонанс токов в, если величина $C=1,0$ пФ, а величина индуктивности 10мГн . **Ответы**, один из которых правильный: 10МГц ; 1МГц ; $1,6\text{МГц}$; 16МГц ; 100МГц ;
2. Определить во сколько раз контурное напряжение будет больше подводимого от источника сигнала, если $X_c=100\text{ Ом}$, $r=10\text{ Ом}$. **Ответы**, один из которых правильный: $!0$; 100 ; 20 ; 50 ; 60 .
3. Определить величину добротности кварцевого резонатора на частоте 1кГц , если эквивалентное сопротивление его равно $0,1\text{ Ом}$, а эквивалентная индуктивность, равна 100 мГн . **Ответы**, один из которых правильный: 1000 ; 2000 ; 6280 ; 3140 ,
4. Определить с какой частотой изменяется мгновенная мощность, если частота колебаний напряжения, равна 50Гц ? **Ответы**, один из которых правильный: 150Гц ; 100Гц ; 200Гц ; 50Гц .
5. Определить во сколько раз контурный ток будет больше подводимого от источника сигнала, если $X_c=100\text{ Ом}$, $r=10\text{ Ом}$. **Ответы**, один из которых правильный: 10 ; 100 ; 20 ; 50 ; 60 .

ЧАСТЬ 2. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ

ТЕМА 3. МНОГОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

3.1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России 99,0 % всей электроэнергии вырабатывается на мощных электростанциях трехфазными генераторами переменного напряжения. Частота колебаний напряжения поддерживается равной 50 Гц (страны СНГ и Европы) или 60 Гц (США). Передача электроэнергии от электростанций потребителям также производится на переменном токе по воздушным линиям

электропередачи (ЛЭП) или по экранированным кабелям.

Как уже отмечалось, существенными недостатками передачи электроэнергии ЛЭП являются потери электрической энергии на коронный разряд и излучение в пространство, а также вредное влияние электромагнитных излучений на человека, животных, растения. Поэтому более целесообразна и безопасна передача электрической энергии по экранированным кабелям. В этом случае устраняются потери электроэнергии на излучение в воздушное пространство, а также потери из-за коронного разряда, особенно сильно возрастающие при повышенной влажности воздуха.

Передача электроэнергии на постоянном токе практически не осуществляется, кроме случаев, когда генераторы напряжения находятся в непосредственной близости от мощных потребителей постоянного тока, например, ванн в которых производится электролиз глинозема при производстве алюминия. Хотя в конечном счете около 40% электроэнергии потребляется на постоянном токе, постоянное напряжение в настоящее время вырабатывается из переменного с помощью полупроводниковых выпрямителей.

Основной причиной, по которой электроэнергия передается потребителю в виде переменного синусоидального напряжения – возможность использования трансформаторов, позволяющих с малыми потерями изменять в широких пределах величину напряжения. Для чего используются трансформаторы? Как уже отмечалось, чем выше напряжение, тем меньше ток, протекающий в линии передачи, тем более тонкие провода можно использовать в ней. Поэтому от генератора напряжения на электростанции электрическая энергия подается на трансформатор, который повышает напряжение с 3 киловольт до значительно более высокого 110кВ, 380кВ, 760кВ и даже миллион киловольт. В месте потребления электрическая энергия сначала поступает на районные трансформаторные подстанции, на которых установлены трансформаторы, понижающих напряжение до 35кВ (для питания предприятий, расположенных в радиусе 50 километров), до 10 кВ или 6кВ (для питания предприятий в радиусе до 15 км. От районных подстанций электроэнергия с помощью ЛЭП подается на заводские или цеховые подстанции. На заводских или цеховых трансформаторных подстанциях напряжение понижается до 660, 380, 220В и подается на электродвигатели, электрические печи, осветительные и нагревательные и другие устройства.

Необходимо отметить, что неудачный выбор таких низких частот колебаний переменного напряжения как 50 Гц (60 Гц) привело к тому, что размеры генераторов и трансформаторов напряжения оказываются слишком большими и требуют для своего изготовления большого количества электротехнической стали. Гораздо меньшего размера и более эффективными генераторы и трансформаторы напряжения могли бы быть использованы при выработке и передаче электроэнергии на частотах 10...50кГц.

Поэтому в современных системах генерации переменного напряжения, главным образом бортовых, а также в современных выпрямительных устройствах, используются более высокие рабочие частоты, вплоть до 100кГц. Переход на более высокие рабочие частоты в современных импульсных выпрямителях

позволяет также резко уменьшить величины конденсаторов в фильтрах нижних частот (выпрямители, питающие ЭВМ и другие устройства).

3.2.ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Многофазные электрические сети представляют собой совокупность нескольких однофазных цепей, в которых формируются э.д.с., одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга. Как правило, эти э.д.с. вырабатываются одним источником сигнала. Наибольшее распространение в настоящее время получили трехфазные электрические цепи, в которых э.д.с. сдвинуты между собой на 120 градусов. Кроме трехфазных систем в бортовых системах питания электронной аппаратуры довольно широко используются 10 и 12 фазные системы. Основное преимущество многофазных систем – существенная экономия проводов. Вместо шести проводов необходимых для передачи электрической энергии в трех однофазных системах, в трехфазной системе требуется всего три. Это преимущество особенно сильно сказывается при строительстве линий электропередачи электрической энергии на большие расстояния. Не менее важным преимуществом многофазных систем является возможность простого формирования вращающегося магнитного поля, что позволяет создавать и широко использовать двигатели переменного тока, не имеющие контактных колец, что обеспечивает их высокую взрывобезопасность. Искры, образующиеся при нарушениях электрического контакта на вращающихся кольцах двигателей постоянного тока делают их взрывоопасными и их нельзя использовать на большинстве предприятий пищевой промышленности. Кроме этого асинхронные электродвигатели переменного тока более дешевы, надежны и просты в эксплуатации по сравнению с двигателями постоянного тока.

Трехфазные электрические напряжения создаются синхронными генераторами, статорные обмотки которых расположены в специальных пазах и сдвинуты в пространстве на 120 градусов. Ротор генератора выполнен в виде электромагнита, обмотка возбуждения которого через контактные кольца и щетки подсоединена к источнику постоянного тока. При вращении ротора электромагнит последовательно пересекает обмотки статора. В результате в обмотках статора индуцируются э.д.с., сдвинутые по фазе на 120 градусов (фазы А,В,С). При выбранном направлении вращения ротора, когда порядок возбуждения э.д.с. в фазах совпадает с направлением вращения ротора систему принято называть симметричной с прямой последовательностью э.д.с. В том случае, когда чередование э.д.с. будет обратным(С,В,А)-система называется трехфазной системой с обратной последовательностью э.д.с. Для того, чтобы избежать протекания выравнивающих токов при несинусоидальной форме напряжения обмотки статора синхронных генераторов включаются по схем «звезды». Начала обмоток обозначаются большими буквами А, В, С, а концы малыми буквами х,у,з. Концы обмоток статора синхронного генератора объединяются. Выводы обмоток А, В, С окрашиваются соответственно в желтый, зеленый, красный цвета.

Вектора э.д.с. трехфазной системы удобно изображать на комплексной плоскости, вращающейся с угловой частотой. При этом векторы э.д.с. в сим-

метричной трехфазной системе образуют звезду и их векторная сумма равна нулю.

3.3. ВКЛЮЧЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДЫ»

В этом случае концы или начала приемников все трех фаз соединяются в одну общую точку, а оставшиеся три вывода фаз соединяются с тремя фазами источника напряжения с помощью линейных проводов, по которым протекают токи I_a I_b I_c (см. Рис. 3.1.).

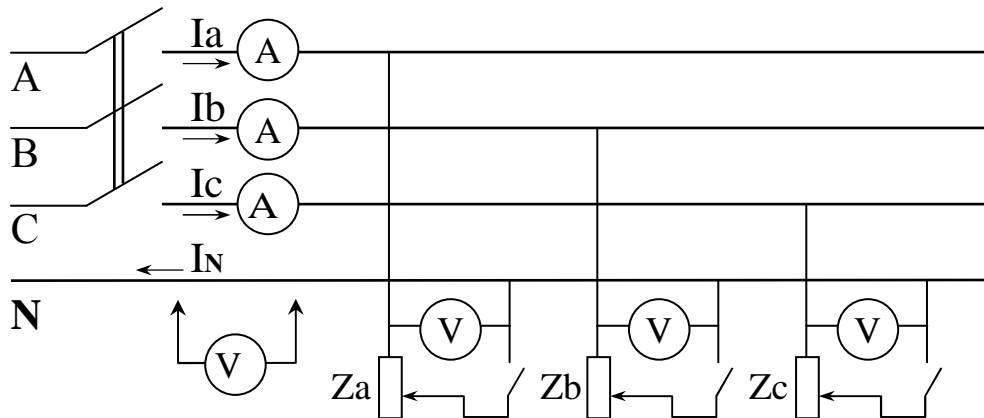


Рис.3.1.Схема трехфазной электрической цепи при соединении сопротивлений нагрузки по схеме «звезда».

Провод нейтрали (N), соединяющий точку объединения обмоток генератора с соответствующей точкой приемника, называют нейтральным, а провода A, B и C, соединяющие начала фаз генератора и приемника называют линейными. Напряжение U_ϕ между началом и концом фазы называют фазным напряжением. Напряжение U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} между линейными проводами называют линейными напряжениями. Токи I_A, I_B, I_C , протекающие по линейным проводам, называются линейными токами. Токи I , протекающие через сопротивления нагрузок Z_A, Z_B, Z_C называются фазными токами. В рассматриваемой схеме линейные токи совпадают с фазными $I_L = I_\phi$. При равномерной нагрузке линейные напряжения, равны $U_L = \sqrt{3} * U_\phi$.

3.4. ВКЛЮЧЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИКА»

Схема соединения приемников электроэнергии в треугольник приведена на рис.3.2.

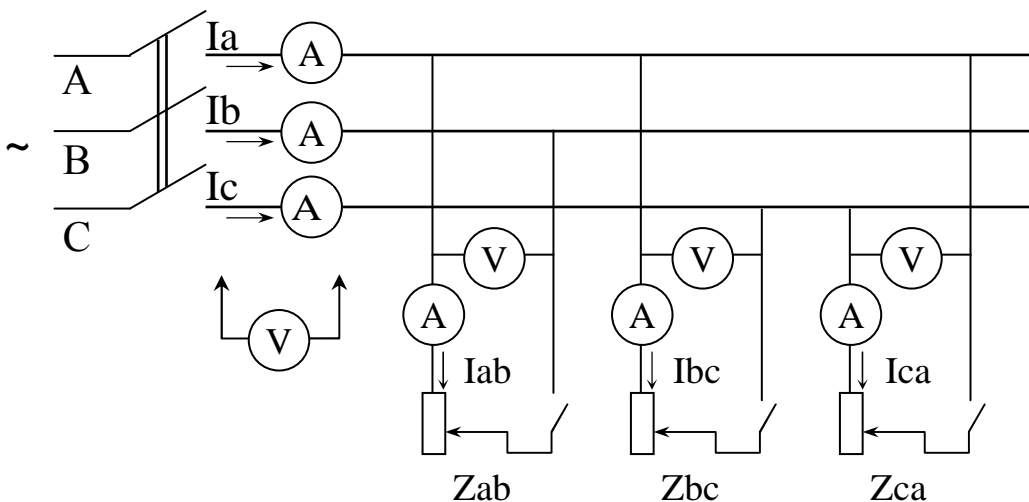


Рис.3.2. Схема соединения приемников электроэнергии треугольником.

На схеме обозначено: I_A, I_B, I_C - линейные токи; I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} - фазные токи, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA} - сопротивления нагрузки. В рассматриваемом случае вывод конца первого приемника электроэнергии (Z_{AB}), соединяется с выводом начала второго приемника (Z_{BC}), вывод конца второго приемника (Z_{BC}) соединяется с выводом начала третьего приемника (Z_{CA}), а вывод конца третьего приемника (Z_{CA}) соединяется с выводом начала первого приемника (Z_{AB}). Точки соединения соседних фаз подключается к трем линейным проводам А, В, С.

На схеме показано также включение амперметров, измеряющих линейные и фазные токи и вольтметр, который может быть подключен для измерения напряжений. В рассматриваемой схеме при соединении сопротивлений нагрузки по схеме треугольника линейное напряжение равно фазному $U_L = U_\phi$. При симметричной нагрузке $I_L = \sqrt{3} I_\phi$. При несимметричной нагрузке это соотношение не соблюдается.

Схема соединения нагрузок в треугольник применяется, главным образом, в тех случаях, когда нагрузки в фазах не равны между собой и изменяются независимо во времени.

3.5. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ, ТОКОВ И МОЩНОСТЕЙ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Схемы включения вольтметров и амперметров приведены выше на рис.3.1. и рис.3.2. По показаниям вольтметров и амперметров можно определить полную мощность потребляемую трехфазной сетью (S). Полная мощность, передаваемая от источника электроэнергии потребителям в трехфазной цепи при одинаковых нагрузках в фазах, определяется выражениями:

$$S = \sqrt{3} U_L I_L = 3 U_\phi I_\phi, \quad (3.1)$$

где U_L - линейное напряжение в сети, I_L - линейный ток, U_ϕ - фазное напряжение, I_ϕ - фазный ток.

При чисто активной нагрузке активная мощность, передаваемая в нагрузку, равна полной мощности:

$$S = P = \sqrt{3} U_L I_L = 3 U_\phi I_\phi. \quad (3.2)$$

При смещенной нагрузке активная мощность, передаваемая нагрузкам определяется выражением:

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi. \quad (3.3)$$

Реактивная мощность определяется следующим выражением:

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi. \quad (3.4)$$

3.5.1. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

Измерение полной мощности в четырех проводной электрической цепи производится путем перемножения показаний вольтметров и амперметров согласно формуле (3.1). Для измерения активной мощности в каждую из фаз включается ваттметр. Токовая обмотка ваттметра включается в разрыв провода

соответствующей фазы, а напряженческая обмотка между фазой и нулевым проводом. Ваттметр прокалиброван в ваттах с учетом сдвига фаз между током и напряжением. При равномерной нагрузке в фазах измерительные приборы включаются в цепи одной из фаз и их показания умножаются на три.

3.5.2. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХПРОВОДНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

Если трехфазная цепь трехпроводная, то независимо от схемы соединения нагрузки, будь то звезда или треугольник и независимо от того, равномерная нагрузка или нет, мощность, потребляемую системой, можно измерить двумя однофазными ваттметрами. Токовые обмотки ваттметров включаются в две любые фазы, а обмотки напряжения – между третьей (незанятой) фазой и той фазой, в которую включена токовая обмотка данного ваттметра. Возможные схемы включения ваттметров показаны на рис. 3.3.

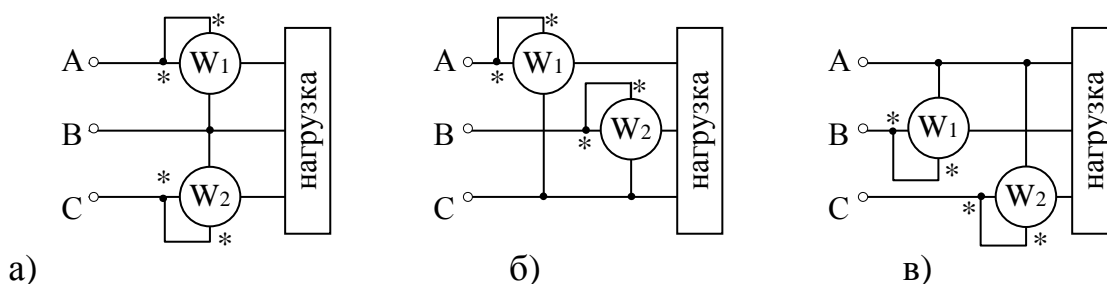


Рис.3.3. Схемы включения ваттметров в трехпроводных сетях

При использовании показанных на рисунке схем включения ваттметров общая мощность равна алгебраической сумме их показаний.

Построим векторную диаграмму токов и напряжений, действующих на измерительные системы приборов, включенных по схеме (рис.3.3 а). Нагрузку считаем симметричной, соединенной звездой, активно-индуктивного характера с разностью фаз между током и напряжением в каждой фазе φ . Показания ваттметра, включенного в цепь переменного тока, пропорциональны произведению трех величин: току, напряжению и косинусу угла между током и напряжением. Из векторной диаграммы (рис.3.4.) видно, что в рассматриваемом случае показания ваттметров соответственно равны

$$P_1 = I_a * U_{ab} * \cos(30^\circ + \varphi), \quad P_2 = I_c * U_{cb} * \cos(30^\circ - \varphi).$$

Здесь берем напряжение U_{cb} , равное $-U_{bc}$, так как генераторный конец обмотки напряжения второго ваттметра подключен к фазе C, а не к B. Сумма показаний ваттметров равна

$$P = P_1 + P_2 = 2 * I_l * U_l * \cos 30^\circ * \cos \varphi = \sqrt{3} * I_l * U_l * \cos \varphi = 3 * I_\phi * U_\phi * \cos \varphi,$$

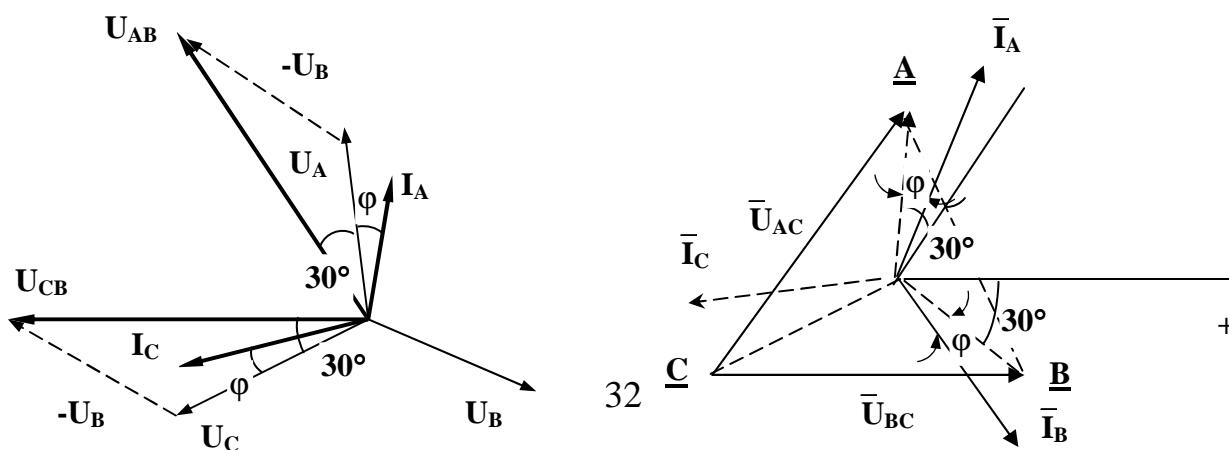


Рис.3.4

На рис. 3.5 построена векторная диаграмма, иллюстрирующая работу схемы включения ваттметров, приведенную на рис.3.3.б.

Рис.3.5

Для симметричного режима векторы линейных напряжений образуют равносторонний треугольник ABC. Линии, соединяющие центр тяжести этого треугольника с его вершинами, можно рассматривать как фазные напряжения приемника, соединенного звездой. При активно-индуктивной нагрузке токи отстают по фазе от напряжений на угол φ .

Первый ваттметр включен на напряжение U_{ac} (заметим, $\bar{U}_{ac} = -\bar{U}_{ca}$) и через него протекает ток \bar{I}_a . Измерительная система второго ваттметра находится под действием напряжения \bar{U}_{bc} и тока \bar{I}_b .

Из рассмотрения векторной диаграммы, можно установить, что ваттметр, включенный в опережающую фазу, показывает пропорционально $\cos(\varphi - 30^\circ)$ при индуктивном характере нагрузки, а показания ваттметра, включенного в отстающую фазу, пропорционально $\cos(\varphi + 30^\circ)$ при индуктивном и пропорционально $\cos(\varphi - 30^\circ)$ при емкостном характере нагрузки. При равномерной активной нагрузке ($\varphi = 0$) показания обоих ваттметров одинаковы и равны половине общей измеряемой мощности. При любой другой (не активной) нагрузке, даже если она равномерна, показания ваттметров различны.

В случае включения нагрузки треугольником векторы линейных токов получаются как геометрические разности векторов токов фазовых и для симметричной системы углы в 30° будут между фазовыми и линейными токами. Например, линейные токи \bar{I}_b и \bar{I}_c в последовательных обмотках ваттметров схемы (рис.3.3.в) можно выразить через соответствующие фазовые токи

$$\bar{I}_b = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab} \quad \bar{I}_c = \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{bc}.$$

Фазовые токи отстают от фазовых напряжений на угол φ . Угол между вектором тока \bar{I}_b и вектором напряжения \bar{U}_{ba} , приложенного к цепи первого ваттметра, равен $\beta_1 = 60^\circ - 30^\circ - \varphi = 30^\circ - \varphi$.

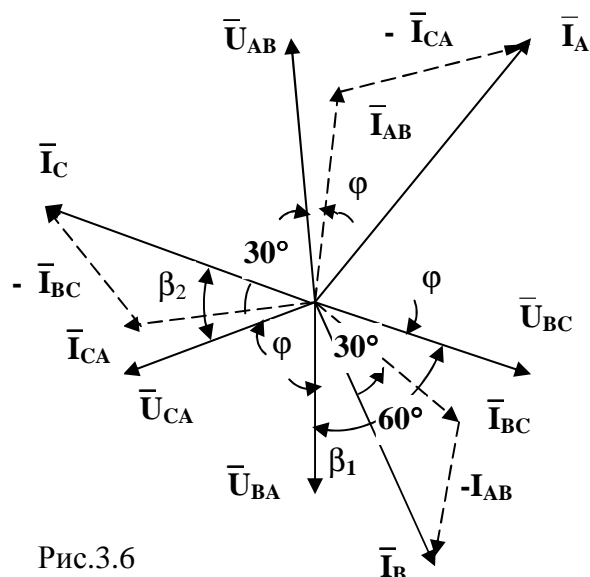


Рис.3.6

Угол между вектором тока \bar{I}_C и вектором напряжения \bar{U}_{CA} , приложенного к параллельной цепи второго ваттметра, $\beta_2=30^\circ+\varphi$. Тогда первый ваттметр покажет мощность $P_1=U_L \cdot I_L \cdot \cos\beta_1$, а второй ваттметр $P_2=U_L \cdot I_L \cdot \cos\beta_2$.

Для получения мощности P всей трехфазной цепи необходимо алгебраически, то есть с учетом знаков, сложить показания ваттметров.

В зависимости от значения угла сдвига фаз в цепи показания одного ваттметра отличаются от показаний другого, причем показания одного ваттметра всегда положительны, а показания второго могут стать отрицательными. При сдвиге фаз более 60° (работа многих электрических машин в режиме холостого хода) $\cos(\varphi+30^\circ)$ – величина отрицательная, стрелка второго ваттметра отклонится в обратную сторону от нуля. Для отчета отрицательных значений мощности переключают зажимы одной из обмоток ваттметра (токовой или обмотки напряжения), и общая мощность в этом случае равна разности показаний ваттметров.

При выборе ваттметров нужно учесть, что их измерительные цепи включены на линейные токи и на линейные напряжения. Для симметричных трехфазных цепей при соединении звездой линейные токи равны фазовым, а линейные напряжения в $\sqrt{3}$ раз больше фазовых. При соединении треугольником равны фазовые и линейные напряжения, а линейные токи в $\sqrt{3}$ раза больше фазовых. Активная мощность симметричной трехфазной цепи связана с линейными величинами соотношением

$$P = \sqrt{3} * U_L * I_L * \cos \varphi$$

и всегда равна сумме мощностей во всех фазах.

Шкалы многопредельных приборов калибруются в относительных делениях, например, могут иметь $\alpha_m=100$ делений. Значения измеряемой величины, приходящиеся на одно деление шкалы, называют ценой деления или постоянной прибора. Она равна:

$C = \text{предел измерения в Вт/число делений шкалы.}$

Переносные приборы обычно выполняются на несколько пределов измере-

ния. Для ваттметров пределы измерения указываются по току и по напряжению. В большинстве случаев ваттметры калибруются для значения $\cos\varphi=1$ и поэтому их предел измерения в Ваттах определяется путем перемножения номинальных значений тока и напряжения. Например, для ваттметра со шкалой, имеющей α_m делений, постоянная прибора C равна:

$$C=(I_{ном} \cdot U_{ном}) / \alpha_m \text{ Вт/дел.}$$

Если стрелка ваттметра отклонилась на α делений, значение измеряемой этим ваттметром мощности, равно $P=C \cdot \alpha$. При выборе типа ваттметра пределы измерения должны быть не меньше значений тех токов и напряжений, на которые они будут включены. С точки зрения точности результатов измерений желательно, чтобы предел измерения превышал значение измеряемой величины не более, чем на 25%, во всяком случае, стремятся, чтобы отсчет показаний производился во второй половине шкалы. В противном случае приходится выбирать прибор более высокого класса точности.

3.6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ 3

1. Какие преимущества многофазных электрических сетей по сравнению с однофазными?
2. Какой пространственный сдвиг между обмотками статора в синхронном генераторе трехфазного напряжения?
3. В каких случаях используются трехпроводные, а в каких четырехпроводные трехфазные системы?
4. Какой вид имеет векторная диаграмма для электродвижущих сил действующих в трехфазной системе?
5. В каких случаях используется соединение потребителей энергии по схеме «звезда», а в каких по схеме «треугольника»?
6. Как связаны между собой линейные и фазные напряжения и токи при равномерных нагрузках в фазах?
7. Какие приборы используются для измерения мощности в трехфазной цепи?
8. Как осуществляется компенсация реактивной мощности в трехфазных электрических сетях?
9. Как включаются ваттметры для измерения мощности в трехпроводных трехфазных электрических системах?
10. Напишите аналитические формулы для полной, активной и реактивной мощностей в трехфазной системе?

3.7. ТЕСТ ПО ТЕМЕ 3

1. Определить линейные напряжения, если величины фазных напряжений в трехфазной системе равны 127 В. **Ответы**, один из которых правильный: 220В; 380В; 127В; 660 В,
2. Определить максимальное напряжение в фазе «А», если величина действующего напряжения равна 220В. **Ответы**, один из которых правильный: 308В; 290В; 380 В; 127В.
3. Определить ток в нейтральном проводе трехфазной системы, если фазное напряжение равно 127 В, а нагрузки в всех фазах одинаковы и равны 1кОм. **Ответы**, один из которых правильный: 0 А; 1А; 4А; 5А,

4. Определить мощность, потребляемую трехпроводной трехфазной системой, если показания одного ваттметра равно 300Вт, а второго 220 Вт. **Ответы,** один из которых правильный: 520вт; 80Вт; 380Вт; 400Вт.
5. Определить величину тока в фазе «А», если эффективное напряжение трехфазного генератора равно 127В, а сопротивление нагрузки равно 1000 Ом. **Ответы,** один из которых правильный: 127мА; 220мА; 500мА; 440мА,

ТЕМА.4 . ТРАНСФОРМАТОРЫ

4.1. ОДНОФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатором называется статическое (т.е. без движущихся элементов) электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования величины одного переменного напряжения в напряжение другой величины той же частоты.

Преобразование величины напряжения осуществляется благодаря явлению электромагнитной индукции. Обмотка трансформатора, соединенная с источником переменного напряжения, называется первичной. Обмотка, к которой присоединяется приемник электроэнергии, называется вторичной.

Обмотки трансформатора не соединены между собой по постоянному току, поэтому напряжение на вторичной обмотке трансформатора появляется только при изменении величины напряжения в первичной обмотке. Это свойство трансформаторов позволяет использовать их для разделения постоянной и переменной составляющих напряжения. В частности трансформаторы используются для изоляции части электрической цепи по постоянному току от высокого переменного напряжения электрической сети.

Обмотки мощных трансформаторов для электротехнических систем обычно наматываются в пазах замкнутого (сердечника), набираемого из отдельных, изолированных друг от друга слоев лака, листов электротехнической стали. Относительная магнитная проницаемость электротехнической стали достигает 10000...20000. Обычно в пазах магнитопровода размещаются несколько катушек с обмотками. Принципиальная схема трансформатора приведена на рис.4.1.

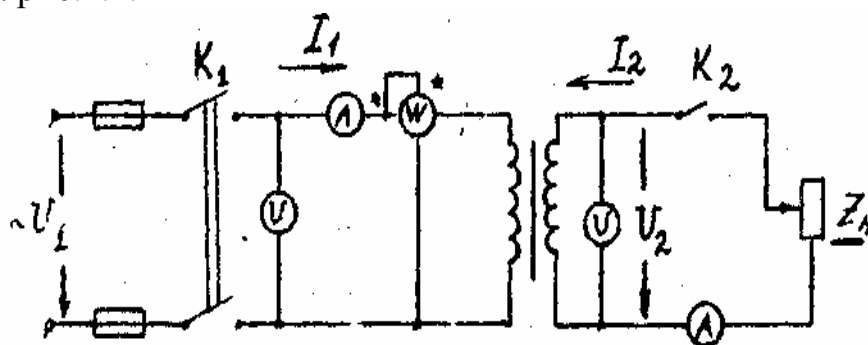


Рис.4.1. Принципиальная схема трансформатора с измерительными приборами.

На рисунке изображен двухобмоточный трансформатор, первичная обмотка которого подключена к источнику переменного напряжения U_1 . Напряжение подается через два предохранителя и рубильник K_1 . При включении рубильника напряжение U_1 подается на первичную обмотку трансформатора. При этом на

вторичной обмотке трансформатора появляется напряжение U_2 . Во входной цепи трансформатора включены: вольтметр (V), амперметр (A) и ваттметр (W). Параллельно вторичной обмотке трансформатора включен вольтметр, измеряющий напряжение U_2 и амперметр, измеряющий ток, протекающий через сопротивление нагрузки Z_n . При выключенном рубильнике K2 выходная цепь трансформатора разомкнута и ток через сопротивление нагрузки не протекает (режим холостого хода трансформатора).

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

На щитках мощных трансформаторов обычно указываются:

1. Номинальные высшее и низшее напряжения, на которые рассчитан трансформатор в [В].
2. Номинальная полная мощность в [В*А].
3. Токи, протекающие в обмотках при номинальной полной мощности [А].

Режимы работы трансформаторов

- Режим повышающего трансформатора, когда U_2 больше U_1 .
- Режим понижающего трансформатора, когда U_2 меньше U_1 .
- Режим номинальный при номинальных значениях напряжений и токов в первичной обмотке.
- Режим рабочий при номинальном напряжении в первичной обмотке.
- Режим холостого хода, когда ток во вторичной обмотке равен нулю.
- Режим короткого замыкания – напряжение вторичной обмотки равно нулю.

Отношение э.д.с. первичной обмотки к э.д.с. во вторичной обмотки называется коэффициентом трансформации.

$$n_{1,2} = W_1 / W_2 \quad (4.1)$$

где W_1 – число витков первичной обмотки.

W_2 – число витков вторичной обмотки.

Приблизительно коэффициент трансформации определяется как отношение напряжения в первичной обмотке к напряжению вторичной обмотки при опыте холостого хода. Маломощные трансформаторы могут использоваться как повышающие и как понижающие, поэтому в паспорте трансформатора коэффициент трансформации обозначается как отношение высшего напряжения к низшему напряжению.

Коэффициент полезного действия трансформатора. КПД силовых электротехнических трансформаторов очень высок и обычно равен в номинальном режиме 0,98...0,99. Потери энергии в трансформаторах складываются из потерь в сердечнике и потерь в обмотках. Потери в сердечнике в свою очередь складываются из потерь на вихревые токи и потерь, связанных с явлением гистерезиса – нелинейной и неоднозначной зависимостью магнитной индукции B от напряженности H магнитного поля. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечники трансформаторов набираются из тонких, и изолированных слоев лака стальных листов.

Потери из-за гистерезиса зависят от качества (сорта) электротехнической

стали, а также от частоты колебаний переменного напряжения и напряженности магнитного поля в сердечнике. Экспериментально потери в стали определяются из опыта холостого хода трансформатора, когда ток $I_2=0$, а ток I_1 имеет небольшую величину (единицы процентов от номинальной величины). При этом практически вся мощность, потребляемая трансформатором, расходуется на покрытие потерь в сердечнике трансформатора $P_0=P_{ст}$. Потери в медных проводах определяются из опыта короткого замыкания, при котором токи в обеих обмотках имеют номинальное значение, а напряжение, подводимое к первичной обмотке, равно 1.2 процента от номинальной.

4.2. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трехфазные трансформаторы выпускаются на мощность до 60МВА. Начиная с 1800 кВА разрешается использовать вместо одного трехфазного трансформатора группы из трех однофазных трансформаторов, каждый из которых рассчитан на мощность 600кВА.

Катушки индуктивности трехфазных трансформаторов как и однофазных располагаются в окнах электромагнитного сердечника из электротехнической стали с большим коэффициентом магнитной проницаемости. Коэффициенты трансформации также определяются отношением числа витков в первичной и вторичной обмотках. Варианты соединения первичных и вторичных обмоток трансформаторов определяются ГОСТ.

Для трехфазных трансформаторов ГОСТ разрешает следующие группы включения обмоток:

Группа 0-звезда/звезда с выведенной нулевой точкой;

Группа 11 а -звезда /треугольник

Группа 11 б -звезда (с выводом нулевой точки) /треугольник.

Группы соединения обмоток трансформатора служат также для условного обозначения сдвига фаз вторичного напряжения по отношению к первичному.

4.3. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

При небольших коэффициентах трансформации, 1,5...2, экономически целесообразно использовать автотрансформаторы.

Автотрансформатор отличается от обычного трансформатора тем, что имеет только одну обмотку «высшего напряжения». В качестве обмотки «низшего напряжения» используется часть обмотки «высшего напряжения».

Преимуществом автотрансформаторов являются меньшие габариты и более низкая стоимость, так как часть обмотки, с которой снимается выходное напряжение, может быть намотана из более тонкого провода. Автотрансформаторы широко используются в бытовой электротехнической аппаратуре. Существенным недостатком автотрансформаторов является связь по постоянному току между первичной и вторичной обмотками.

В том случае, когда контакт выходной обмотки трансформатора выполняется подвижным, появляется возможность изменять коэффициент трансформации. Автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации используются в тех случаях, когда необходимо иметь источник плавно изменяю-

щегося напряжения.

4.4. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ

В пищевой промышленности используются однокамерные и двухкамерные понижающие трансформаторные подстанции.

Упрощенная структурная схема двухкамерной понижающей трансформаторной подстанции приведена на рис.4.2

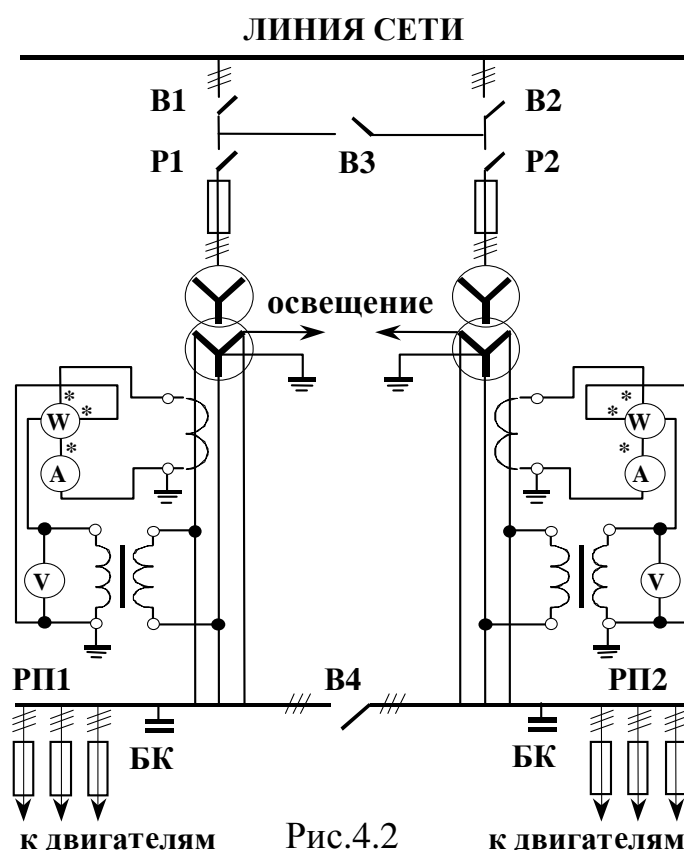


Рис.4.2

Рис.4.2. Структурная схема двухкамерной понижающей трансформаторной подстанции

На трансформаторной подстанции установлены два трехфазных трансформаторов, один из которых резервный. Подстанция предназначена для понижения магистрального напряжения 10 кВ до 380В (220В). Переключение на резервный трансформатор осуществляется коммутаторами В1, В2, В3, В4.

Линейное напряжение 380В через распределительные пункты РП1 и РП2 подается на электродвигатели и другое технологическое оборудование. Фазное напряжение, равное 220В используется для освещения, а также для питания контрольно-измерительной аппаратуры.

Во вторичной обмотке трансформатора включены через измерительные трансформаторы тока и напряжения подключаются ваттметр, амперметр и вольтметр, а также не показанный на схеме счетчик электроэнергии. Счетчик энергии включается по такой же схеме как ваттметр: токовая обмотка включается измерительному токовому трансформатору; напряженческая обмотка к выводам измерительного трансформатора напряжения.

Ко вторичной обмотке трансформатора подключены также батареи конден-

саторов (БК), используемые для компенсации реактивной мощности. Реактивная мощность потребляется электродвигателями и сильно увеличивается при недогрузке электродвигателя. Коэффициент мощности электродвигателя, работающего на холостом ходу, равен 0,2.

4.5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ 4

1. На каких принципах основана работа трансформатора?
2. Почему в трансформаторе обмотка низшего напряжения выполняется проводом большого сечения, чем обмотка высшего напряжения?
3. Какие типы магнитопроводов используются в электротехнических устройствах?
4. Почему при исследовании трансформатора опыт холостого хода проводят при нормальном приложенном напряжении, а опыт короткого замыкания - при нормальном первичном токе?
5. От каких параметров зависит К.П.Д. трансформатора?
6. Какие трехфазные трансформаторы можно включать на параллельную работу?
7. На каком принципе основана работа автотрансформатора?
8. Какие конструктивные особенности имеют измерительные трансформаторы тока?

4.6. ТЕСТ ПО ТЕМЕ 4

1. Чему равно максимальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора в режиме холостого хода, если на первичную обмотку трансформатора подано действующее (среднеквадратическое) напряжение равное 220В, а коэффициент трансформации n_{12} , равен 2? **Ответы**, один из которых правильный: 200В; 155В; 308В; 616В.
2. Какие приборы надо включить во вторичную цепь понижающего трансформатора для измерения активной мощности? **Ответы**, один из которых правильный: ваттметр, вольтметр и амперметр, фазометр.
3. Определить коэффициент трансформации, если на его первичную обмотку подано напряжение 660В, а на его вторичной обмотке измерено напряжение, равное 380В. **Ответы**, один из которых правильный: 2,0; 1,73; 4,0; 2,5; 3,0.
4. Между какими выводами трехфазного трансформатора надо включить лампу освещения, рассчитанную на напряжение 220 В, если на первичные обмотки трехфазного трансформатора подано напряжение 660В, а коэффициент трансформации равен $n_{12}=2$. **Ответы**, один из которых правильный: между нейтральным проводом и любой из фаз; между фазами А и В; между фазами В и С; между фазами С и А.
5. Определить мощность потребляемую трехфазным трансформатором в случае, если фазные напряжения во вторичной обмотке равны 220 В, сопротивления нагрузки включены по схеме «звезда» и равны 220 Ом, а коэффициент полезного действия трансформатора равен 0,9. **Ответы**, один из которых правильный: 660 Вт; 594 Вт; 600 Вт; 900 Вт.

ЧАСТЬ 3. ЭЛЕКТРОНИКА

ТЕМА 5. ТРАНЗИСТОРЫ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

5.1. ВВЕДЕНИЕ

Понятие электроника включает с себя широкий круг вопросов и проблем. Это и рассмотрение систем, работающие в диапазоне рентгеновских и ультрафиолетовых частот, это и устройства, работающие в диапазоне видимых и инфракрасных частот, это и обширная номенклатура приборов СВЧ диапазона частот, это и еще более широкий класс устройств дециметрового и метрового диапазона волн и т.д.

В настоящем учебном пособии в соответствии с утвержденными учебными планами и стандартами основное внимание уделяется интегральной полупроводниковой электронике и электронике больших мощностей, а также проблемам построения управляемых выпрямителей для систем автоматического управления электроприводом.

В мощных электронных устройствах в настоящее время в основном используются биполярные дискретные транзисторы. Маломощные интегральные устройства преимущественно строятся на полевых МДП-транзисторах с изолированным затвором. Полевые канальные транзисторы с управляющим р-п переходом в основном используются во входных каскадах измерительных усилителей и приемных устройств. Интегральные полупроводниковые микросхемы для ЭВМ и устройств автоматики в настоящее время в основном выполняются на КМДП-транзисторах и МДП-конденсаторах. Размеры интегральных полупроводниковых транзисторов очень малы (порядка 100 нм), потребляемая мощность составляет доли микроватт. Напряжение питания интегральных схем снижено до 2 Вольт. Как правило, интегральные схемы строятся на одних МДП-транзисторах и конденсаторах и не содержат других элементов. Это позволяет размещать на одном монокристалле размером в один квадратный дюйм до миллиона МДП - транзисторов. Интегральные схемы характеризуются высокой надежностью и устойчивостью к изменениям параметров внешней среды.

5.2. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Транзисторами называются управляемые полупроводниковые приборы, способные усиливать мощность электрических сигналов.

По принципу работы они делятся на два класса: биполярные и униполярные. Термин "биполярный" подчеркивает роль как носителей отрицательных зарядов (электронов-«п»), так и положительных зарядов (дырок-«р») в образовании проводящих каналов. Термин "униполярный" говорит о том, что проводящий канал образуется одним типом носителей (электронами или положительными зарядами).

Биполярный транзистор представляет собой совокупность двух включенных навстречу взаимодействующих между собой р-п переходов. В соответствии с чередованием областей с различными типами электропроводности биполярные

транзисторы подразделяются на два класса «р-п-р» и «п-р-п».

Центральный слой полупроводника между «р-п»-переходами в транзисторах называется базой, слой, являющийся источником носителей зарядов (электронов или дырок), называется эмиттером, слой, принимающий заряды от эмиттера, называется коллектором.

Напряжение на «р-п»-переход эмиттер-база подается в прямом направлении. Поэтому даже при небольших напряжениях через него протекает ток базы (I_B). Это обстоятельство определяет сравнительно небольшую величину входного сопротивления транзистора, которое для постоянного тока определяется выражением $R_{вх} = U_{бэ} / I_B$ (см. рис 5.1.).

На переход коллектор-база напряжение подается в обратном направлении. Так как при включении транзистора один электрод является общим для входной и выходной цепи, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК). Наиболее часто в усилителях мощности на биполярных транзисторах используются схемы включения транзисторов с общим эмиттером и общим коллектором.

На рис.5.1. приведены входная: $I_B = F(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ и переходная: $I_k = F(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ статические вольтамперные характеристики биполярного транзистора.

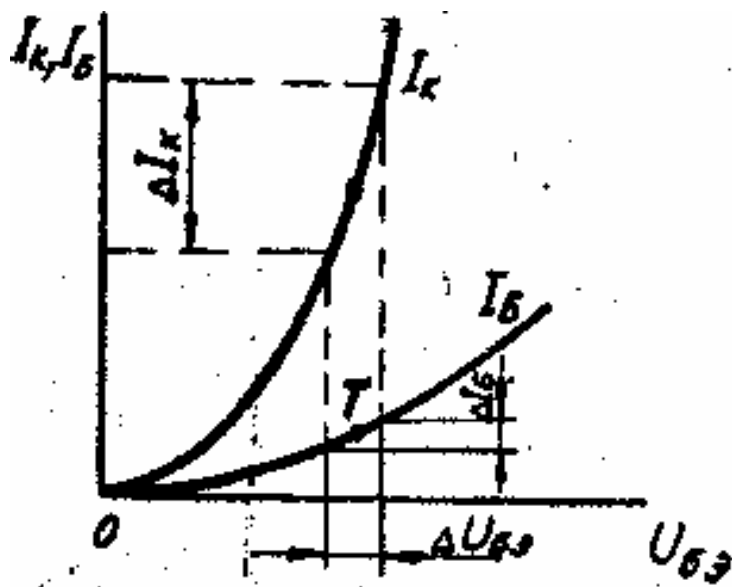


Рис. 5.1. Входная и переходная статические вольтамперные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Из рассмотрения характеристик видно, что характерной особенностью биполярного транзистора является протекание тока во входной цепи при любых значениях входного напряжения $U_{бэ}$.

По входной характеристике транзистора можно определить его входное сопротивление переменному току на низких частотах. Для этого в рабочей точке Т (см. рис. 5.2.) строится характеристический треугольник. Рабочая точка Т лежит посередине его гипотенузы, а катеты параллельны осям. Затем определяются приращения напряжения и тока базы. По найденным приращениям тока базы ΔI_B и напряжения $\Delta U_{бэ}$ определяется входное сопротивление $R_{вх} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_B$ при $U_{кэ} = \text{const}$.

По переходной характеристике транзистора таким же методом можно определить ее крутизну $S_k = \Delta I_k / \Delta U_{кэ}$. Зная значение S_k и величину сопротивления нагрузки R_n можно определить приближенное значение коэффициента усиления по напряжению $K_u = S_k * R_n$. Более точно значения коэффициента усиления по напряжению на низких частотах можно определить с учетом сопротивления транзистора переменному току R_k .

Для того необходимо воспользоваться выходными вольтамперными характеристиками транзистора. На рис. 5.2. приведено семейство выходных вольтамперных характеристик $I_k = F(U_{кэ})$ при $I_b = \text{const}$ биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

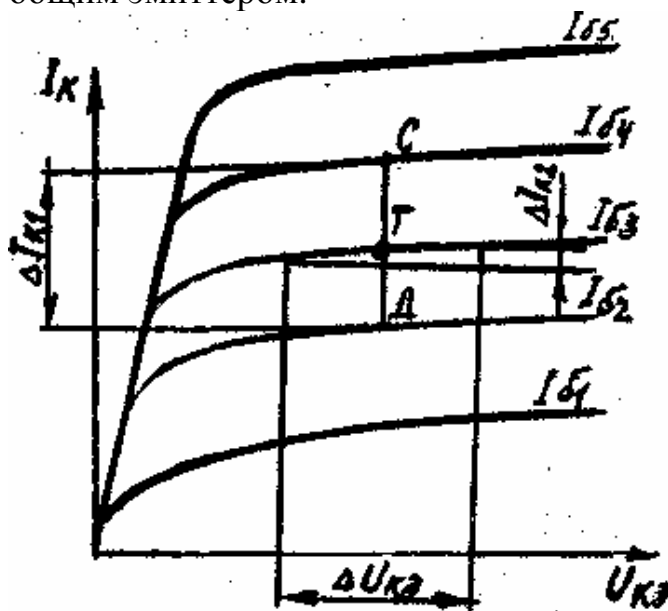


Рис. 5.2. Выходные вольтамперные характеристики биполярного транзистора типа п-р-п при включении по схеме с общим эмиттером

Из рассмотрения характеристик видно, что по мере увеличения напряжения $U_{кэ}$ от нуля до небольших значений порядка вольта ток коллектора (I_k) резко возрастает. Этот участок соответствует линии насыщения тока транзистора и малой величине сопротивления транзистора переменному току. При дальнейшем увеличении $U_{кэ}$ ток коллектора возрастает медленнее, что соответствует резкому увеличению сопротивления транзистора переменному току.

Величина сопротивление транзистора переменному току определяется следующим образом. Около выбранной рабочей точки Т строится характеристический треугольник, из которого определяются значения приращений тока коллектора ΔI_k , ΔI_b и напряжения $\Delta U_{кэ}$. Величина сопротивления транзистора переменному току (R_k) определяется по формуле: $R_k = \Delta U_{кэ} / \Delta I_k$.

Сопротивление транзистора постоянному току также определяется из выходных характеристик транзистора. В точке Т оно равно формуле $R_k = U_{кэ} / I_k$.

Величина коэффициента усиления по току (K_i) определяется по формуле $K_i = \Delta I_k / \Delta I_b$. Величина коэффициента усиления по напряжению по формуле $K_u = S_k * R_n / R_k + R_n$.

Рабочая точка по постоянному току Т выбирается в зависимости от мощности и предназначения транзистора. При необходимости усилить слабые сигналы без существенных искажений рабочая точка выбирается как это показано на

рис 5.2. При использовании биполярных транзисторов типа п-р-п для усилении положительных импульсных сигналов рабочая точка выбирается таким образом, чтобы при отсутствии сигнала транзистор находился практически в запертом состоянии (точка А). В этом случае при подаче положительного сигнала транзистор за время равное длительности переднего фронта импульса переходит из запертого состояния в открытое (точка Б).

В том случае, когда необходимо усиливать отрицательные импульсы используется транзистор типа р-п-р. В тех случаях, когда надо усиливать сигналы обеих полярностей используется схема двухтактного (компенментарного) усилителя на транзисторах двух типов п-р-п и р-п-р. Рассмотрение схемы такого усилителя приведено в следующем параграфе.

5.3. МОЩНЫЕ ВЫХОДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Мощные усилители на биполярных транзисторах широко используются в устройствах управления электродвигателями, заслонками и другими элементами систем автоматического управления технологическими процессами. Как правило, они включаются на выходе цифроаналоговых преобразователей, на которые в свою очередь подаются управляющие сигналы от микроконтроллеров. Принципиальная схема усилителя мощности приведена на рис.5.3.

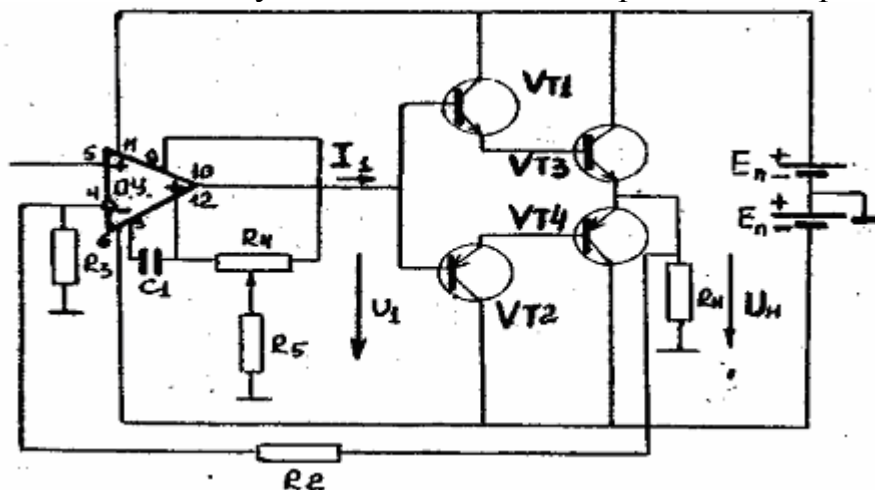


Рис.5.3.Принципиальная схема усилителя мощности

Усилитель мощности состоит из операционного усилителя (ОУ) и окончного комплементарного эмиттерного повторителя, включенного по схеме Дарлингтона на транзисторах VT1, VT2, VT3, VT4В рассматриваемом усилителе входной сигнал подается на неинвертирующий вход операционного усилителя. С выхода операционного усилителя сигнал подается на эмиттеры транзисторов VT1 и VT2.Питание усилителя осуществляется от двух источников питания +Еп и -Еп. Усилитель охвачен отрицательной обратной связью через резисторы R2 и R4.

5.4. ПОЛЕВЫЕ КАНАЛЬНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С УПРАВЛЯЮЩИМ Р-П ПЕРЕХОДОМ

Усиление сигналов в полевых транзисторах основано на управлении током основных носителей, протекающих в полупроводнике.

Устройство полевого транзистора с управляющим «р-п» переходом показано на рис 5.4.

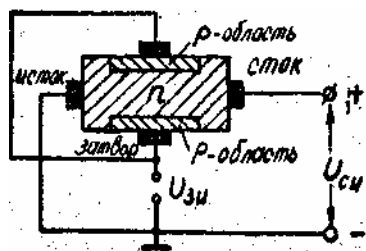


Рис.5.4. Устройство полевого канального транзистора с затвором на основе «р-п» перехода

Транзистор имеет три электрода: исток, сток и затвор. В полевых канальных транзисторах напряжение сигнала, подаваемое между затвором и истоком, $U_{вх}=U_{зи}$ управляет (изменяя эффективное сечение или удельную проводимость полупроводника) током источника питания, протекающим через полупроводник стока к истоку. В канальных полевых транзисторах это достигается изменением эффективного сечения проводящего канала с помощью обратнo-смещённого р-п перехода.

При этом требующаяся мощность управляющего сигнала значительно меньше мощности электрического тока, протекающего в цепи сток-исток. Управляющая (входная) цепь практически не потребляет тока, так как представляет собой р-п переход, смещенный в область обратных напряжений.

В зависимости от электропроводности материала полупроводника, полевые транзисторы подразделяются на транзисторы с каналами «р» и «п» типов. На рис.5.5. приведена схема включения полевого канального транзистора.

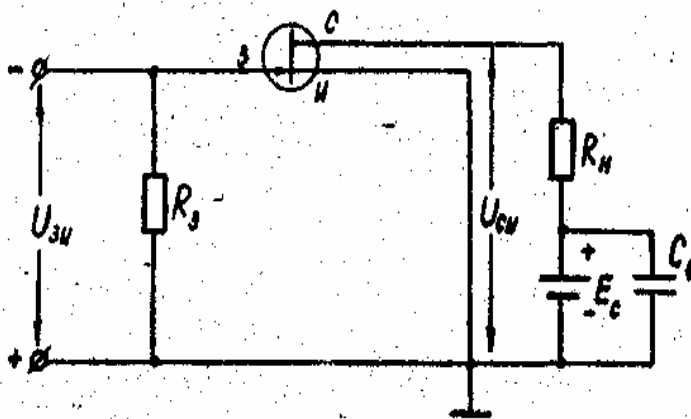


Рис.5.5. Схема включения полевого канального транзистора

5.5. МДП-ТРАНЗИТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ И ИНДУЦИРОВАННЫМ ПРОВОДЯЩИМ КАНАЛОМ

Транзисторы с индуцированным проводящим п-каналом изготавливаются монокристаллической полупроводниковой подложке р-типа. Устройство МДП-транзистора показано на рис.5.6.

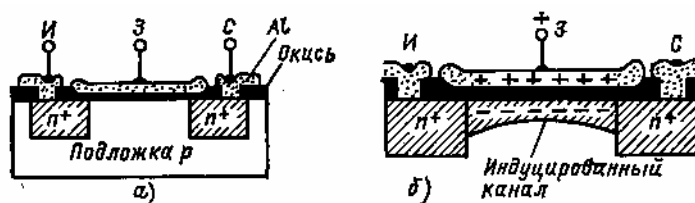


Рис.5.6. Устройство полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным «п» проводящим каналом

Транзистор выполнен на подложке из кремния типа «р» (см рис. 5.6 а). В поверхностном слое подложки формируется две области обогащенные электронами (области n^+). Омические контакты соединяют эти области с двумя выводами из поликремния: истоком (обозначен на рисунке буквой «и») и стоком (обозначен на рисунке буквой «с»).

Затвор обозначен буквой «з» и подложка разделенные тонким изолирующим слоем двуокиси кремния. При этом образуется входной МДП-конденсатор.

Действие транзистора иллюстрируется рис. 5.6.б. Электрическое поле, создаваемое положительным потенциалом затвора, индуцирует соответствующий отрицательный заряд в полупроводнике подложки, которая служит как бы второй пластиной конденсатора. При возрастании положительного напряжения, приложенного к затвору, в области подложки между истоком и стоком образуется инверсионный слой с электронной проводимостью «п» проводящий канал. Через этот индуцированный канал типа «п» может протекать ток от стока к истоку. Чем больше напряжение на затворе, тем больше поперечное сечение индуцированного канала и, следовательно, больший ток протекает между истоком и стоком. Иначе говоря, величиной тока стока можно управлять путем изменения потенциалов на затворе.

5.6. МДП-ТРАНЗИСТОРЫ С ВСТРОЕННЫМ ПРОВОДЯЩИМ КАНАЛОМ

Устройство полевого МДП-транзистора с изолированным затвором и встроенным n -каналом показано на рис. 5.7. а.

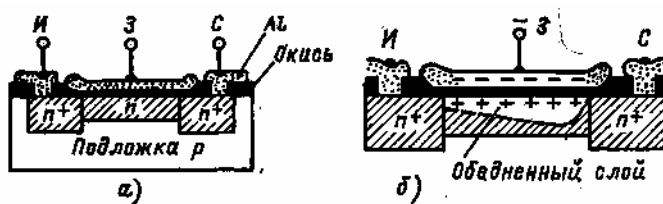


Рис. 5.7. Устройство полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным проводящим каналом.

В этом случае в структуре МДП-транзистора при изготовлении методом диффузии формируется канал типа «п». При подаче на затвор отрицательного потенциала в канале индуцируются положительные заряды и формируется обедненный слой, который увеличивает удельное сопротивление канала. Этот процесс иллюстрирует рис. 5.7.б. При этом таком состоянии вольтамперные характеристики транзистора аналогичны характеристикам полевого транзистора с управляющим p - n переходом при отрицательном потенциале на затворе между истоком и стоком.

При подаче на затвор транзистора со встроенным каналом типа n положи-

тельного потенциала, то индуцированные отрицательные заряды в канале приведут к снижению удельного сопротивления канала, и прибор станет работать как МДП-транзистор с индуцированным каналом.

Выходная (а) и переходная (б) статические вольтамперные характеристики транзистора с встроенным «п» проводящим каналом приведены на рис.5.8.

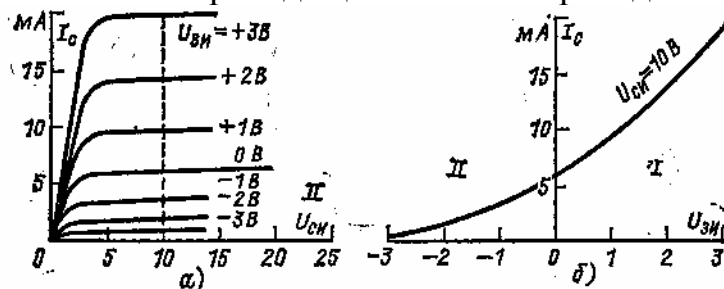


Рис. 5.8. Статические вольтамперные характеристики МДП-транзистора с изолированным затвором и со встроенным «п» проводящим каналом.

На рис.5.9. приведены условные обозначения полевых транзисторов на электрических схемах.

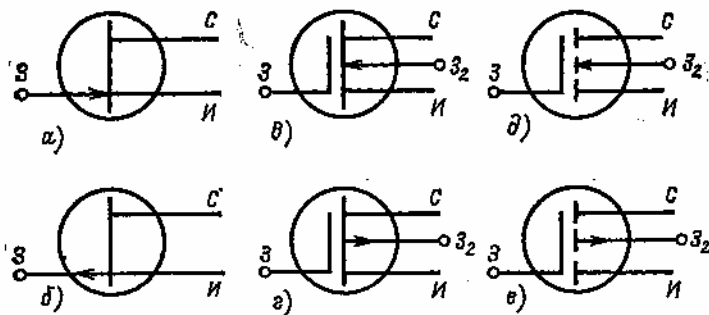


Рис. 5.9. Условные обозначения полевых транзисторов :

- а) и б) – полевые каналные транзисторы с управляющим р-п переходом;
- в) и г) – МДП-транзисторы с изолированным затвором и встроенными п и р проводящими каналами;
- д) и е) – МДП-транзисторы с изолированным затвором и индуцированными п и р каналами.

5.7. УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛОВ НА МДП -ТРАНЗИСТОРАХ

Интегральные усилители, а также логические схемы, используемые в устройствах автоматизации технологических процессов, в настоящее, как правило, состоятся на МДП-транзисторах. В интегральных схемах на МДП-транзисторах имеется возможность в качестве сопротивления нагрузки использовать те же транзисторы.

На рис.5.10.а приведена принципиальная схема усилителя импульсных сигналов на двух МДП-транзисторах с проводящими каналами р-типа.

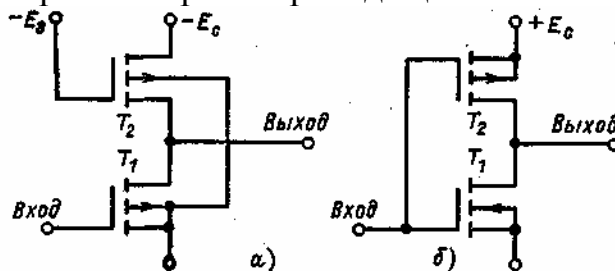


Рис. 5.10. Принципиальные схемы усилителей (инверторов) на МДП-транзисторах с р-каналом (а) и на комплементарных (дополняющих) КМДП-транзисторах (б).

Рассмотрим процессы в усилителе на МДП-транзисторах с р-проводящими каналами (рис.5.10а). Транзистор T_1 , на вход которого подается отрицательный импульсный сигнал, выполняет роль усилительного элемента. Транзистор T_2 создает сопротивление нагрузки. С истока этого транзистора снимается выходное усиленное напряжение. На сток транзистора T_2 подается отрицательное напряжение от источника постоянного напряжения $-E_c$. Вывод источника питания, находящийся под положительным потенциалом соединяется с истоком транзистора T_1 . На затвор транзистора T_2 подается отрицательное напряжение $-E_c$, открывающее транзистор T_2 . При подаче на затвор транзистора T_1 отрицательного импульса через транзисторы T_1 и T_2 протекает ток и выходе усилителя формируется усиленный положительный импульс. Рассмотренная схема выполняет также роль инвертора, изменяющего знак входного сигнала, и может быть использована в качестве логической схемы «НЕ».

5.7.1. УСИЛИТЕЛЬ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ НА КМДП-ТРАНЗИСТОРЕ

На рис.5.10.б приведена принципиальная схема усилителя импульсных сигналов на комплементарном (дополняющем) КМДП-транзисторе. КМДП-транзистор состоит из двух транзисторов (T_1 и T_2) с «п» и «р» проводящими каналами. Затворы и стоки транзисторов объединены при их изготовлении. К истокам транзисторов подключается напряжение от источника питания (E_c). На исток транзистора T_2 подается положительное напряжение источника питания, отрицательный вывод которого подсоединен к истоку транзистора T_1 .

В отсутствии импульсного сигнала на входе оба транзистора закрыты и через них течет очень маленький ток, равный нескольким нано амперам. Так как сопротивления транзисторов T_1 и T_2 для постоянного тока практически равны между собой, напряжение источника питания делится пополам и напряжение на выходной клемме оказывается, равным $E_c/2$.

При подаче на вход усилителя положительного импульса открывается транзистор T_1 с «п»-проводящим каналом, но остается закрытым транзистор T_2 . Соответственно напряжение на выходе уменьшается практически до нуля (точка «В»,соответствующая $U_{си. нас}$,на выходной ВАХ транзистора на рис5.12.) таким образом на выходе транзистора образуется усиленный отрицательный импульс.

При подаче на вход усилителя отрицательного импульса открывается транзистор T_2 с «р»-проводящим каналом, но остается закрытым транзистор T_1 , При этом практически все напряжение падает на транзисторе T_1 и на выходе усилителя формируется положительный импульс. Таким образом, усилитель работает как инвертор независимо от того какого знака импульс подается на его вход.

5.7.2. УСИЛИТЕЛИ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ НА К-МДП-ТРАНЗИСТОРА

В случае необходимости усиления слабых сигналов в схеме, приведенной на рис 5.11.б необходимо соединить по постоянному току точки выводов сто-

ков и затворов. Это достигается включением между ними еще одного комплементарного МДП-транзистора. При этом в отсутствии сигналов на входе усилителя на затворы транзисторов T1 и T2 подаются открывающие их напряжение, равное $E_c/2$. В этом случае усилитель может усиливать без искажений любые слабые сигналы как импульсные, так и любой другой формы.

5.7.3. АВТОГЕНЕРАТОР НА КМДП-ТРАНЗИСТОРАХ

На основе усилителя слабых сигналов может быть построен автогенератор колебаний с кварцевым резонатором включенном в цепь положительной обратной связи. Кварцевый резонатор включается между стоками и затворами транзисторов. При изучении темы 2 уже отмечалось, что эквивалентная электрическая схема кварцевого резонатора соответствует схеме контура, состоящего из последовательно включенных R, L, C элементов. В колебательном контуре такого типа при равенстве $X_c = X_l$ возникает резонанс напряжений и его сопротивление уменьшается до величины R. При этом напряжение с выхода усилителя подается на его вход и создаются положительная обратная связь, обеспечивающая возникновение автоколебаний с частотой близкой к частоте

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

5.7.4. ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ

На рис 5.11 приведена принципиальная схема логического элемента «ИЛИ-НЕ» на МДП-транзисторах с индуцированным «n»-проводящим каналом.

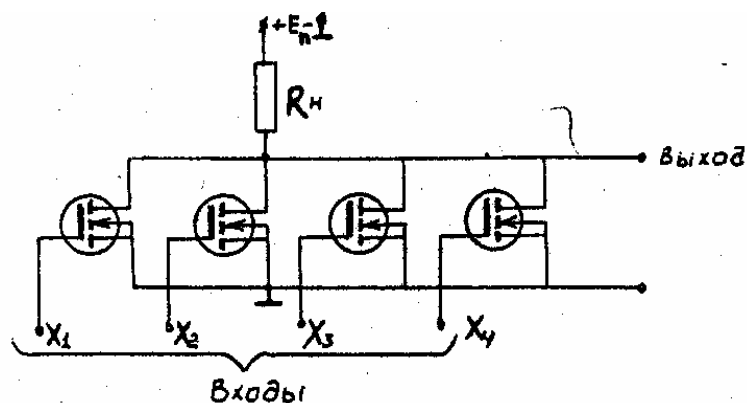


Рис.5.11. Принципиальная схема логического элемента «ИЛИ-НЕ»

При отсутствии управляющих импульсов на входах транзисторов все четыре транзистора закрыты, ток через резистор R_n не идет и напряжение на выходе схемы близко к E_p (см.рис.5.12) При подаче положительного сигнала на затвор любого из транзисторов (x_1, \dots, x_4) соответствующий транзистор открывается, через R_n протекает ток $I_{с.нас.}$ и выходное напряжения на транзисторах становится равным $U_{си.нас.}$ Таким образом схема выполняет логическую операцию «ИЛИ-НЕ». В реальных интегральных схемах сопротивление нагрузки R_n выполняется на МДП-транзисторе с встроенным «n»-проводящим каналом. Это объясняется тем обстоятельством, что размеры резистора в тысячу раз превышают размеры транзистора.

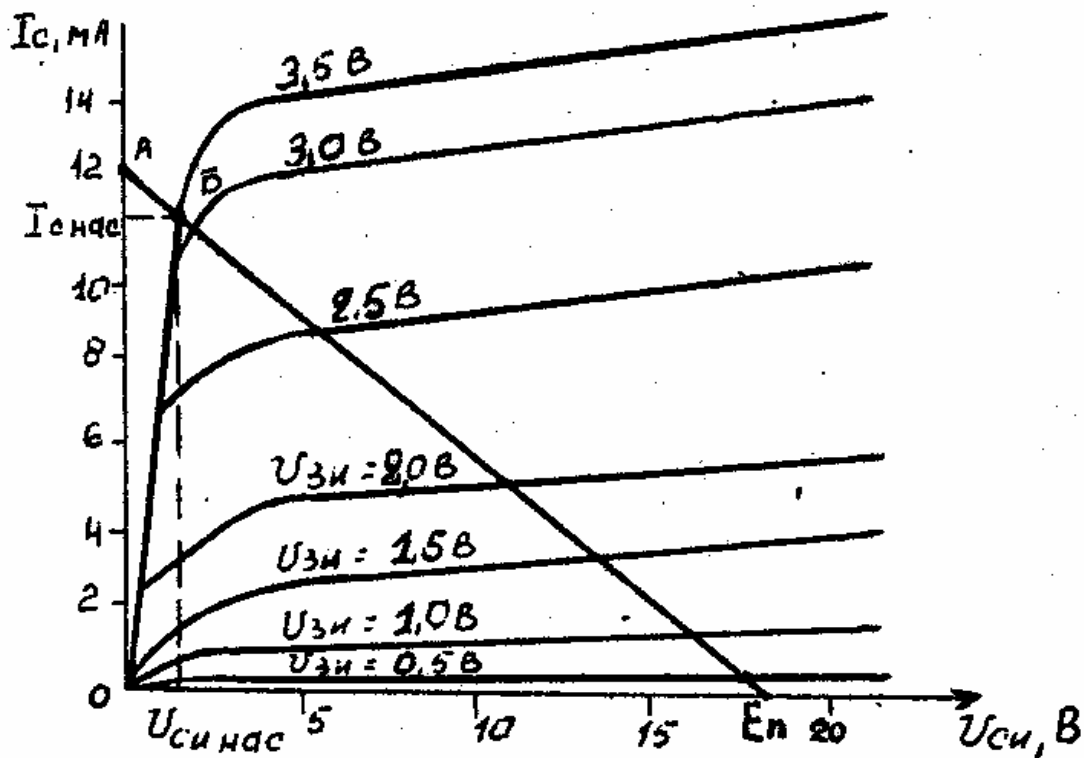


Рис. 5.12.Выходные вольтамперные статические характеристики МДП-транзистора с индуцированным «п»- проводящим каналом.

5.8. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционный усилитель представляет собой интегральную полупроводниковую схему, выполненную единым технологическим приемом, и состоящую из нескольких десятков полупроводниковых транзисторов. Операционный усилитель имеет два входа и один выход. Один из входов ОУ называется инвертирующим, так как при подаче сигнала на его вход сигнал на выходе оказывается противоположного знака. Другой вход называется неинвертирующим, так как при подаче сигнала на этот вход, усиленный сигнал на выходе оказывается того же знака. Благодаря наличию инвертирующего и неинвертирующего входов сигнал на выходе ОУ пропорционален разности сигналов на его входах. Это обстоятельство позволяет ослаблять синфазные промышленные помехи, воздействующие одновременно на оба входа ОУ. Одиночный ОУ ослабляет синфазную помеху на 40 дБ. Схема из трех операционных усилителей ослабляет синфазные помехи на 90 дБ. Поэтому операционные усилители включаются на входах всех измерительных устройств, предназначенных для работы в цехах промышленных предприятий, в которых уровень промышленных помех может достигать 120дБ над уровнем собственных шумов датчиков и усилителей сигналов. Операционные усилители включаются также на входах аналогоцифровых преобразователей, используемых для ввода информации от контрольно-измерительных систем в ЭВМ. Промышленностью выпускаются также операционные усилители с мощностью выходного сигнала до 100Вт. Операционные усилители этого типа используются для управления маломощными исполнительными устройствами автоматики и часто включаются на выходах цифроаналоговых преобразователей. В случае, если выходная мощность ОУ недостаточ-

на для управления исполнительным устройством, на его выходе включаются дополнительные усилители мощности на мощных биполярных транзисторах (см. раздел 5.2.). Принципиальная схема операционного усилителя (ОУ) приведена на рис. 5.13.

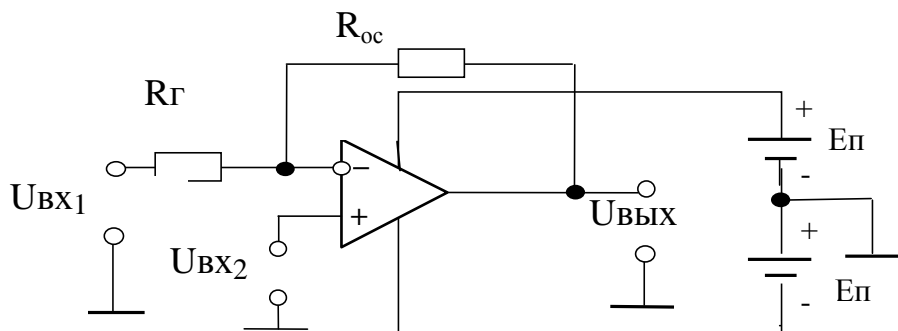


Рис.5.13. Схема операционного усилителя, охваченного отрицательной обратной связью

Усилитель охвачен отрицательной обратной связью. Для этого часть напряжения с его выхода ($U_{\text{вых}}$) подается через сопротивление $R_{\text{ос}}$ на инвертирующий вход усилителя. Отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления ОУ, расширяет динамический диапазон его амплитудной характеристики, увеличивает полосу пропускания. При этом коэффициент усиления по напряжению ($K_{\text{и о.с.}}$) приблизительно определяется выражением: $K_{\text{и о.с.}} = R_{\text{ос}}/R_{\text{г}}$, где $R_{\text{г}}$ – внутреннее сопротивление источника сигнала, $R_{\text{ос}}$ – сопротивление, включенное в цепи обратной связи.

Величина сопротивления, включаемого в цепи обратной связи усилителя выбирается таким образом, чтобы обеспечить без искажений усиление сигналов, подаваемых на входы усилителя. На рис.5.14. для примера приведена амплитудная характеристика операционного усилителя типа КР544УД2В для случая, когда напряжения источника питания ($E_{\text{п}}$), равны +12 В и -12В.

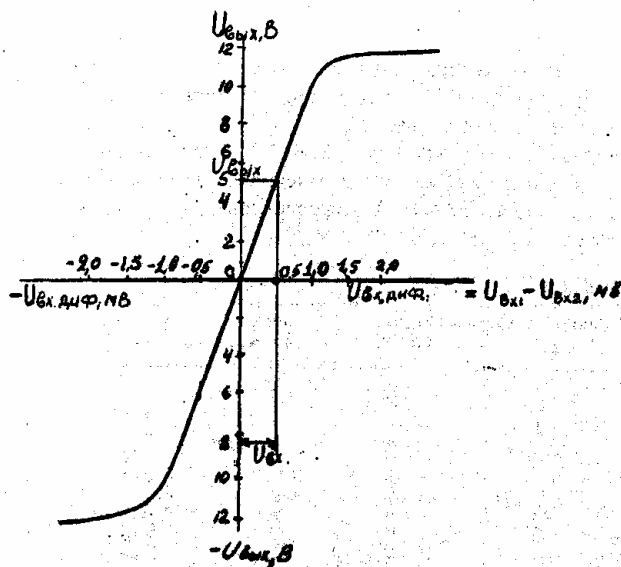


Рис.5.14. Амплитудная характеристика операционного усилителя КР544УД2В

На рис.5.14. приведена амплитудно-частотная характеристика того же усилителя.

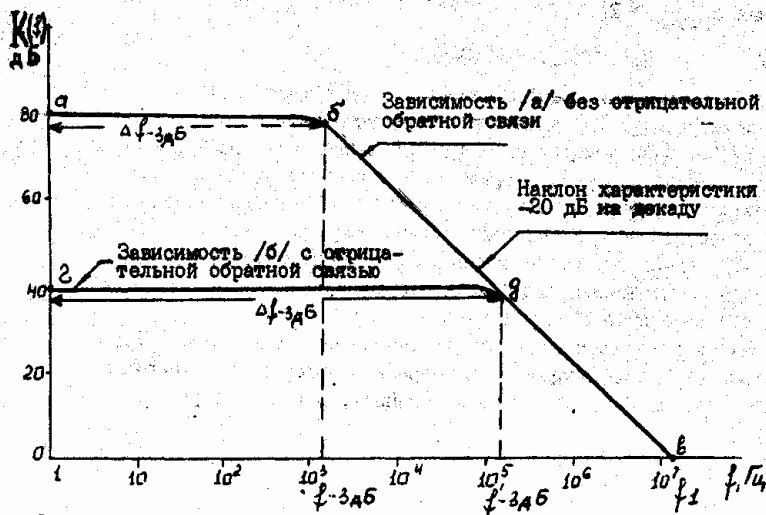


Рис.5.15. Амплитудно-частотные характеристики операционного усилителя без (а) и с отрицательной обратной связью (б).

Амплитудно-частотная характеристика построена для ОУ типа КР544УД2Б с коэффициентом $K_{и.о.} = 10000$ (80дБ) и значением максимальной частоты на которой коэффициент усиления по напряжению равен 0 дБ - $f_1 = 15$ МГц.

На этом же рисунке построена амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя с отрицательной обратной связью для случая, когда $K_{и.о.с.} = 100$, (40дБ). Для построения этой характеристики точка "г" соответствующая $K_{и.о.с.} = 40$ дБ, соединяется с точкой "в", в которой усиление $K_{и.о.с.}$ на 3дБ меньше, т.е. равно 37 дБ, а точка "г" соединяется с точкой "б".

На рисунке показаны полосы пропускания усилителей на уровне $\Delta f = 3$ дБ, равные соответственно 1,5 кГц; для ОУ без обратной связи и 150 кГц для ОУ при замкнутой цепи отрицательной обратной связи.

5.9. Автогенераторы колебаний напряжения

В пищевых отраслях промышленности, в том числе в системах автоматизации технологических процессов, в настоящее время наряду с цифровыми синтезаторами сеток опорных частот, достаточно широко используются автогенераторы, построенные с использованием дискретных элементов: кварцевых резонаторов, резисторов, конденсаторов, дискретных полупроводниковых приборов. Особенно часто используются, рассмотренные ниже, генераторы с мотом Вина в цепи положительной обратной связи. Генераторы этого типа позволяют получить сигналы очень низких частот, вплоть до долей Герца.

В общем случае автогенератор гармонических колебаний состоит из колебательного контура, определяющего диапазон частот автоколебаний и усилительного элемента, компенсирующего потери в колебательном контуре. Усилительный элемент может быть совмещен с колебательным контуром, как, например, это делается в оптических квантовых генераторах (лазерах), генераторах Ганна и некоторых других. В оптических квантовых генераторах компенсация потерь в колебательном контуре осуществляется за счет энергии накачки, используемой для стимуляции внутриатомных переходов электронов на более высокие энергетические уровни. Однако чаще усилительный элемент выполняется от-

дельно от колебательного контура (генераторы на лавинно-пролетных диодах, генераторы с усилителями на транзисторах). При этом компенсация потерь в колебательном контуре осуществляется в результате использования энергии, получаемой от источника питания операционного усилителя. В ряде автогенераторов колебательный контур включается в цепь положительной обратной связи.

5.9.1. УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Условие установившихся незатухающих колебаний напряжения в рассматриваемом случае можно записать в следующем виде:

$$K_{ус}(j\omega) \cdot K_{о.с.}(j\omega) = |K_{ус}(j\omega)| \exp(j\varphi_{ус}) \cdot |K_{о.с.}(j\omega)| \exp(j\varphi_{о.с.}) = 1, \quad (5.1)$$

где $K_{ус}(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи усилителя,

$K_{о.с.}(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи цепи обратной связи,

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота колебаний напряжения,

f – частота колебаний напряжения,

$\varphi_{ус}$ – сдвиг фаз в усилителе сигнала,

$\varphi_{о.с.}$ – сдвиг фаз в цепи положительной обратной связи,

Равенство (5.1) можно разбить на два:

– Условие баланса амплитуд: $|K_{ус}(j\omega)| \cdot |K_{о.с.}(j\omega)| = 1 \quad (5.2)$

– Условие баланса фаз: $\varphi_{ус} + \varphi_{о.с.} = 2\pi n, \quad (5.3)$

где $n=0,1,2,3,\dots$

5.9.2. УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Соответственно условие самовозбуждения колебаний напряжения может быть записано в следующем виде:

$$K_{ус}(j\omega) \cdot K_{о.с.}(j\omega) = |K_{ус}(j\omega)| \exp(j\varphi_{ус}) \cdot |K_{о.с.}(j\omega)| \exp(j\varphi_{о.с.}) > 1, \quad (5.4)$$

Соответственно:

– Условие баланса амплитуд: $|K_{ус}(j\omega)| \cdot |K_{о.с.}(j\omega)| > 1 \quad (5.5.)$

– Условие баланса фаз: $\varphi_{ус} + \varphi_{о.с.} = 2\pi n, \quad (5.6)$

где $n=1,2,3,\dots$

Так как условия самовозбуждения выполняются только на частоте f_0 , то через некоторое время на выходе автогенератора устанавливаются незатухающие гармонические колебания постоянной амплитудой и частотой f_0 . Амплитуда колебаний ограничивается нелинейностью амплитудной характеристики усилителя и естественно изменяется в зависимости от типа усилителя и напряжения источника питания усилителя.

5.9.3. АВТОГЕНЕРАТОР С МОСТОМ ВИНА В ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ.

В рассматриваемом случае автогенератор колебаний строится на основе операционного интегрального полупроводникового усилителя, охваченного положительной обратной связью. Положительная обратная связь образуется в том случае, когда сигнал с выхода усилителя подается на его вход в фазе одинаковой с фазой сигнала на входе. В операционном усилителе это достигается подачей выходного сигнала на неинвертирующий вход усилителя. В цепь положительной обратной связи при этом включается частотно-избирательный элемент, по-

строенный из последовательно и параллельно включенных R_1, C_1, R_2, C_2 – элементов. Комплексный коэффициент передачи R–C фильтра, равен:

$$\mathbf{Ko.c.}(j\omega) = 1 / [(1 + R_1/R_2 + C_1/C_2) + j(\omega R_1 C_2 - 1/\omega C_1, R_2)]. \quad (5.7.)$$

На квазирезонансной частоте (ω_0) фазовый сдвиг равен нулю, следовательно

$$\omega R_1 C_2 - 1/\omega C_1, R_2. \quad (5.8)$$

Откуда следует, что

$$\omega_0^2 = 1/R_1, C_1, R_2, C_2. \quad (5.9)$$

Модуль коэффициента передачи на квазирезонансной частоте

$$|\mathbf{Ko.c.}(j\omega)| = 1 / [1 + R_1/R_2 + C_1/C_2] \quad (5.10.)$$

Условия баланса фаз и баланса амплитуд выполняются только на квазирезонансной частоте. На этой частоте (f_0) и возникают колебания амплитуды выходного напряжения.

Частота колебаний напряжения на выходе автогенератора определяется выражением:

$$f_0 = 1/2 \pi \sqrt{R_1, C_1, R_2, C_2} \text{ [Гц]}. \quad (5.11)$$

Обычно величины резисторов и конденсаторов в мостике Вина выбираются одинаковыми $R_1=R_2=R$; $C_1=C_2=C$. При этом

$$f_{\text{орасч.}} = 1/2\pi RC \text{ [Гц]}. \quad (5.12)$$

Принципиальная электрическая схема автогенератора колебаний приведена на рис.5.16. Основным преимуществом, исследуемого автогенератора, является возможность получения стабильных колебаний напряжения в широком диапазоне низких частот. Это осуществляется изменением величин резисторов и конденсаторов, включенных в цепь положительной обратной связи.

Интегральный операционный усилитель (ОУ) характеризуется большим коэффициентом усиления по напряжению (K_u), большим входным сопротивлением (сотни МОм) и малым выходным сопротивлением (50 Ом). Усилитель имеет два входа и один выход. Один из входов усилителя называется инвертирующим. Полярность сигнала, поданного на инвертирующий вход усилителя, на выходе изменяется на противоположный. Другой вход называется неинвертирующим. Полярность сигнала, поданного на этот вход на выходе не изменяется. Питание операционного усилителя осуществляется от двухполюсного источника питания, создающего напряжения $+E_p$ и $-E_p$.

Операционные усилители выпускаются для широкого предела изменения выходной мощности (100Вт) и характеризуются малым уровнем собственных шумов и высокой стабильностью выходного напряжения. Все это позволяет строить на их основе автогенераторы низкочастотных колебаний напряжения переменной частоты. Такие автогенераторы необходимы для решения широкого круга задач при автоматизации технологических процессов в пищевых отраслях промышленности.

Так как обычно коэффициент усиления О.У. оказывается слишком большим для данной системы, в схему усилителя вводится отрицательная обратная связь по напряжению. Для этого напряжение с выхода усилителя через резистор ($R_{o.c.}$) подается на инвертирующий вход усилителя. При этом коэффициент усиления по напряжению приближенно определяется выражением:

$$K_{u.oc.} = R_{o.c.} / R \text{ г}, \quad (5.13)$$

где $R_{o.c.}$ - сопротивление в цепи отрицательной обратной связи,

R_g - внутреннее сопротивление источника сигнала.

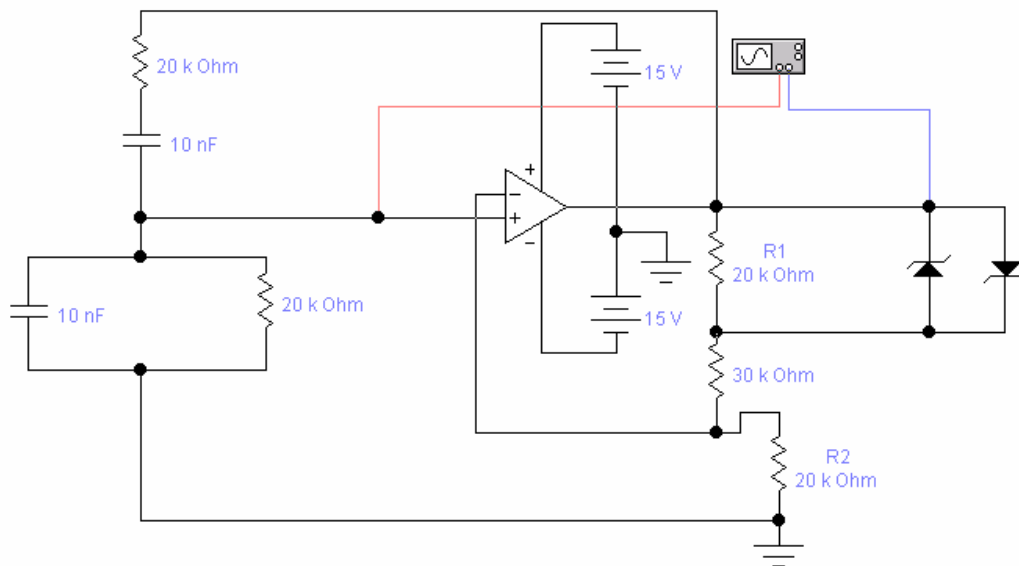


Рис.5.16..Принципиальная схема автогенератора колебаний напряжения, собранного по схеме Вина.

На принципиальной схеме автогенератора обозначены:

-осциллограф, используемый для наблюдения осциллограмм колебаний напряжения непосредственно на контуре Вина (красная линия) и на выходе операционного усилителя (зеленая линия). Осциллограф также используется для измерения параметров колебаний напряжения.

-операционный усилитель, инвертирующий вход которого обозначен знаком минус, неинвертирующий вход – знаком плюс.

-Мост Вина, состоящий из двух резисторов ($R_3 = R_4 = 20 \text{ kOhm}$) и двух конденсаторов ($C_1 = C_2 = 10 \text{ nF} = 10 \cdot 10^{-9} \text{ F}$),

-источник питания, создающий напряжение $+15 \text{ V}$ и -15 V .

-сопротивление нагрузки из трех последовательно включенных резисторов R_1 (20 kOhm), резистора величиной 30 kOhm и резистора R_2 (20 kOhm)

Положительная обратная связь, необходимая для самовозбуждения колебаний напряжения, создается путем подачи выходного напряжения с резисторов нагрузки через мост Вина на неинвертирующий вход О.У. Напряжение отрицательной обратной связи подается на инвертирующий вход ОУ с резистора R_2 (20 kOhm). Выходное напряжение снимается с резистора R_1 (20 kOhm). Параллельно резистору R_1 включены два стабилитрона, приближающие форму колебаний на выходе автогенератора ближе к синусоидальной..

5.10. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ 5

- 1.Какие схемы включения биполярных транзисторов используются в усилителях сигналов?
- 2.Какой принцип работы и устройство биполярного транзистора?

3. Как определить входное сопротивление биполярного транзистора по входным статическим вольтамперным характеристикам?
4. Чем объясняется низкий уровень собственных шумов канальных транзисторов?
5. Как зависит ток стока МДП - транзистора от напряжения затвор-исток?
6. Почему мала мощность, потребляемая КМДП - транзистором от источника питания?
7. Чем объясняется большая величина входного сопротивления канальных транзисторов?
8. Поясните принцип действия и назначение фильтра нижних частот. Какие типы фильтров нижних частот вы знаете?
9. Как зависит от частоты амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя?
10. Каким методом можно расширить динамический диапазон амплитудной характеристики усилителя?

5.11. ТЕСТ ПО ТЕМЕ 5

1. Определить коэффициент усиления по напряжению операционного усилителя, если величина резистора, включенного в цепи отрицательной обратной связи, равна 10кОм , внутреннее сопротивление источника сигнала, равно 1кОм . Ответы, один из которых правильный: 2; 10; 5; 6; 8.
2. На затворы КМДП-транзистора с «п»-проводящим каналом подается импульсный сигнал положительной полярности амплитудой большей $U_{зи}$. порог. Какого знака будет импульсный сигнал в точке соединения стоков транзисторов? Ответы, один из которых правильный: отрицательной полярности; положительной полярности; сигнал будет отсутствовать.
3. Определить частоту колебаний напряжения на выходе автогенератора с кварцевым резонатором включенном в цепь положительной обратной связи, если эквивалентная индуктивность кварцевого резонатора, равна $0,1\text{мГн}$, а емкость, равна $1,0$ пикофарад. Ответы, один из которых правильный: 100МГц ; 20МГц ; $16,6\text{МГц}$; 1МГц .
4. Коэффициент усиления по напряжению операционного усилителя равен 100, сопротивление в цепи обратной связи, равно 100кОм . Чему равно внутренне сопротивление источника сигнала? Ответы, один из которых правильный: 60дБ ; 40дБ ; 20дБ ; 10дБ .
5. Определить коэффициент усиления биполярного транзистора по току, если в точке Т (см. рис 5.1.) $\Delta I_k = 10\text{мА}$, а $\Delta I_b = 1\text{мА}$. Ответы, один из которых правильный: 10; 20; 5; 15.

ТЕМА 6. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ТИРИСТОРЫ. ВЫПРЯМИТЕЛИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

6.1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Полупроводниковыми диодами называются двухэлектродные приборы с односторонней проводимостью тока. Односторонняя проводимость обуславливается наличием «р-п» перехода или перехода металл – полупроводник.

Переходы типа «р-п» образуются в области, примыкающей к металлургической границе между двумя полупроводниками с различными типами проводимости. Если монокристалл полупроводникового материала с одного конца легировать примесями, создающими избыток положительных зарядов (р), а с другого конца примесями, создающими избыток электронов (п), то между областями с различным типом проводимости образуется «р-п»-переход. Часть положительных зарядов из области р диффундируют в область п. Аналогичным образом электроны из области п диффундируют в область р. В тонком слое между областями п и р электроны и положительные заряды рекомбинируют, и так как этот слой в результате имеет очень мало свободных носителей заряда, его называют обедненным слоем. Этот слой действует как потенциальный барьер, препятствующий дальнейшей диффузии носителей зарядов. (см. рис. 6.1.а).

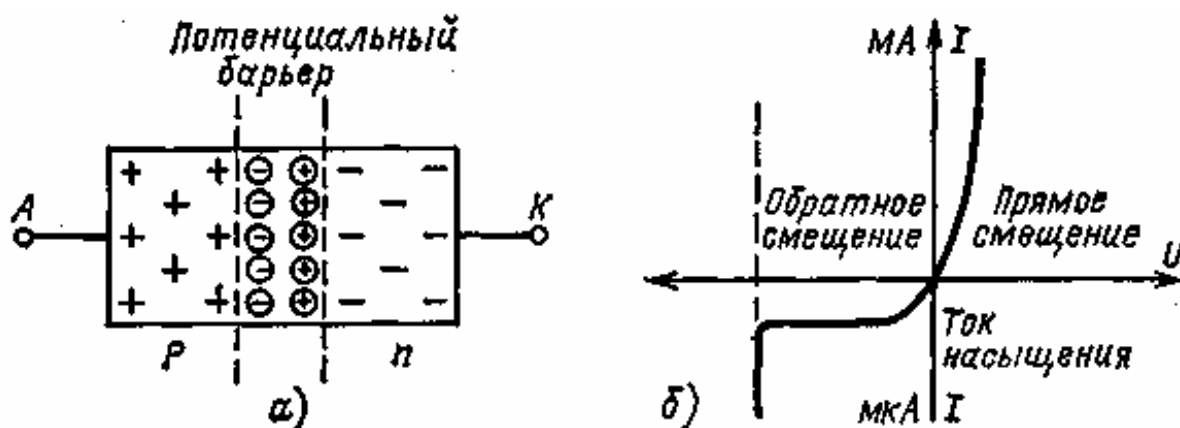


Рис. 6.1. а) полупроводниковый «р-п»-переход с потенциальным барьером, образованным диффузией носителей зарядов.

б) вольтамперная характеристика р-п перехода .

Если внешнее напряжение приложено к выводам (АК) таким образом, что точка «А» имеет положительный потенциал по отношению к точке «К», то будет наблюдаться уменьшение толщины обедненного слоя. Потенциальный барьер при этом снижается. Это способствует протеканию тока через переход (прямой ток). С увеличением внешнего напряжения ток через переход возрастает по экспоненциальному закону до тех пор, пока внешнее напряжение не станет равным величине потенциального барьера, т.е. результирующее напряжение на переходе станет равным нулю. Дальнейшее возрастание тока через переход ограничивается только сопротивлением полупроводникового материала.

Если полярность внешнего напряжения изменить на обратную, то величина потенциального барьера возрастет и основные носители окажутся блокированными. В этих условиях, однако, через переход будет протекать очень ма-

лый ток, называемый обратным током. При возрастании внешнего обратного напряжения этот ток остается постоянным, пока напряжение не достигнет точки пробоя. В этой точке при постоянном напряжении ток быстро возрастает (рис. 6.1.б).

Таким образом, так как прямой ток намного больше обратного (в тысячу и больше раз), полупроводниковый диод обладает вентиляльными свойствами, т.е. преимущественно пропускает ток только в одном направлении. Обратное пробивное напряжение ($U_{обр.проб.}$) может быть сделано равным сотням вольт и даже нескольким киловольтам. На рис. 6.2. изображены вольтамперные характеристики германиевого и кремниевого диодов.

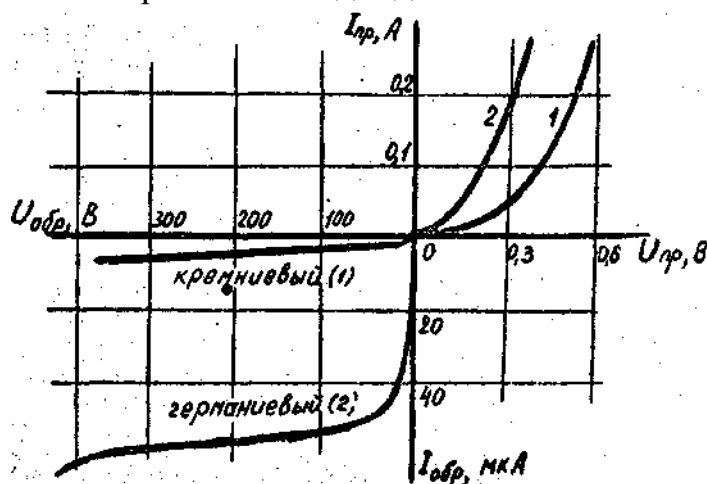


Рис.6.2. Вольтамперные статические характеристики кремниевого (1) и германиевого (2) полупроводниковых диодов.

Существенными недостатками полупроводниковых диодов на основе р-п – переходов являются относительно большие падение на них напряжения.

Выпрямители такие диодах не выгодно использовать для получения низких постоянных напряжений, равных 1,5...2В. А именно такие напряжения при больших токах нагрузки в настоящее время используются для питания интегральных микросхем.

Значительно меньше падение прямого напряжения достигается при использовании диодов с переходом металл-полупроводник (диоды Шоттки).

Структура диода Шоттки (а) и его вольтамперная характеристика(б) приведены на рис.6.3. На этом же рисунке приведена для сравнения вольтамперная характеристика кремниевого полупроводникового диода, построенного на основе «р-п»-перехода. Сравнение вольтамперных характеристик показывает, что падение напряжение на диоде Шоттки в два раза меньше, чем на диоде на основе «р-п»-перехода.

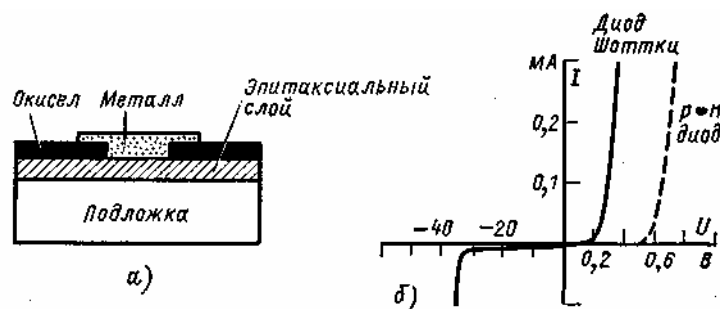


Рис.6.3. Структура диода с барьером Шоттки (а) и его вольтамперная характеристика (б). Прямой ток показан в мА., а обратный в мкА.

Другим преимуществом диодов Шоттки является возможность использования их на значительно более высоких рабочих частотах. Это обусловлено тем, что в диодах Шоттки неосновные носители не используются. Ток через него представляет собой поток только основных носителей – электронов. Исключение неосновных носителей снимает проблему накопления заряда. Этим объясняются хорошие ключевые характеристики диода Шоттки.

6.2.ВЫПРЯМИТЕЛИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ

Как уже отмечалось выше, до 40% всей электрической энергии, вырабатываемой электростанциями страны в виде переменного напряжения, преобразуется в постоянное. Для этого используются выпрямительные устройства на полупроводниковых диодах и тиристорах.

На рис. 6.4. приведены принципиальная схема и временные диаграммы токов и напряжений простейшего однофазного однополупериодного выпрямителя с конденсатором C_{ϕ} , включенном параллельно нагрузке.

Рассмотрим работу выпрямителя в установившемся режиме. Ток через диод (ia) начинает протекать, когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора (U_2) становится больше напряжения на конденсаторе (U_c), что соответствует интервалам времени t_1-t_2 и t_3-t_4 . За время t_1-t_2 происходит заряд конденсатора C_{ϕ} . Как правило постоянная времени заряда конденсатора $\tau_{зар}=R_d \cdot C$ выбирается таким образом, что конденсатор успевает зарядиться до амплитудного значения напряжения U_{m2} на выходе вторичной обмотки трансформатора. При этом заряд конденсатора продолжается до величины U_{m2} , а затем начинается его разряд, так как напряжение $U_2(t)$ оказывается меньше U_c . Однако в случаях, когда величина C выбрана очень большой, постоянная времени заряда конденсатора ($\tau_{зар}=R_d \cdot C_{\phi}$) оказывается соизмеримой с интервалом ($t_1 - t_2$). При этом конденсатор C не успевает зарядиться до амплитудного значения напряжения U_2 и его заряд продолжается после прохождения амплитудного значения U_{m2} . Именно такой случай изображен на рис.6.4. Только с момента времени t_2 напряжение $U_2(t)$ становится меньше напряжения на конденсаторе U_c , диод запирается, и конденсатор начинает разряжаться через сопротивление нагрузки R_H . Время разряда конденсатора определяется постоянной времени ($\tau_{раз}=R_H \cdot C_{\phi}$) и, как правило, значительно большей чем время заряда. К запертому вентилю в это время прикладывается напряжение, максимальное зна-

чение которого почти равно удвоенному значению U_{m2} .

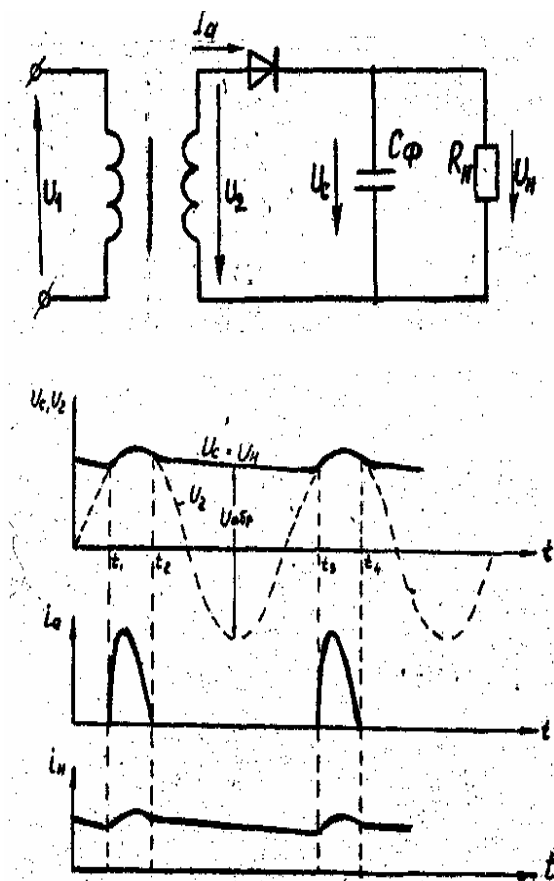


Рис. 6.4. Принципиальная схема и временные диаграммы токов и напряжений однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром.

К моменту времени t_3 напряжение U_2 вновь становится больше напряжения U_c , диод открывается и ток I_a начинает заряжать конденсатор C и т. д.

Если требуется обеспечить более высокий коэффициент сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, используются более сложные фильтры нижних частот; Г-образные LC или RC типа (см. рис.6.5.).

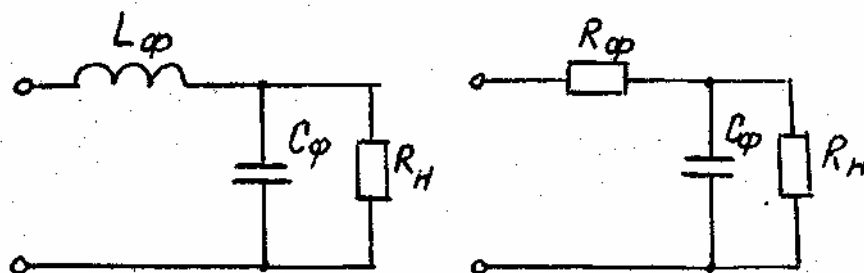


Рис. 6.5. Схема Г-образных фильтров LC и RC типа.

В результате падения напряжения на индуктивной катушке L_ϕ значительно уменьшается доля переменной составляющей выпрямленного напряжения. Падения напряжения от постоянной составляющей тока практически нет, так как активное сопротивление индуктивной катушки мало. В маломощных выпрямителях вместо катушки индуктивности (см. рис.6.5) включают резистор R_ϕ .

Существенным недостатком однополупериодных выпрямителей является

неравномерная нагрузка сети переменного тока, так как выпрямители этого типа потребляют электроэнергию только во время положительного или отрицательного полупериодов переменного напряжения.

Поэтому, как правило, для получения постоянного напряжения используются двухполупериодные выпрямители, равномерно загружающие электрическую сеть. Примером такого выпрямителя является мостиковый, в котором для получения выпрямленного напряжения используются четыре диода, включенных по мостовой схеме.

6.3. МОСТИКОВЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ

На рис. 6.6. приведена принципиальная схема двухполупериодного выпрямителя, собранного по мостовой схеме. На этом же рисунке приведены временные диаграммы, поясняющие работу выпрямителя.

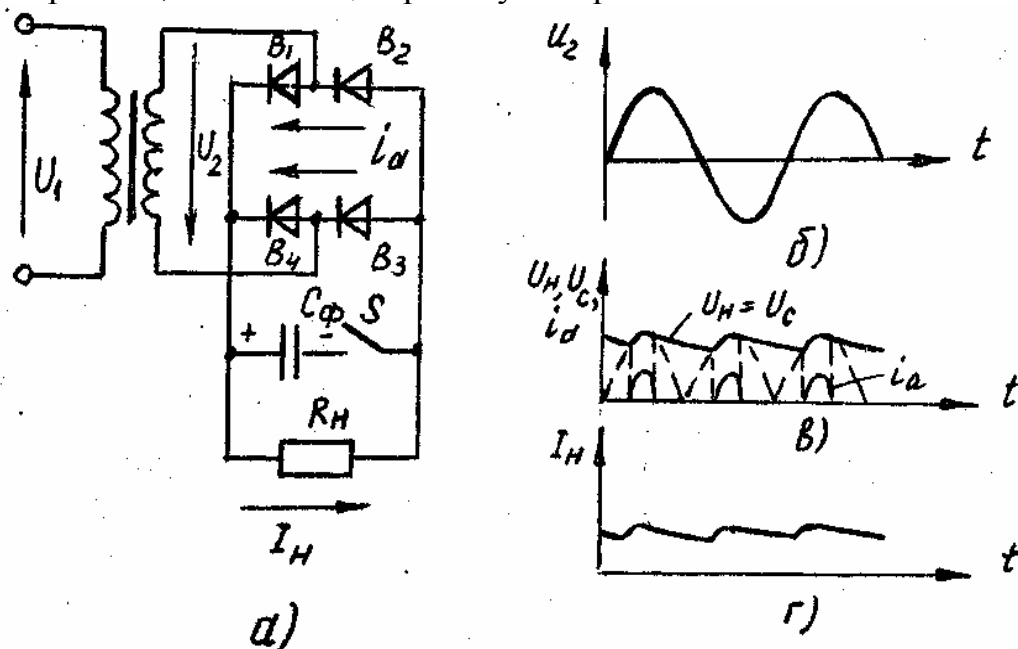


Рис.6.6. Принципиальная схема мостового двухполупериодного выпрямителя (а) и временные диаграммы (б,в,г), поясняющие происходящие процессы.

Рассмотрим особенности работы выпрямителя. Во время положительного полупериода напряжения $U_2(t)$ на выходе трансформатора открыты диоды B_1 и B_3 , а диоды B_2 и B_4 закрыты. В течение отрицательного полупериода $U_2(t)$ диоды B_1 , B_3 , закрыты, а B_2, B_4 – открыты. В результате через диоды в каждом полупериоде протекает импульсный ток i_d (см. рис. 6.6 в), заряжающий (при замкнутом переключателе S) конденсатор C_ϕ . За время протекания тока C_ϕ заряжается до напряжения U_c , которое несколько меньше максимального напряжения U_{m2} . Отличие U_c от U_{m2} невелико и обусловлено падением напряжения на полупроводниковых диодах и вторичной обмотки трансформатора.

После того как конденсатор зарядится до напряжения, близкого к U_{m2} , ток $i_d(t)$ прекращается, так как текущее значение напряжения $U_2(t)$ становится

меньше $U_c = U_{m2}$. При этом конденсатор начинает разряжаться через сопротивление R_n (см. рис. 6.6.в). Зависимость от времени тока (I_n), протекающего через сопротивление нагрузки, приведена на рис. 6.6.г. На рисунке 6.6.в пунктиром изображена также временная диаграмма изменения тока $i_d(t)$ при разомкнутом переключателе S .

Как видно из рассмотрения этих зависимостей, при отключенном конденсаторе на нагрузке образуется пульсирующее напряжение. Включение конденсатора делает напряжение на нагрузке более сглаженным. Чем больше величина конденсатора, тем сильнее сглажено напряжение на нагрузке. Поэтому на выходах выпрямителей, используемых в ЭВМ, обычно включаются конденсаторы, емкость которых составляет доли Фарады.

Как уже отмечалось в предыдущем разделе, в тех случаях, когда необходимо уменьшить пульсации напряжения, на выходе выпрямителя включаются дополнительные фильтры нижних частот. Существенно можно уменьшить пульсации на выходе выпрямителя также при использовании стабилизаторов напряжения.

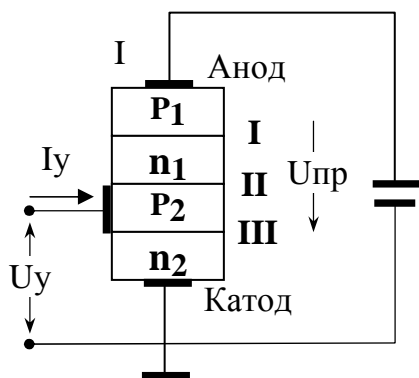
6.4. ТИРИСТОРЫ

Тиристорами называют широкий класс полупроводниковых приборов релейного типа. К ним относятся: динисторы - неуправляемые релейные приборы, выполненные из трех последовательно включенных «р-п» переходов; триодные управляемые полупроводниковые приборы, предназначенные для переключения напряжений одного знака, симисторы, используемые для переключения положительных и отрицательных напряжений и др.

Общим свойством всех тиристоров является их способность находиться в двух состояниях: – выключенном, когда его сопротивление велико и включенном, когда его сопротивление становится малым, а протекающий через него ток большим (десятки и сотни Ампер). Время переключения тиристора из одного состояния в другое мало (десятки мкс). После переключения из закрытого состояния в открытое, протекающий через тиристор ток остается большим до тех пор, пока не будет выключено или сменит свой знак напряжение между анодом и катодом. Ниже основное внимание уделяется рассмотрению триодных тиристорков. Триодные тиристоры широко используются при построении управляемых выпрямителей, переключателей электрических напряжений, а также в инверторах.

Триодным тиристором называют электронный прибор с тремя р-п переходами и тремя омическими выводами (см. рис. 6.7.). Два вывода тиристора (анод и катод) подключаются к источнику питания, а третий к источнику управляющего напряжения (U_y). Триодный управляемый тиристор состоит из трех р-п переходов I, II, и III. Напряжение питания подается на тиристор таким образом, что переходы I и III открыты, а переход II закрыт. Сопротивление открытых переходов мало и поэтому почти всё напряжение питания E приложено к закрытому переходу II, имеющему большое сопротивление.

При этом ток, протекающий через тиристор, очень мал (единицы мА) и тиристор находится в закрытом состоянии. При выключенном управляющем напряжении по мере увеличения напряжения между анодом и катодом транзистора, что достигается увеличением э.д.с источника питания E , ток тиристора увеличивается незначительно до тех пор, пока это напряжение не достигнет напряжения пробоя «р-п» перехода II. После этого происходит лавинообразное увеличение числа носителей заряда за счёт лавинного умножения носителей в переходе II, что приводит к резкому уменьшению его сопротивления. В результате тиристор переходит в открытое состояние. Напряжение $U_{пер}$, при котором начинается лавинообразное нарастание тока, может быть снижено введением неосновных носителей заряда в любой из слоев, прилегающих к переходу II.



Добавочные носители заряда вводятся в p_2 слой управляющей цепью, питаемой от независимого источника напряжения U_y .

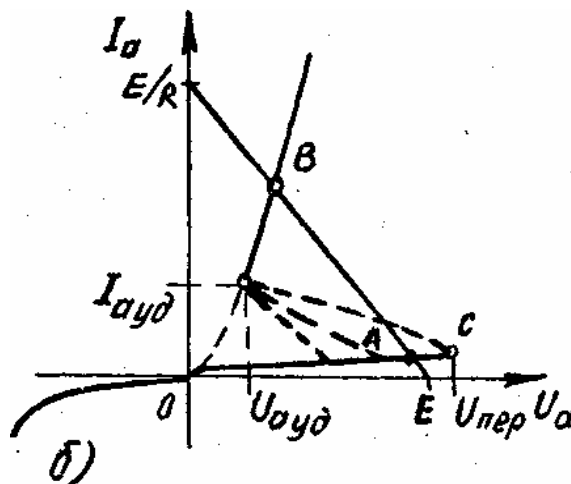


Рис 6.7. Структурная схема тиристора

Рис. 6.8. Вольтамперные характеристики тиристора при различных значениях управляющего тока

На рис.6.8. приведены статические вольтамперные характеристики управляемого триодного тиристора. По оси абсцисс отложено напряжение между анодом и катодом тиристора (U_{AK}), а по оси ординат ток, протекающий через тиристор (I_a). Из рисунка. видно, что при росте тока управления (I_y) напряжение включения тиристора снижается, т.е. ток I_y управляет напряжением включения тиристора. При большом значении управляющего тока требуется более низкое анодное напряжение, при котором происходит лавинное нарастание тока. Точка С, расположенная на нижнем участке прямой ветви ВАХ тиристора

при отсутствии управляющего тока ($I_u=0$), является граничной. При напряжении между анодом и катодом тиристора, соответствующем этой точке, происходит лавинный пробой р-п перехода II. Поэтому напряжение на тиристоре в этой точке называют напряжением переключения $U_{пер}$. В исходном состоянии при токе управления равном нулю и напряжении на аноде тиристора U_{AK} меньшем напряжения переключения тиристора, тиристор закрыт.

При подаче управляющего импульсного напряжения тиристор открывается при U_a меньшем $U_{пер}$. Чем больше I_u , тем при меньшем U_a открывается тиристор. Обычно I_u выбирают таким образом, чтобы тиристор открывался при U равном 1..2 В. При открывании тиристора рабочая точка смещается из точки А в точку В на его ВАХ. После переключения тиристора в открытое состояние ток через него резко возрастает. Запирание тиристора происходит только при изменении знака приложенного к аноду напряжения с положительного на отрицательное. При этом прямой ток через тиристор уменьшается до нуля и после рассасывания заряда неосновных носителей тиристор запирается.

Ток и падение напряжения на тиристоре можно определить графически, построив на ВАХ тиристора линию нагрузки, соответствующую сопротивлению R . Для этого проводят прямую линию, проходящую через точки с координатами $(0; E/R)$ и $(E; 0)$. Координаты точки пересечения этой линии с ВАХ тиристора определяют ток и напряжение на тиристоре в закрытом и открытом состояниях (точки А и В).

6.5. УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ НА ТИРИСТОРАХ

В выпрямителях на полупроводниковых диодах величина выпрямленного напряжения на выходе однозначно определяется величиной напряжения на входе и коэффициентом трансформации входного трансформатора. Напряжение на выходе управляемого выпрямителя может меняться в широких пределах.

Регулирование напряжения на выходе управляемого выпрямителя производится путем изменения момента отпирания тиристора, что достигается в результате подачи соответствующего напряжения на управляющий электрод тиристора.

Упрощенная принципиальная схема однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора показана на рис. 6.9.

В рассматриваемой схеме возможно включение двух типов нагрузки: чисто активная (ключ $K1$ замкнут) и активно-индуктивная (ключ $K1$ разомкнут). Рассмотрим работу выпрямителя синусоидального напряжения при чисто активной нагрузке с учетом того, что блок управления (БУ) включает тиристоры $VS1$, $VS2$ с запаздыванием на угол α относительно момента перехода напряжения сети U через ноль. Этому режиму работы выпрямителя соответствуют временные диаграммы, показанные на рис.6.10.

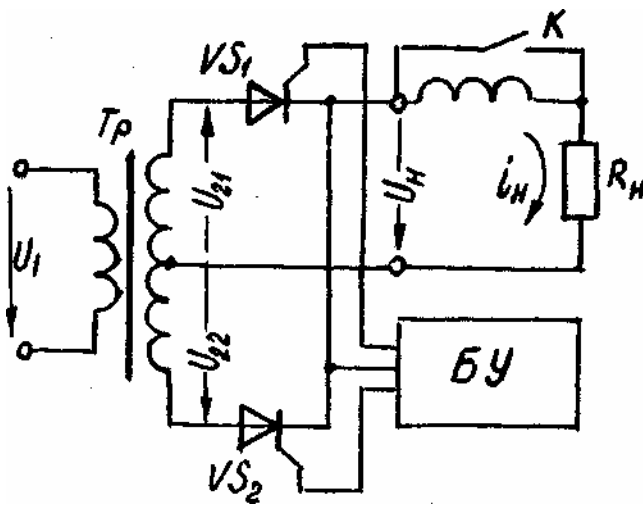


Рис. 6.9. Схема управляемого выпрямителя на тиристорах

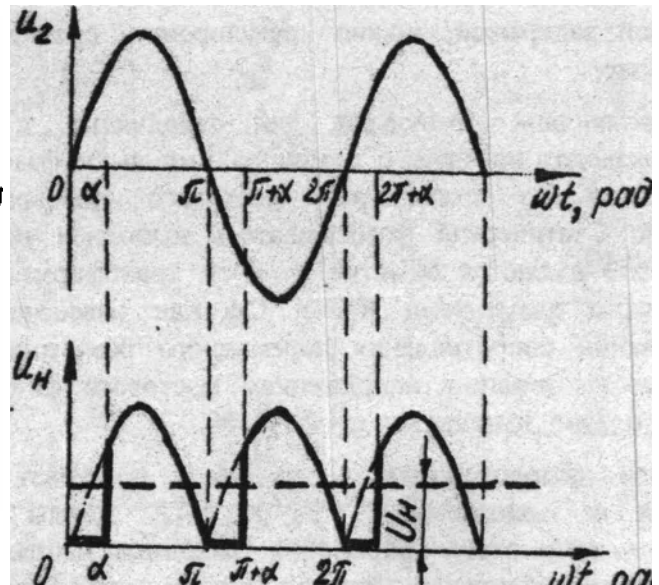


Рис. 6.10. Временные диаграммы работы двухполупериодного управляемого выпрямителя на тиристорах.

На интервале $0..α$ оба тиристора закрыты, напряжение на выходе выпрямителя U_H , равно нулю (рис. 6.10). В момент времени, соответствующий углу $α$, открывается тиристор VS_1 . При этом на нагрузке выпрямителя R_H на интервале $α..π$ формируется напряжение, повторяющее форму напряжения U_2 . При переходе напряжения U_2 через нуль тиристор закрывается и ток становится равным нулю. Во время отрицательного полупериода напряжения U_2 аналогичным образом работает тиристор VS_2 .

Зависимость напряжения U_H от угла $α$ называется регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя. Эта характеристика для активной нагрузки ($L=0$) приведена на рис. 6.11.

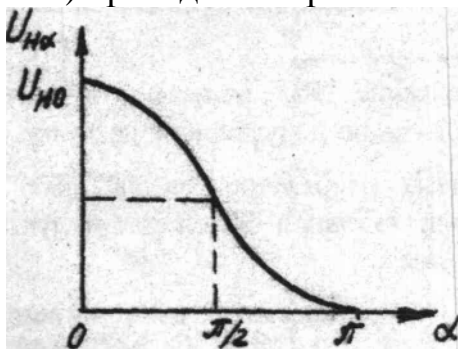


Рис. 6.11. Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя

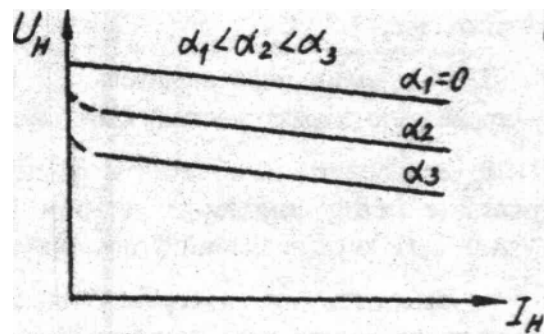


Рис. 6.12. Внешние характеристики управляемого выпрямителя

Внешние характеристики управляемого выпрямителя при фиксированных углах управления показаны на рис. 6.12, из которого видно, что они подобны аналогичным характеристикам неуправляемого выпрямителя.

При активно-индуктивной нагрузке характер изменения тока отличается от формы кривой напряжения на нагрузке. После открытия тиристора нарастанию тока в цепи нагрузки противодействует запасенная в индуктивности энергия. При спадании тока ранее запасенная реактивная энергия противодействует его

изменению. По этой причине ток через тиристор и нагрузку выпрямителя продолжает протекать еще в течении некоторого времени после изменения полярности напряжения сети. Это явление обуславливает увеличение длительности интервалов проводимости тиристоров, что, в свою очередь, приводит к искажению формы кривой напряжения на нагрузке.

6.6. ИМПУЛЬСНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С ИНВЕРТОРОМ НА МОЩНОМ БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

В настоящее время, в качестве источников вторичного питания электронной аппаратуры, как правило, используются импульсные выпрямители без входного трансформатора. В основе построения импульсных выпрямителей положен принцип выпрямления напряжения сети и последующем преобразованием выпрямленного напряжения в импульсное с частотой повторения импульсов 30.50 кГц.

Выпрямление напряжения сети обычно осуществляется мостиковым двухполупериодным выпрямителем. Преобразование постоянного напряжения в импульсное осуществляется специальным инвертором на мощных транзисторах. Импульсное напряжение с инвертора подается на высокочастотный малогабаритный импульсный понижающий трансформатор и затем на низковольтный выходной выпрямитель. В последних вариантах построения импульсных выпрямителей отказываются и от использования высокочастотного трансформатора и импульсы с инвертора подаются непосредственно на выходной выпрямитель. Использование вторичного источника питания с бестрансформаторным входом, благодаря устранению низкочастотного силового трансформатора и дросселя, а также переходу на повышенные частоты работы инвертора, позволяет повысить коэффициент полезного действия выпрямителя до 85..95%, а также существенно уменьшить его габариты и массу. Структурная схема источника питания с бестрансформаторным входным выпрямителем приведена на рис. 6.13.

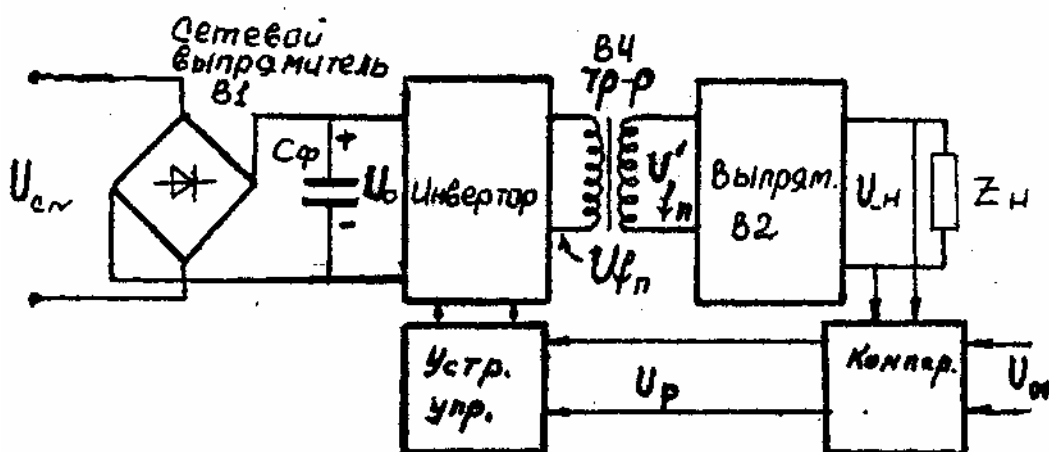


Рис. 6.13. Структурная схема вторичного импульсного источника электропитания.

В рассматриваемом выпрямителе переменное напряжение сети U_c подается непосредственно на мостиковый выпрямитель (В1) со сглаживающим фильтром (Сф). Выпрямленное напряжение (U_0) поступает на инвертор, выполненный

на мощном биполярном транзисторе. Инвертор преобразует постоянное напряжение U_0 в последовательность импульсов переменной длительности (U_{fp}). Частота повторения импульсов может меняться в пределах 20...40кГц. Это напряжение трансформируется высокочастотным малогабаритным трансформатором до требуемого значения (U'_{fn}) и подается на выходной выпрямитель (B2) с фильтром нижних частот. С выхода фильтра постоянное напряжение нужной величины подается на нагрузку выпрямителя.

Стабилизация выходного выпрямленного напряжения осуществляется в инверторе методом ШИМ(широко-импульсной модуляции). Для этого с высокоомного делителя напряжения, включенного параллельно нагрузке, снимается часть напряжения и подается на компаратор. На второй вход компаратора подается опорное напряжение ($U_{оп}$) с параметрического стабилизатора напряжения. С выхода компаратора напряжение подается на мультивибратор устройства формирования управляющих импульсов инвертора. При отклонении выходного напряжения выпрямителя от номинального значения ($U_{н0}$) длительность импульсов, вырабатываемых мультивибратором, изменяется так, чтобы выходное напряжение выпрямителя вернулось к своему номинальному значению.

6.7. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ

Стабилизация напряжения на выходе выпрямителя в настоящее время осуществляется с помощью параметрических стабилизаторов, построенных на основе полупроводниковых стабилитронов, а также стабилизаторами с широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией. Значительно реже применяются компенсационные стабилизаторы напряжения на мощных биполярных транзисторах.

6.7.1. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ

Параметрические стабилизаторы напряжения выполняются на полупроводниковых стабилитронах. Стабилитроном называется полупроводниковый диод, падение напряжения на котором в области электрического пробоя мало зависит от тока, что даёт возможность использовать его для стабилизации напряжения. Вольтамперная характеристика стабилитрона, рассчитанного на напряжение стабилизации, равное 8В приведена на рис.6.14.

Механизм пробоя в полупроводниковых стабилитронах может быть туннельным, лавинным или смешанным в зависимости от удельного сопротивления и других характеристик материала проводника. Основными параметрами стабилитрона являются: напряжение стабилизации $U_{ст}$ при изменении тока стабилитрона от $I_{мин}$ до $I_{макс}$; температурный коэффициент изменения напряжения стабилизации (ТКН); динамическое сопротивление стабилитрона на участке стабилизации $R_d = \Delta U / \Delta I$.

Как видно из рис. 6.14., в области пробоя напряжения на стабилитроне лишь незначительно изменяется при больших изменениях тока стабилизации $I_{ст}$. Это свойство полупроводникового стабилитрона используют в параметрических стабилизаторах для получения стабильного напряжения.

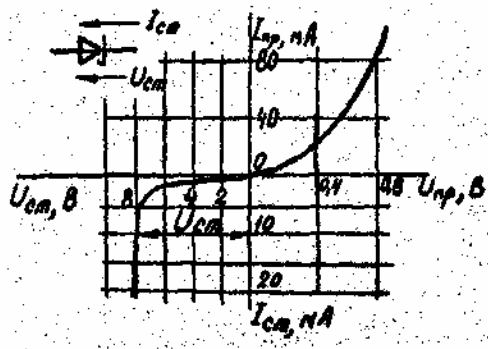


Рис.6.14. Вольтамперная характеристика полупроводникового стабилизатора.

Обозначение стабилизатора на электрических схемах приведено в левом верхнем углу рисунка.

6.7.2. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Действие компенсационных стабилизаторов напряжения основано на включении последовательно или параллельно с нагрузкой мощного транзистора. Принципиальная схема компенсационного стабилизатора напряжения с последовательно включенным регулирующим транзистором приведена на рис.6.15.

В рассматриваемой схеме мощный биполярный транзистор $V_{т1}$ включен последовательно с резистором нагрузки R_n . Параллельно сопротивлению нагрузки включен высокоомный делитель напряжения $R_{д1}$ – $R_{д2}$. Напряжение $U_{д2}$ с резистора $R_{д2}$ подается на инвертирующий вход операционного усилителя, выходной ток которого поступает на базу транзистора $V_{т1}$. На неинвертирующий вход усилителя подается опорное напряжение $U_{оп}$ от делителя, состоящего из резистора R_b и стабилизатора.

Падение напряжения на стабилизаторе фактически задает номинальный уровень выходного напряжения $U_{вых}=U_n$. При отклонении выходного напряжения от номинального, равного $U_{вых.о}$, рабочая точка транзистора $V_{т1}$ смещается в сторону увеличения или уменьшения падения напряжения на транзисторе $V_{т1}$. Например, при возрастании величины напряжения $U_{вых.}$, увеличивается напряжение $U_{R_{д2}}$. При этом? Соответственно/ уменьшается ток на выходе операционного усилителя и ток базы транзистора $V_{т1}$ и увеличивается падение напряжения на нем (см рис. 5.2). В результате на выходе стабилизатора восстанавливается исходное номинальное напряжение $U_{вых.о}$.

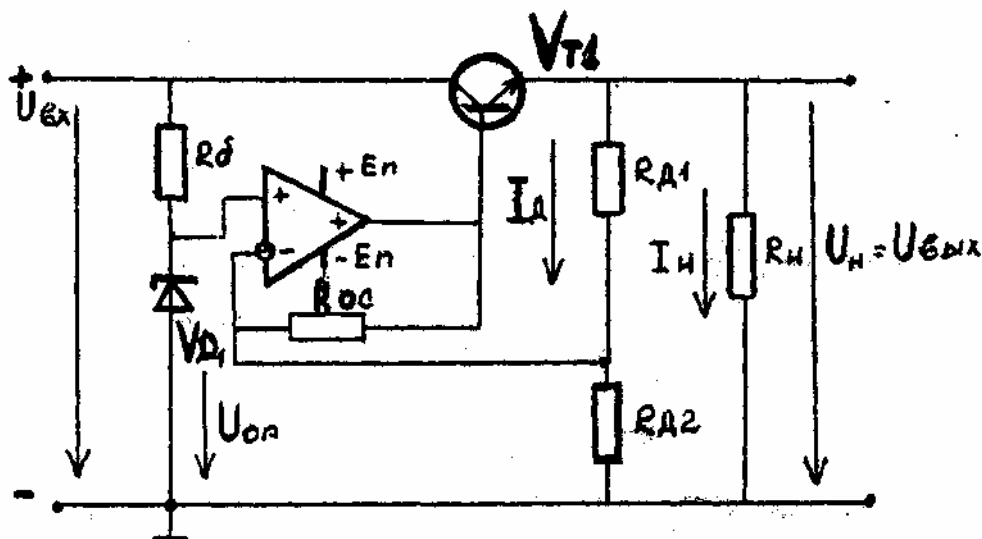


Рис. 6.15. Принципиальная схема компенсационного последовательного стабилизатора напряжения.

Существенным недостатком компенсационного стабилизатора напряжения является относительно большое падение напряжения на регулирующем транзисторе. Это особенно не допустимо в низковольтных выпрямителях, используемых для питания электронно-вычислительных машин и устройств автоматики, выполненных на интегральных микросхемах. Поэтому в настоящее время, как правило, используются стабилизаторы напряжения, основанные на регулировании выходного напряжения методами изменения длительности или частоты повторения импульсов. Именно на таком принципе основана стабилизация напряжения в импульсных выпрямителях, рассмотренных в разделе 6.6.

6.8. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПО ТЕМЕ 6.

1. Чем отличаются полупроводниковые диоды на основе р-п переходов и на основе переходов металл-полупроводник?
2. Как зависят вольтамперные характеристики полупроводниковых диодов на основе кремния от температуры окружающей среды?
3. Полупроводниковые стабилитроны. Вольтамперные характеристики стабилитронов.
4. Параметрические стабилизаторы напряжения на основе полупроводниковых стабилитронов.
5. Выпрямители на основе полупроводниковых диодов. Преимущества выпрямителей, построенных на основе диодов с переходами металл-полупроводник.
6. Триодные тиристоры. Устройство и вольтамперные характеристики.
7. Управляемые полупроводниковые выпрямители на основе тиристоров.
8. Принципиальная схема управляемого трехфазного выпрямителя на тиристорах.
9. Структурная схема импульсного выпрямителя, управляемого микроконтроллером.
10. На каких принципах строятся системы стабилизации выпрямленного напряжения в импульсных выпрямителях управляемых микроконтроллером?

6.9. ТЕСТ ПО ТЕМЕ 6

1. Определить величину выпрямленного напряжения на выходе мостикового бестрансформаторного выпрямителя с емкостным фильтром, подключенного к электрической сети с эффективным (среднеквадратическим) напряжением, равным 220 В. **Ответы**, один из которых правильный: 308В; 200в; 450 В. 150 В.
2. Определить, какое отношение числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора надо выбрать для получения выпрямленного напряжения, равного 100В на выходе однофазного мостикового выпрямителя с емкостным фильтром при подключении первичной обмотки трансформатора к сети с напряжением, равным 220 В. **Ответы**, один из которых правильный: 1:10; 3:1; 10:1. 2:1,
3. Параметрический стабилизатор напряжения выполнен на полупроводниковом стабилитроне с напряжением лавинного пробоя, равном 6В. Определить какая величина напряжения будет поддерживаться на выходе стабилизатора напряжения. **Ответы**, один из которых правильный: 10В; 6В; 4В; 9В.
4. Определить по статическим вольтамперным характеристикам минимальное анодное напряжение, при котором возможно открывание тиристора, если амплитуда управляющего напряжения может быть выбрана как угодно большой, а величина напряжения удержания равна 2 В. **Ответы**, один из которых правильный: 10 В; 2 В; 5 В; 10 В.
5. Определить в каких пределах изменяется величина угла запаздывания в управляемом выпрямителе на тиристорах, схема которого приведена на рис.6.6. **Ответы**, один из которых правильный: 90 градусов; 180 градусов; 45 градусов; 100 градусов.

РЕШЕНИЕ ТРЕНИРОВОЧНЫХ ЗАДАНИЙ

1. Автогенератор, выполненный на кремниевых КМДП-транзисторах с кварцевым резонатором в цепи положительной обратной связи помещается в термостат, температура внутри которого, равна 100 градусам Цельсия. Определить на сколько процентов изменится при этом частота колебаний напряжения на выходе автогенератора.
2. Определить исходную рабочую точку на выходных статических вольтамперных характеристиках транзистора с «п» проводящим каналом для того случая, когда требуется усаливать импульсные сигналы положительной полярности.
3. Определить максимально возможное напряжение на выходе управляемого двухполупериодного выпрямителя на тиристорах, если эффективное значение синусоидального напряжения на вторичной обмотке трансформатора 100 В.
4. Определить по статическим вольтамперным характеристикам во сколько раз уменьшается величина падения напряжения на полупроводниковом диоде при использовании в выпрямителях кремниевых диодов с переходом металл-полупроводник, вместо диодов с «р-п»-переходами.
5. Определить скорость распространения электромагнитного поля в экранированном кабеле с диэлектрической постоянной среды, заполняющей пространство между экраном и центральной жилой, равной 16.

ТЕСТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. С какой скоростью распространяется электромагнитное поле вдоль проводов воздушной линии электропередачи? **Ответы**, один из которых правильный: 10^8 м/с; $3 \cdot 10^8$ м/с; $9 \cdot 10^8$ м/с; $0,5 \cdot 10^8$ м/с.
2. Длительность прямоугольного импульса, излучаемого оптическим квантовым генератором, равна 10 нс. Определить ширину главного лепестка спектра излучаемых ОКГ частот. **Ответы**, один из которых правильный: 10^8 Гц; $4 \cdot 10^8$ Гц; $9 \cdot 10^8$ Гц; $0,5 \cdot 10^8$ Гц.
3. Определить напряженность электрической составляющей электромагнитного поля между проводами, находящимися под постоянном напряжением, равным 10 кВ, если расстояние между ними равно 0,5 м. **Ответы**, один из которых правильный: 100 кВ/м; 20 кВ/м; 660 кВ/м; 127 кВ/м.
4. Определить величину фазного напряжения, если линейное напряжение, в трехфазной системе с равномерными нагрузками в фазах, равно 660 В. **Ответы**, один из которых правильный: 220 В; 380 В; 127 В; 660 В.
5. Определить напряжение на нагрузках, если линейное напряжение в трехфазной системе остается неизменным и равным 220 В, но изменяется включение нагрузок со схемы треугольника на схему «звезда». **Ответы**, один из которых правильный: 308 В; 290 В; 380 В; 127 В.
6. Определить, как изменится величина тока в нейтральном проводе трехфазной системы при равномерных нагрузках, если фазное напряжение изменится с 220 В на 380 В? **Ответы**, один из которых правильный: не изменится; увеличится; уменьшится
7. Определить полную мощность, потребляемую четырехпроводной трехфазной системой при равномерной нагрузке, если показания вольтметра, включенного между фазой А и нейтральным проводом равно 220 В, а сопротивления нагрузок одинаковы и равны 220 Ом. **Ответы**, один из которых правильный: 520 Вт; 660 Вт; 380 Вт; 400 Вт.
8. Определить величину тока в фазе «А», если эффективное напряжение трехфазного генератора равно 220 В, а сопротивление нагрузки равно 1000 Ом. **Ответы**, один из которых правильный: 300 мА; 220 мА; 500 мА; 440 мА.
9. Определить величину линейного напряжения в трехфазной системе, если сопротивления нагрузки в фазах одинаковы, а фазные напряжения равны 220 В. **Ответы**, один из которых правильный: 380 В; 320 В; 660 В; 127 В.
10. Определить угловую частоту колебаний напряжения в трехфазной электрической сети Российской Федерации. **Ответы**, один из которых правильный: 628 рад/с; 314 рад/с; 234 рад/с; 680 рад/с.
11. Определить частоту колебаний напряжения на выходе автогенератора с кварцевым резонатором в цепи положительной обратной связи, если эквивалентная индуктивность кварцевого резонатора, равна 1 мГн, а емкость, равна 10 пикофард. **Ответы**, один из которых правильный: 100 кГц; 20 МГц; 1,66 МГц; 1 МГц.
12. Коэффициент усиления по напряжению операционного усилителя равен 1000. Скольким децибелам это соответствует? **Ответы**, один из которых правильный: 60 дБ; 40 дБ; 20 дБ; 10 дБ.
13. Какие приборы надо включить во вторичную цепь понижающего трансфор-

матора для измерения полной мощности? **Ответы**, один из которых правильный: вольтметр и амперметр; ваттметр; фазометр.

14. Чему равно максимальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора в режиме холостого хода, если на первичную обмотку трансформатора подано действующее (среднеквадратическое) напряжение равное 200В, а коэффициент трансформации n_{12} , равен двум? **Ответы**, один из которых правильный: 200В; 141В; 308В; 616В.
15. Определить коэффициент трансформации, если на его первичную обмотку подано напряжение 380В, а на его вторичной обмотке измерено напряжение, равное 220В. **Ответы**, один из которых правильный: 2,0; 1,73; 4,0; 2,5; 3,0.
16. Между какими выводами трехфазного трансформатора надо включить лампу освещения, рассчитанную на напряжение 220 В, если на первичные обмотки трехфазного трансформатора подано напряжение 760В, а коэффициент трансформации равен $n_{12}=2$. **Ответы**, один из которых правильный: между нейтральным проводом и любой из фаз; между фазами А и В; между фазами В и С; между фазами С и А.
17. Определить величину выпрямленного напряжения ($U_{н.ср.}$) на выходе трехфазного однополупериодного бестрансформаторного выпрямителя, подключенного к электрической сети с эффективным (среднеквадратическим) напряжением, равным 220В. **Ответы**, один из которых правильный: 300В; 259В; 450В; 350В.
18. Определить величину выпрямленного постоянного напряжения на выходе однофазного, однополупериодного бестрансформаторного выпрямителя с емкостным фильтром, если на него подано переменное напряжение от сети, равное 220В. **Ответы**, один из которых правильный: 308В; 190В; 380В; 500В.
19. Полупроводниковый стабилизатор с напряжением стабилизации, равным 10В используется для задания опорного напряжения в схеме компенсационного стабилизатора напряжения (см. рис 6.14.). Коэффициент передачи делителя напряжения, включенного параллельно нагрузке $K_d=0,1$. Определить величину напряжения на выходе стабилизатора напряжения. **Ответы**, один из которых правильный: 100В; 60В; 400В; 150В.
20. Определить величину максимального напряжения на нагрузке ($U_{н.}$) операционного усилителя, если напряжение источника питания равно 15В. **Ответы**, один из которых правильный: 20В; меньше 15В; больше 15В.

ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Линейные, параметрические и нелинейные элементы электрических цепей. Какими уравнениями они описываются?
2. Вольтамперные характеристики полупроводниковых резисторов, выпрямительных диодов и стабилизаторов.
3. В чем отличие понятий: "электрическое сопротивление" и "резистор", "электрическая емкость" и "конденсатор"?
4. Индуктивность и взаимная индуктивность. Какие физические явления эти величины характеризуют?

5. Назначение и принцип работы тиристора.
6. Принцип и области применения тиристорov.
8. Период и чистота переменного тока в электрической сети.
9. На штепсельной розетке указано напряжение "220 В". Какое это значение: мгновенное, действующее или амплитудное?
10. Что характеризуют активное, реактивное и полное сопротивления электрической цепи?
11. От чего зависит величина сдвига по фазе между током и напряжением в электрической цепи?
12. В чем заключается и как проявляется явление резонанса напряжений в электрических цепях?
13. При каких условиях возникает резонанс напряжений?
14. Какие параметры колебательного контура нужно изменять, чтобы получить резонанс?
15. Построить амплитудночастотную и фазочастотную характеристики резонансного контура.
16. Практическое использование резонанса токов в электронике.
17. Мгновенная мощность в электрической цепи. Частота изменения мгновенной мощности. Как определяются среднеквадратическое напряжение и средняя активная мощность?
18. Мощность в трехфазных электрических системах. Полная, активная и реактивная мощность в трехфазной цепи.
19. Какой смысл понятия коэффициент мощности? Технико-экономическое значение повышения коэффициента мощности.
20. Зачем и как повышают коэффициент мощности?
21. Трехфазные системы электрических цепей. Методы получения трехфазного напряжения.
22. Преимущества использования трехфазных цепей по сравнению с однофазными.
23. Соединение потребителей энергии по схемам звезда и треугольник. Достоинства и недостатки этих схем.
24. Свойства симметричных трехфазных цепей.
25. Методы измерения мощности в трехфазной цепи.
26. Компенсации реактивной мощности в трехфазных электрических сетях.
27. Измерительные приборы, используемые для контроля мощности в трехфазных сетях.
28. Усилители электрических сигналов, их классификация. Понятие о коэффициентах усиления по мощности, напряжению и току.
29. Схемы включения транзисторов в усилительных каскадах.
30. Операционные интегральные усилители на полупроводниковых транзисторах, их характеристики и области применения.
31. Выпрямители и фильтры. Однофазные и трехфазные схемы выпрямителя.
32. Управляемые выпрямители на тиристорах.
33. Логические элементы «ИЛИ-НЕ» на транзисторах, их назначение.
34. Логические цифровые устройства на интегральных схемах.

35. Принципы измерения электрических величин. Погрешности измерений.
36. Трансформаторы. Устройство и принцип действия трансформатора.
37. Почему в трансформаторе обмотка низшего напряжения выполняется проводом большого сечения, чем обмотка высшего напряжения?
38. Трехфазные трансформаторы. Группы включения обмоток.
39. От чего зависит К.П.Д. трансформатора?
40. Какие особенности построения автотрансформаторов?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. -М.: Высшая школа.2003.
- 2.И.М.Иноземцев,А.Е Краснов.Электротехника и электроника.Учебно-практическое пособие.М.: МГУ ТУ,2004.
3. Электротехника и электроника в 3-х книгах под редакцией В.Г. Герасимова. М.Энгергоатомиздат.1997...1999.
- 4.И.М.Иноземцев,С.А.Николаева.Электротехника и электроника.Лабораторный практикум. Модуль 1. М.: МГУ ТУ,2007.
- 5.И.М.Иноземцев.Электротехника и электроника.Лабораторный практикум. Модуль 2. М.: МГУ ТУ,2007.
6. В.И.Карлащук. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М.: 2003.

СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ

- Автогенератор – электронное устройство, вырабатывающие из напряжения источника питания переменное напряжение различной формы.
- Аналого-цифровой преобразователь – электронное устройство, преобразующее аналоговый сигнал в цифровую форму.
- Выпрямитель – электронное устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянное.
- Динистор – полупроводниковый прибор релейного типа, состоящий из трех последовательно включенных «р-п»-переходов с двумя выводами: анодом и катодом, к которым подключается постоянное напряжение.
- Емкость – абсолютная величина отношения приращения заряда между двумя проводящими электродами, разделенными диэлектриком к приращению напряжения между ними $C=dQ/dU$ [Кулон/Вольт] =[Фарада].
- Измерение – получение оценки измеряемой величины.
- Инвертор – электронное устройство, преобразующее постоянное напряжение в импульсное.
- Конденсатор – устройство, предназначенное для получения емкости определенной величины.
- Контур колебательный – устройство, состоящие из последовательного или параллельно включенных индуктивности и емкости.
- МДП-конденсатор – полупроводниковый конденсатор, образованный структурой металл-диэлектрик-полупроводник.
- МДП-транзистор – полевой полупроводниковый прибор с изолированным затвором и p или n-проводящим каналом.

Напряжение – разность потенциалов, измеряемая в Вольтах.

Тиристор – полупроводниковый прибор релейного типа, состоящий из трех последовательно включенных «р–п» - переходов с тремя выводами: анодом, катодом и управляющим электродом.

Транзистор биполярный – полупроводниковый прибор, состоящий из двух включенных навстречу друг другу взаимодействующих между собой «р-п»-переходов.

Трансформатор- статическое электромагнитное устройство (без вращающихся частей). предназначенное для измерения величины напряжения без изменения частоты колебаний.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

КПД – коэффициент полезного действия.

МДП – конденсатор – структура металл-диэлектрик-полупроводник.

ОКГ – оптический квантовый генератор.

СВЧ – сверхвысокие частоты.

ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

ЭДС – электродвижущая сила.

ЭМП – электромагнитное поле.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ СИ

В.3.1.ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ

обозначение

	междун.	русское
1.Время (секунда)	t[s]	t[с]
2.Длина (метр)	L[m]	L[м]
3.Масса (килограмм)	m[kg]	кг
4.Количество вещества (моль)	mol	моль
5.Температура (Кельвин)	T[K]	T[K]
6.Сила тока (Ампер)	I[A]	I[A]
7.Сила света (Канделл)	[Cd]	[Кд]

ПРОИЗВОДНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

обозначение

междун. русское

1.Напряженность электрического поля	E[V/m]	E[B/м]
2.Напряженность магнитного поля	H[A/m]	H[A/м]
3.Наряжение (Вольт)	V[V]	U[B]
4.Ток (Ампер)	I[A]	I[A]
5.Мощность полная (Вольт•Ампер)	S[VA]	S[BA]
6.Мощность активная (Ватт)	P[W·t]	P[Bт]
7.Мощн. реактивная (Вольт•Амп.реакт.)	Q[VAr]	Q[BАр]
8.Частота колебаний напряжения (Герц)	f[Hz]	f[Гц]
9.Угловая частота колебаний (радиан/с)	ω [rad/s]	ω [рад/с]
10.Магнитная индукция (Тесла)	B[T]	B[Тл]
11.Соппротивление полное(Ом)	Z[Ohm]	Z[Ом]

12.Сопротивление активное (Ом)	R[Ohm]	R[Ом]
13.Сопротивление реактивное (Ом)	X[Ohm]	X[Ом]
14.Проводимость полная (Сименс)	Y[Cm]	Y[См]
15.Проводимость активная	G[Cm]	g[См]
16.Проводимость реактивная	B[Cm]	b[См]
17.Индуктивность (Генри)	L[Hg]	L[Гн]
18.Емкость(Фарада)	C[F]	C[Ф]

ДЕСЯТИЧНЫЕ ПРИСТАВКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОБОЗНАЧЕНИИ ОСНОВНЫХ И ПРОИЗВОДНЫХ ЕДИНИЦ

обозначения			обозначения		
	межд.	русское		межд.	русское
10^{18}	Экса [E]	[Э]	10^{-1}	Деци [d]	[д]
10^{15}	Пета [P]	[П]	10^{-2}	Сантис [c]	[с]
10^{12}	Тера [T]	[Т]	10^{-3}	Мили [m]	[м]
10^9	Гига [G]	[Г]	10^{-6}	Микро[μ]	[мк]
10^6	Мега [M]	[М]	10^{-9}	Нано [n]	[н]
10^3	Кило [k]	[к]	10^{-12}	Пико [p]	[п]
10^2	Гекто [h]	[г]	10^{-15}	Фемто [f]	[ф]
10^1	Дека [da]	[да]	10^{-18}	Атто [a]	[а]

Ответы на тесты по темам

Тема 1: 1) 3м; 2) 10^8 м/с; 3) $0,6 \cdot 10^{15}$ Гц ; 4) 3; 5) 10^{15} Гц.

Тема 2: 1) 1,6 МГц; 2)10; 3) 6280; 4)100Гц;

Тема 3: 1) 220В; 2) 308 В; 3) 0,0А; 4) 520Вт; 5)127мА,

Тема 4: 1) 156 В; ваттметры; 3)173; 4) 220В; 5) 594 Вт,

Тема 5: 1) 10; 2) отрицательной полярности; 3) 16,6 МГц; 4) 1,0 кОм; 5) 10.

Тема 6: 1) 308 В; 2) 3:1; 3) 6В; 4) 2В.

Ответы на тесты по дисциплине:

1) $3 \cdot 10^8$ м/с; 2) 10^8 Гц; 3) 20кВ /м; 4) 380 В;

5) 127В ; 6) не изменится ; 7) 660В; 8) 220мА;

9) 380 В; 10) 314 рад/с; 11) 1,66 МГц; 12) 60 дБ;

13) вольтметр и амперметр; 14) 141В; 15) 1,73;

16) между нейтральным проводим и любой из фаз ;

17) 259В ; 18)380 В; 19)100В; 20) меньше 15В.

Иноземцев Игорь Матвеевич
Краснов Андрей Евгеньевич
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА.
ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА.
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА.

Учебно-практическое пособие для студентов всех специальностей
М.:МГУ ТУ.2007.

