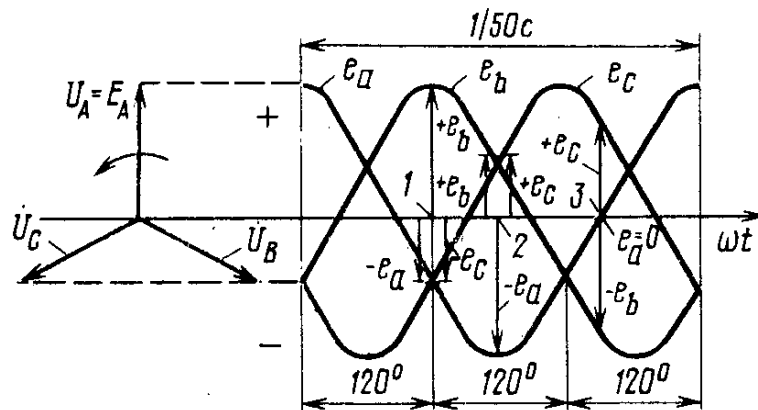




Н.И.Ткаченко
С.Е.Башняк

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие



Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Департамент научно-технологической политики и образования
ФГБОУ ВПО Донской государственной аграрный университет

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 280700.62 -
«Техносферная безопасность», профиль «Безопасность технологических
процессов и производств»

пос. Персиановский 2015

УДК 621.3 (0.75)
ББК 31.2
Т-48

Авторы: кандидат технических наук, доцент Ткаченко Н.И.
кандидат технических наук, доцент Башняк С.Е.

Ткаченко Н.И., Башняк С.Е.

Т48 Электротехника и электроника: учебное пособие/ Н.И.Ткаченко,
С.Е.Башняк. - пос. Персиановский: Донской ГАУ, 2015. - 59 с.

В учебном пособии основные теоретические положения дополняются примерами решения задач, что позволяет укрепить необходимые знания в процессе изучения дисциплины «Электротехника и электроника».

Учебное пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 280700.62 - «Техносферная безопасность», профиль «Безопасность технологических процессов и производств»

УДК 621.3 (0.75)
ББК 31.2

Рис. – 21
Библ. – 4

Рецензент: Шаршак В.К., доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности, механизация и автоматизация технологических процессов и производств» ДонГАУ;
Михеев А.В., канд. техн. наук, профессор кафедры «Машины природообустройства» НИМИ ДГАУ.

Одобрено методической комиссией факультета ТСХП
Протокол № 9 от 24 апреля 2015 года.

Рекомендовано методическим Советом ДонГАУ в качестве учебного пособия
Протокол № 6 от 28 мая 2015 года.

© Донской государственный
аграрный университет, 2015 год

Введение

В соответствии с учебным планом подготовки бакалавров по направлению 280700.62_«Техносферная безопасность» (профиль «Безопасность технологических процессов и производств») дисциплина БЗ.Б.6 «Электротехника и электроника», относится к базовой части профессионального цикла.

Цель преподавания дисциплины: формирование у студентов представлений о физических процессах, происходящих в цепях электрического тока, принципах действия, характеристиках и эксплуатационных возможностях электрических машин и аппаратов, средств электроники.

Задачи изучения дисциплины:

- ознакомление студентов со способами построения простейших цепей постоянного и переменного тока, их свойствами и режимами работы;
- рассмотрение особенностей цепей трехфазного переменного тока, их преимущества перед цепями однофазного тока;
- уяснение технико-экономического значения коэффициента мощности и ознакомление с мероприятиями по его повышению;
- рассмотрение конструкций и эксплуатационных особенностей электрических машин, областей их применения;
- ознакомление с простейшими схемами полупроводниковой техники.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих *общекультурных* компетенций:

ОК-3 - гражданской ответственности (знание и соблюдение прав и обязанностей гражданина; свободы и ответственности);

ОК-6 - способности организовать свою работу ради достижения поставленных целей; готовность к использованию инновационных идей;

ОК-7 - владения культурой безопасности и риск-ориентированным мышлением, при котором вопросы безопасности и сохранения окружающей среды рассматриваются в качестве важнейших приоритетов в жизни и деятельности;

ОК-8 - способности работать самостоятельно;

ОК-9 - способности принимать решения в пределах своих полномочий;

ОК-10 - способности к познавательной деятельности;

ОК-15 - способности использовать организационно-управленческие навыки в профессиональной и социальной деятельности.

Изучение дисциплины направлено на формирование *профессиональных* компетенций:

ПК-1 - способности ориентироваться в перспективах развития техники и технологии защиты человека и природной среды от опасностей техногенного и природного характера;

ПК-2 - способности разрабатывать и использовать графическую документацию;

ПК-3 - способности принимать участие в инженерных разработках среднего уровня сложности в составе коллектива;

ПК-4 - способности оценивать риск и определять меры по обеспечению безопасности разрабатываемой техники;

ПК-5 - способности использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности;

ПК-8 - способности ориентироваться в основных методах и системах обеспечения техносферной безопасности, обоснованно выбирать известные устройства, системы и методы защиты человека и природной среды от опасностей;

ПК-9 - способности ориентироваться в основных нормативно-правовых актах в области обеспечения безопасности;

ПК-10 - готовности к выполнению профессиональных функций при работе в коллективе;

ПК-11 - способности пропагандировать цели и задачи обеспечения безопасности человека и природной среды в техносфере;

ПК-12 - готовности использовать знания по организации охраны труда, охраны окружающей среды и безопасности в чрезвычайных ситуациях на объектах экономики;

ПК-13 - способности использовать знание организационных основ безопасности различных производственных процессов в чрезвычайных ситуациях;

ПК-14 - способности использовать методы определения нормативных уровней допустимых негативных воздействий на человека и природную среду;

ПК-15 - способностью проводить измерения уровней опасностей в среде обитания, обрабатывать полученные результаты, составлять прогнозы возможного развития ситуации;

ПК-16 - способности анализировать механизмы воздействия опасностей на человека, определять характер взаимодействия организма человека с опасностями среды обитания с учетом специфики механизма токсического действия вредных веществ, энергетического воздействия и комбинированного действия вредных факторов;

ПК-17 - способности определять опасные, чрезвычайно опасные зоны, зоны приемлемого риска;

ПК-18 - способности контролировать состояние используемых средств защиты, принимать решения по замене (регенерации) средства защиты;

ПК-19 - способности ориентироваться в основных проблемах техносферной безопасности;

ПК-20 - способности принимать участие в научно-исследовательских разработках по профилю подготовки: систематизировать информацию по теме исследований, принимать участие в экспериментах, обрабатывать полученные данные;

ПК-21 - способности решать задачи профессиональной деятельности в составе научно-исследовательского коллектива.

В результате изучения дисциплины студент должен:

- **знать** основные законы электротехники; устройство трансформаторов, асинхронных двигателей, машин постоянного тока; элементную базу электроники;
- **уметь** выполнять расчеты электрических цепей постоянного и пере-

менного тока; определять рабочие характеристики электрических машин; пользоваться каталогами электротехнического оборудования для подбора электропривода и оборудования электроснабжения;

- **владеть** методами выполнения электрических измерений; методами повышения коэффициента мощности; техникой безопасности при работе с электротехническим оборудованием.

1. Электробезопасность. Оказание первой помощи пострадавшему от электрического тока

Основное условие безопасности при работе с электрическим оборудованием — исключение возможностей случайного прикосновения к токоведущим частям. Для этого необходимо поддерживать изоляцию в хорошем состоянии, ограждать все токоведущие неизолированные элементы оборудования, а также располагать токоведущие неизолированные части на высоте, недоступной без специальных приспособлений.

Не допускается заменять плавкие вставки (предохранители) под напряжением. Категорически запрещается определять наличие напряжения на элементах установки, прикасаясь к ним руками. Для этой цели нужно использовать специальные приборы (тестеры) или контрольную лампу.

Чтобы предупредить персонал о включенном или выключенном состоянии различных элементов в электрической установке, пользуются сигнализацией. Надежным средством защиты персонала от прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением, является блокировка.

Помещения закрытых и территория открытых высоковольтных электроустановок должны быть недоступны для посторонних.

Ремонтные работы в сетях низкого напряжения при снятом напряжении ведут два электрика одновременно, с тем чтобы в случае попадания одного из них под напряжение второй мог прийти ему на помощь. Для предупреждения ошибочных включений напряжения на линию или в электроустановку, где ведутся ремонтные работы, необходимо между ножами отключенного рубильника прокладывать изолирующий материал, вынимать плавкие вставки предохранителей и вывешивать плакат «Не включать, работают люди».

Если рубильник находится вне поля зрения работающих, то после отключения установки необходимо наложить заземление на участке, где ведутся ремонтные работы. Время начала и конца работы регистрируют в дежурном журнале.

Работа под напряжением в электроустановке допускается лишь в том случае, когда отключение установки вызовет серьезное нарушение технологического процесса или приведет к браку выпускаемой продукции. Эту работу проводит специально обученный электрик под наблюдением инженера или техника с соблюдением всех мер предосторожности: с использованием ковриков и изолирующих подставок, резиновых перчаток и галош, инструмента с изолированными ручками и т. д.

Электротехническое оборудование должно быть заземлено. Во всех случаях заземлению подлежат все объекты при переменном напряжении 380 В и выше и постоянном напряжении 440 В, а в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках – при переменном напряжении свыше 42 В и постоянном напряжении свыше 110 В.

Оказание первой помощи пострадавшему от тока. Прежде всего пострадавшего необходимо освободить от действия тока, уложить его на спину; проверить, дышит ли он (по подъему грудной клетки, по отклонению нитки, полоски бумаги, поднесенных ко рту или носу пострадавшего); проверить пульс (на лучевой артерии у запястья или на сонной артерии на шее); определить состояние зрачка (узкий или широкий; широкий зрачок указывает на резкое ухудшение кровоснабжения мозга). Все это должно занять не более 15...20 с. Одновременно необходимо вызвать врача.

Освобождая пострадавшего от тока, следует соблюдать соответствующие меры предосторожности. Самое надежное — отключить установку рубильником, если он находится в непосредственной близости. В противном случае можно перерубить провода топором или лопатой с изолирующей сухой рукояткой. Можно набросить на провода предварительно воткнутый в землю неизолированный проводник и тем самым сделать короткое замыкание, которое вызовет отключение электроустановки.

Если невозможно быстро отключить токоведущие части, которых касается пострадавший, или снять с них напряжение, то следует отделить его от токоведущих частей. При этом прикосновение к телу пострадавшего может быть опасным для спасающего. В установках напряжением 380/220 В оторвать пострадавшего от токоведущих частей можно, надев рукавицы, обернув свою руку сухой одеждой, а также пользуясь в качестве рычага сухой доской или палкой. Встав на сверток сухой одежды (костюм, пальто), сухую доску, табуретку, стул и т. п. и изолировав себя таким образом от земли, можно действовать одной рукой.

Когда нельзя отключить установку с напряжением выше 1000 В, при отделении пострадавшего от тока нужно надеть изолирующие боты, диэлектрические перчатки и действовать изолирующей штангой или клещами.

Когда пострадавший находится на высоте, прежде чем снять напряжение в сети или отделить человека от сети, нужно предотвратить или обезопасить его падение.

Если после освобождения от тока пострадавший дышит и пульс у него есть, его следует удобно уложить, укрыть, создать приток свежего воздуха, обеспечить полный покой и ждать прибытия врача.

Если пострадавший не дышит или дышит очень редко и судорожно, делают искусственное дыхание.

При прекращении дыхания и остановке сердечной деятельности у пострадавшего быстро наступают необратимые явления в нервных клетках головного мозга, которые управляют жизненно важными функциями организма. Помощь пострадавшему должна быть оказана как

можно скорее, поскольку даже самое малое промедление может оказаться причиной гибели человека.

Для приведения пострадавшего в чувство рекомендуется пользоваться двумя основными приемами:

1) делать искусственное дыхание, ритмично вдвывая воздух в рот или нос пострадавшего;

2) искусственно поддерживать кровообращение, ритмично надавливая на переднюю стенку грудной клетки. Этот прием, называется наружным (закрытым, непрямым) массажем сердца.

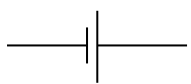
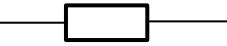
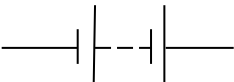
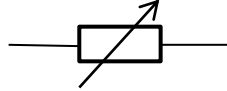

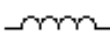
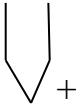

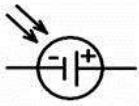



Прекращать оказание первой помощи следует лишь после появления у пострадавшего самостоятельного дыхания и достаточно устойчивой работы сердца. Если дыхание есть, а пульс долго не появляется, необходимо продолжать меры по оживлению до прибытия врача или доставить пострадавшего в медицинское учреждение, оказывая помощь в машине.


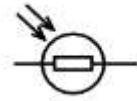

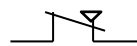


2. Условные обозначения элементов электрических схем

Электрические цепи принято изображать электрическими схемами, в которых генерирующие и преобразующие устройства, а также соединяющие их линии электрической связи показывают условными графическими обозначениями. Основные обозначения элементов схем приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условные графические обозначения элементов электрических схем

Обозначение	Наименование	Обозначение	Наименование
	Элемент гальванический или аккумуляторный		Резистор постоянный
	Батарея из гальванических или аккумуляторных элементов		Резистор переменный
	Генератор электро-механический постоянного тока		Катушка индуктивности
	Термопара		Конденсатор постоянной емкости
	Фотоэлемент солнечный		Конденсатор переменной емкости
	Линия электрической		Лампа накаливания

	связи Источник э.д.с		Фоторезистор
	Источник тока		Коммутационный аппарат
	Трансформатор		Электродвигатель

При составлении электрической схемы элементы электрической цепи изображают с интервалом друг от друга и соединяют линиями тока (проводами). Над каждым элементом цепи указывают соответствующее буквенное обозначение, а также знак полярности источника питания: «+» - положительная полярность, «-» - отрицательная. В обозначении источника питания стрелка указывает направление действия ЭДС, т.е. направление возрастания потенциала внутри источника. На схемах указывают положительные направления тока, напряжения или падения напряжения.

Задача 2.1. Составить схему электрической цепи постоянного тока с источником ЭДС E с внутренним сопротивлением R_0 при наличии последовательно включенных потребителей электроэнергии – фоторезистора ΦR , резистора с сопротивлением R , лампы накаливания L и коммутационного аппарата B .

Решение.

При составлении схемы учитываем установленные стандартом условные графические обозначения элементов электрической цепи. Электрическая схема, составленная в соответствии с заданием, приведена на рис. 1

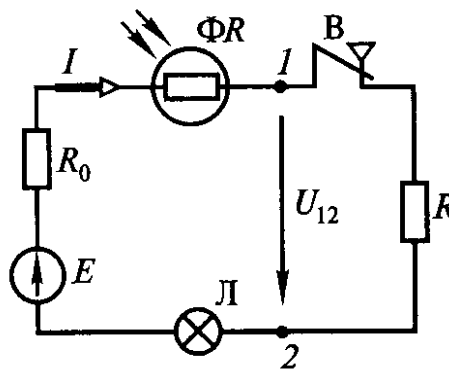


Рис. 1. Схема к задаче 2.1

Задача 2.2. Составить электрическую схему источника ЭДС и схему эквивалентного ему источника тока, соединенного с нагрузочным сопротивле-

нием R_n . Определить ток I и проводимость G_0 источника тока. ЭДС источника $E = 6$ В, его внутреннее сопротивление $R_0 = 0,1$ Ом.

Решение.

Электрическая схема с источником ЭДС и нагрузочным сопротивлением приведена на рис. 2, а. Источник ЭДС (ограничен пунктиром) характеризуется величиной ЭДС E и внутренним сопротивлением R_0 . Источник ЭДС E изображен на схеме включенным последовательно с внутренним сопротивлением R_0 . Схема источника тока приведена на рис. 2, б. Двойная стрелка на схеме показывает направление тока источника и указывает на разрыв электрической цепи, обусловленный бесконечно большим внутренним сопротивлением источника, который характеризуется значением тока I и внутренней проводимостью G_0 , включенными на схеме параллельно. При замене источника ЭДС эквивалентным источником тока мощность, потребляемая нагрузкой, принимается неизменной.

Условием эквивалентности двух источников является равенство напряжений в режиме холостого хода и токов в режиме короткого замыкания.

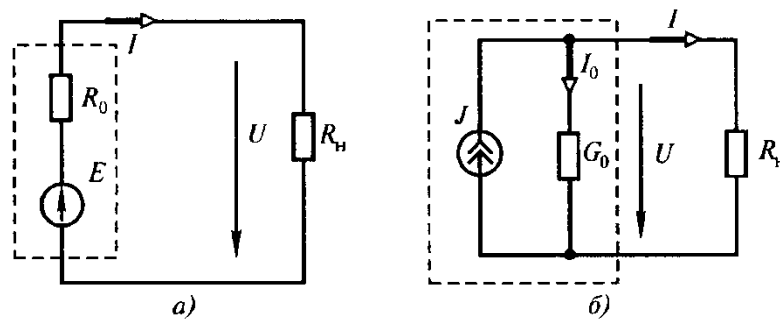


Рис. 2. Схема к задаче 2.2

При холостом ходе источника ЭДС ток в цепи $I_x = I = I_0 = 0$, а напряжение холостого хода $U_x = U = E$, при этом напряжение источника тока $U = I_0/G_0 = J/G_0$. При коротком замыкании источника ЭДС напряжение $U_k = U = 0$. При этом $I_k = I = E/R_0$, $I = J$. Отсюда $J = E/R_0$, а $E = J/G_0$, т.к. $G_0 = 1/R_0$.

Таким образом ток и проводимость эквивалентного источника тока будут равны $J = E/R_0 = 6/0,1 = 60$ А, $G_0 = 1/0,1 = 10$ См

Задача 2.3. Составить схему электрической цепи, состоящую из батареи гальванических элементов и последовательно включенных в цепь лампы накаливания L , переменного резистора R , конденсатора переменной емкости C , катушки индуктивности L , коммутационного аппарата B , параллельно которым включены постоянный резистор R_1 , конденсатор постоянной емкости C_1 и фоторезистор с сопротивлением R_2 .

3. Расчет цепей постоянного тока с применением законов Кирхгофа

В соответствии с первым законом Кирхгофа в любой электрической цепи сумма токов в каждом узле цепи равна нулю:

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0,$$

где I_j – ток в j -ой ветви.

Согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме напряжений и алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре:

$$\sum_{j=1}^n E_j = \sum_{j=1}^n R_j I_j + \sum_{j=1}^n U_j,$$

где $\sum_{j=1}^n E_j$ – сумма ЭДС в рассматриваемом контуре; R_j – сопротивление участка цепи рассматриваемого контура; I_j – ток в цепи сопротивления R_j ; $\sum_{j=1}^n U_j$ – алгебраическая сумма напряжений, приложенных к рассматриваемому контуру.

При расчете электрических цепей методом применения законов Кирхгофа, выбирают условные положительные направления токов, ЭДС и напряжений на участках цепи, которые обозначают стрелками на схеме, затем выбирают замкнутые контуры и задаются положительным направлением их обхода. При этом для удобства расчетов направлением обхода всех контуров рекомендуется выбрать одинаковым (например, по часовой стрелке)

Для получения независимых уравнений необходимо, чтобы в каждый новый контур входила хотя бы одна новая ветвь, не вошедшая в предыдущие контуры, для которых уже записаны уравнения по второму закону Кирхгофа.

Число уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа, необходимое для выполнения расчета данной электрической цепи, должно быть равно числу неизвестных N .

В большинстве случаев известны параметры источников ЭДС или напряжения, источников тока, сопротивлений участков цепи, а неизвестными являются величины токов в ветвях цепи. Для упрощения расчетов сначала составляют более простые уравнения по первому закону Кирхгофа, а недостающие – по второму закону Кирхгофа.

Число уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа берется на единицу меньше числа узлов в цепи N_y :

$$N_1 = N_y - 1.$$

При этом токи, направленные к узлу, условно принимаются положительными, а направленные от узла – отрицательными.

Остальное число уравнений N_2 составляют по второму закону Кирхгофа. Их число равно:

$$N_2 = N - N_1 = N - N_y + 1.$$

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа ЭДС источников принимаются положительными, если направления их действия совпадают с выбранным направлением обхода контура, при несовпадении их записывают со знаком «минус». Падения напряжений в ветвях записывают со знаком «плюс», если направление тока в ветви совпадает с направлением обхода, в противном случае они записываются со знаком «минус».

В результате решения полученной системы из N уравнений находят численные значения неизвестных величин и устанавливают их действительные направления. При этом величины, имеющие отрицательный знак, в действительности имеют направление, противоположное условно принятому. Направления величин, имеющих положительный знак, совпадают с условно принятым направлением.

Примеры решения задач

Задача 3.1. Для электрической цепи постоянного тока (рис. 3) определить токи I_1 , I_2 , I_3 в ветвях, если $E_1 = 3,6$ В, $E_2 = 1,2$ В, $U = 2,4$ В, сопротивления резисторов $R_1 = 0,5$ Ом, $R_2 = 1,0$ Ом, $R_3 = 1,5$ Ом

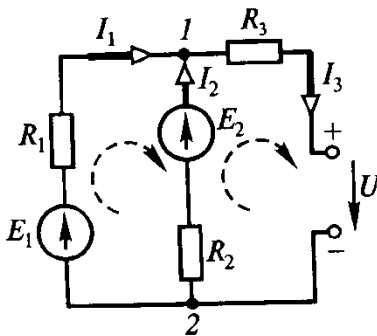


Рис. 3. К зад.3.1

По первому закону Кирхгофа для узла 1 электрической цепи будет иметь вид

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1)$$

Уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа для левого замкнутого контура с учетом выбранного направления обхода, показанного стрелкой, будет иметь вид

$$E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2. \quad (2)$$

Уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа для правого замкнутого контура,

$$E_2 = R_2 I_2 + R_3 I_3 + U. \quad (3)$$

Решаем полученную систему уравнений относительно неизвестных I_1 , I_2 , I_3 , подставляя в уравнения известные величины

$$3,6 - 1,2 = 0,5 I_1 - I_2; \quad (2)$$

$$1,2 = I_2 + 1,5 I_3 + 2,4; \quad (3)$$

$$\text{или } 2,4 = 0,5 I_1 - I_2; \quad (2)$$

$$- 1,2 = I_2 + 1,5 I_3. \quad (3)$$

Из первого уравнения выражаем I_3

$$I_3 = I_1 + I_2.$$

Подставляем полученное выражение в третье уравнение

$$- 1,2 = I_2 + 1,5(I_1 + I_2).$$

Раскрываем скобки, приводим подобные члены

$$- 1,2 = 1,5 I_1 + 2,5 I_2.$$

Из уравнения (2) выражаем I_2

$$I_2 = 0,5 I_1 - 2,4$$

Подставляем в (3) и определяем I_1

$$- 1,2 = 1,5 I_1 + 2,5(0,5 I_1 - 2,4)$$

$$- 1,2 = 1,5 I_1 + 1,25 I_1 - 6,0$$

$$2,75 I_1 = 4,8 \rightarrow I_1 = 1,75 \text{ (A)}.$$

Определяем токи I_2 и I_3 .

$$I_2 = 0,5 I_1 - 2,4 = 0,5 \cdot 1,75 - 2,4 = - 1,52 \text{ (A)},$$

$$I_3 = I_1 + I_2 = 1,75 - 1,52 = 0,23 \text{ (A)}.$$

Таким образом, направления токов I_1 и I_3 совпадают с условно принятыми направлениями, а ток I_2 направлен в противоположную показанному на схеме направлению сторону.

Задача 3.2. Для электрической цепи постоянного тока (рис. 4) определить токи I_1, I_2, I_3 в ветвях, если $E_1 = 3,8 \text{ В}$, $E_2 = 1,2 \text{ В}$, сопротивления резисторов $R_1 = 0,2 \text{ Ом}$, $R_2 = 0,3 \text{ Ом}$, $R_3 = 0,8 \text{ Ом}$, $R_{01} = 0,6 \text{ Ом}$, $R_{02} = 0,4 \text{ Ом}$.

Решение.

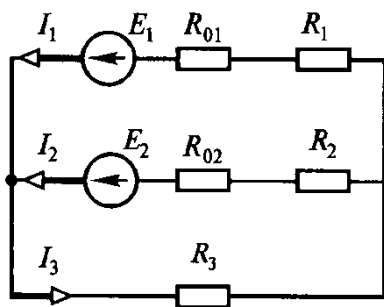


Рис. 4. К зад. 3.2

Для узла разветвления в соответствии с принятым на схеме условным положительным направлением токов составляем уравнение по первому закону Кирхгофа

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Для внешнего замкнутого контура составляем уравнение по второму закону Кирхгофа

$$E_1 = (R_{01} + R_1) I_1 + R_3 I_3, \text{ или}$$

$$1,8 = (0,6 + 0,2) I_1 + 0,8 I_3; 1,8 = 0,8 I_1 + 0,8 I_3.$$

Аналогично, для нижнего замкнутого контура по второму закону Кирхгофа:

$$E_2 = (R_{02} + R_2) I_2 + R_3 I_3; 1,2 = 0,7 I_2 + 0,8 I_3.$$

В результате совместного решения полученной системы трех уравнений определяем ток I_1 в первой ветви

$$1,8 = 0,8 I_1 + 0,8 (I_1 + I_2); 1,8 = 1,6 I_1 + 0,8 I_2; 1,2 = 0,7 I_2 + 0,8 (I_1 + I_2);$$

$$1,2 = 1,5 I_2 + 0,8 I_1 \text{ или } I_1 = (1,2 - 1,5 I_2)/0,8.$$

Определяем ток I_2 , подставив значение I_1 во второе уравнение

$$1,2 = 1,6(1,2 - 1,5 I_2)/0,8 + 0,8 I_2;$$

$$1,2 = 2,4 - 3 I_2 + 0,8 I_2.$$

Откуда

$$2,2 I_2 = 0,6 \rightarrow I_2 = 0,6/2,2 = 0,27 \text{ (A)}.$$

Ток в первой ветви

$$I_1 = (1,2 - 1,5 I_2)/0,8 = (1,2 - 1,5 \cdot 0,27)/0,8 = 0,99 \text{ (A)}.$$

Ток в третьей ветви

$$I_3 = I_1 + I_2 = 0,99 + 0,27 = 1,26 \text{ (A)}.$$

Направления всех токов совпадают с условно принятыми первоначальными направлениями.

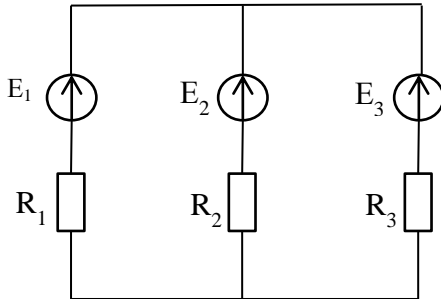


Рис. 5. Схема к зад.3.3

Задача 3.3. Определить токи в ветвях электрической цепи постоянного тока (рис. 5) при следующих данных $E_1 = 1,5 \text{ В}$, $E_2 = 3,0 \text{ В}$, $E_3 = 4,5 \text{ В}$, $R_1 = 1,0 \text{ Ом}$, $R_2 = 2,0 \text{ Ом}$, $R_3 = 0,5 \text{ Ом}$.

4. Способы представления характеристик синусоидального тока.

Характеристики переменного синусоидального тока могут быть представлены тригонометрической формой записи, линейными диаграммами изменения синусоидальной величины во времени, вращающимися векторами и комплексными числами.

Тригонометрическая форма записи синусоидально изменяющейся во времени величины (тока, напряжения, ЭДС) в общем виде представляется выражением

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi),$$

где a – мгновенное значение синусоидально изменяющейся величины (тока i , напряжения u , ЭДС e); A_m – амплитудное значение синусоидально изменяющейся величины (I_m , U_m , E_m); $\alpha = (\omega t + \psi)$ – фаза или фазовый угол (аргумент синусоидальной функции времени); ω – угловая частота, характеризующая скорость изменения фазового угла; t – текущее значение времени; ψ – начальная фаза (начальный фазовый угол).

В соответствии с выражением для мгновенного значения синусоидально изменяющиеся характеристики переменного тока изображаются в виде линейной диаграммы – графика изменения соответствующей синусоидальной величины от времени (угла ωt) (рис. 6, б).

Период синусоидально изменяющейся во времени величины, T – это время, за который совершается один полный цикл изменения мгновенных значений величины

$$T = 1/f,$$

где f – частота синусоидально изменяющейся во времени величины (число периодов в секунду).

Промышленная частота переменного синусоидального тока в РФ $f = 50 \text{ Гц}$ ($1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$).

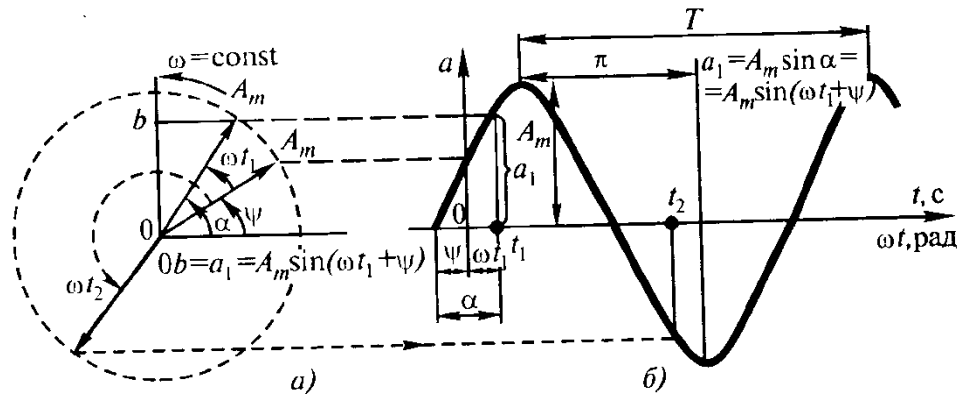


Рис. 6. Графическое изображение синусоидально изменяющейся величины

В электротехнике кроме мгновенных и максимальных значений переменных синусоидальных величин используются действующие и средние значения.

Действующее значение переменного тока численно равно эквивалентной по тепловому действию силе *постоянного тока*, то есть такому постоянному току, который за то же время, на том же сопротивлении выделит такое же количество теплоты, что и *переменный ток*.

Действующие значения синусоидально изменяющихся токов, напряжений и ЭДС определяются как

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707I_m, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707U_m, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707E_m.$$

Средним значением синусоидально изменяющихся ЭДС, напряжений и токов называют их среднее значение за половину периода. Средние значения токов, напряжений, ЭДС определяют по зависимостям

$$I_{cp} = \frac{2I_m}{\pi} = 0,637I_m, \quad U_{cp} = \frac{U_m}{\pi} = 0,637U_m, \quad E_{cp} = \frac{E_m}{\pi} = 0,637E_m.$$

Синусоидально изменяющиеся во времени величины изображаются также вращающимся вектором (рис. 6, а). Длина вращающегося радиус-вектора равна амплитуде A_m синусоидально изменяющейся величины, угол между вращающимся вектором и осью абсцисс для момента времени $t = 0$ представляет начальную фазу ψ синусоидальной величины. В электротехнике за положительное направление вращения векторов принято направление против хода часовой стрелки.

Синусоидально изменяющиеся величины изображаются также комплексными числами. Используют три формы записи комплексных чисел — алгебраическую, тригонометрическую и показательную.

Алгебраическая форма записи комплексного числа имеет вид

$$\underline{A} = A' \pm jA'',$$

где A' — действительная часть комплексного числа; jA'' — мнимая часть комплексного числа.

В выражении комплексного числа фигурирует символ $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, с помощью которого из комплексного числа выделяется его мнимая составляющая. Умножение вектора \underline{A} на множитель j соответствует его повороту на угол $\pi/2$ в положительном направлении (против хода часовой стрелки), а умножение на $-j$ – повороту в отрицательном направлении (по ходу часовой стрелки).

Модуль комплексного числа

$$A = \sqrt{(A')^2 + (A'')^2},$$

а его аргумент

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{A''}{A'}.$$

Алгебраическая форма записи комплексных чисел более удобна при их сложении и вычитании.

Тригонометрическая форма записи комплексных чисел является производной алгебраической формы с учетом того, что

$$\cos \psi = \frac{A'}{A}, \quad \sin \psi = \frac{A''}{A}, \quad \underline{A} = A(\cos \psi + j \sin \psi).$$

Тригонометрическая форма записи комплексных чисел наиболее удобна при переходе к алгебраической форме записи от показательной.

Показательная форма записи комплексных чисел является производной от тригонометрической с учетом того, что в соответствии с формулой Эйлера

$$(\cos \psi + j \sin \psi) = e^{j\psi}; \quad \underline{A} = A e^{j\psi},$$

где $e^{j\psi}$ – поворотный множитель (показывает, что вектор повернут относительно вещественной оси в положительном направлении на угол ψ).

Некоторые соотношения между поворотными множителями:

$$j = \sqrt{-1}; \quad j \cdot j = j^2 = -1; \quad 1/j = \frac{-j}{j(-j)} = -j; \quad 1/(-j) = j.$$

При $\psi = \pm\pi/2$ в соответствии с формулой Эйлера

$$e^{\pm j\frac{\pi}{2}} = \left(\cos \frac{\pi}{2} \pm j \sin \frac{\pi}{2} \right) = (0 \pm j1) = \pm j.$$

Показательная форма записи комплексных чисел наиболее удобна при умножении, делении, извлечении корней и логарифмировании комплексных чисел.

При расчете цепей переменного тока метод комплексных чисел позволяет графические операции над векторами заменить алгебраическими действиями над комплексными числами.

При использовании комплексных чисел методы расчета электрических цепей переменного тока аналогичны методам расчета электрических цепей постоянного тока. Записи соответствующих уравнений законов Ома и Кирхгофа одинаковы по форме для цепей однофазного переменного и постоянного токов.

При этом в уравнениях, записанных для цепей переменного тока, токи \underline{I} , напряжения \underline{U} , ЭДС \underline{E} , сопротивления \underline{Z} , проводимости \underline{Y} , мощности \underline{S} записывают в комплексной форме.

С учетом этого закон Ома в комплексной форме имеет вид

$$\underline{I} = \underline{U}/\underline{Z} \text{ или } \underline{I} = \underline{U} \cdot \underline{Y}.$$

Математическое выражение первого закона Кирхгофа в комплексной форме

$$\sum_{j=1}^n \underline{I}_j = 0$$

Т.е. алгебраическая сумма комплексных токов, сходящихся в узле разветвленной цепи, равна нулю.

Математическое выражение второго закона Кирхгофа в комплексной форме

$$\sum \underline{E}_j = \sum \underline{U}_j + \sum \underline{Z}_j \underline{I}_j.$$

Согласно этому уравнению, алгебраическая сумма комплексных ЭДС в любом замкнутом контуре электрической цепи переменного тока равна алгебраической сумме комплексных напряжений и алгебраической сумме комплексных падений напряжений в этом контуре.

Примеры решения задач

Задача 4.1. Определить среднее и действующее значения синусоидального тока по его мгновенному значению $I = 31,4 \sin(\omega t + \pi/2)$.

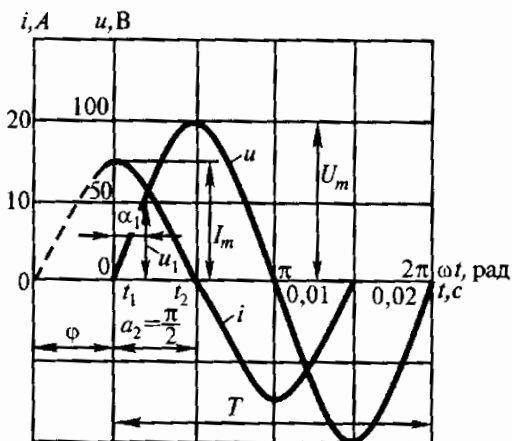
Решение.

Среднее значение синусоидального тока

$$I_{cp} = \frac{2I_m}{\pi} = \frac{2}{3,14} 31,4 = 20 \text{ (A)}.$$

Действующее значение синусоидального тока

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{31,4}{\sqrt{2}} = 22,2 \text{ (A)}.$$



Задача 4.2. Для синусоидального напряжения и тока (рис. 7) записать выражения для их мгновенных значений. Определить период T и время t_0 , соответствующее начальной фазе тока ψ_i , а также мгновенные значения напряжений для моментов времени $t_1 = 0,00167$ с и $t_2 = 0,005$ с, если частота тока $f = 50$ Гц.

Решение.

Рис.7. К зад. 4.2

Мгновенные значения напряжения и тока имеют вид

$$u = U_m \sin \omega t = 100 \sin 314 t,$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \pi/2) = 15 \sin(314 t + \pi/2),$$

где $U_m = 100$ В, $I_m = 15$ А — амплитудные значения напряжения и тока определяются по графику (рис. 7); $\omega t = 2\pi f t = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 t = 314 t$.

Начальная фаза тока в радианах

$$\psi_i = \frac{90^\circ 2\pi}{360^\circ} = \frac{\pi}{2}.$$

Период переменного напряжения и тока

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ (с)}.$$

Время начала отсчета, т.е. время соответствующее начальной фазе тока

$$t_0 = \frac{\psi_i}{\omega} = \frac{\pi/2}{2\pi/T} = \frac{\pi T}{2 * 2\pi} = \frac{T}{4} = \frac{0,02}{4} = 0,005 \text{ (с)}.$$

В момент времени $t_1 = 0,00167$ с

$$\omega t_1 = \frac{2\pi}{T} t_1 = \frac{2\pi}{0,02} 0,00167 = 0,167\pi = \frac{\pi}{6} = 30^\circ,$$

$$u_1 = 100 \sin \omega t_1 = 100 \sin 30^\circ = 50 \text{ (В)}.$$

В момент времени $t_2 = 0,005$ с

$$\omega t_2 = \frac{2\pi}{T} t_2 = \frac{2\pi}{0,02} 0,005 = \frac{\pi}{2} = 90^\circ,$$

$$u_2 = 100 \sin \omega t_2 = 100 \sin 90^\circ = 100 \text{ (В)}.$$

Задача 4.3. Представить комплексный ток $\underline{I} = (4 + j3)$ А в тригонометрической и показательной формах записи.

Решение.

Действующее значение тока (модуль комплексного тока)

$$I = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ (А)}$$

Аргумент комплексного тока

$$\operatorname{tg} \psi_i = \frac{3}{4} = 0,75, \text{ откуда } \psi_i = 36^\circ 50'.$$

Тригонометрическая форма записи комплексного тока

$$\underline{I} = (4 + j3) = I(\cos \psi_i + j \sin \psi_i) = 5(\cos 36^\circ 50' + j \sin 36^\circ 50').$$

Показательная форма записи комплексного тока

$$\underline{I} = (4 + j3) = I e^{j\psi_i} = 5 e^{j36^\circ 50'}.$$

Задача 4.4. Записать выражение для комплексной амплитуды тока \underline{I}_m , исходя из выражения для его мгновенного значения $i = 10 \sin(\omega t + 30^\circ)$ А.

Решение.

Амплитудное значение тока $I_m = 10$ А. Начальная фаза тока $\psi_i = 30^\circ$. Тогда, комплексная амплитуда тока

$$\underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = 10 e^{j30^\circ}.$$

Задача 4.5. Представить комплексный ток $\underline{I} = 5 e^{j60^\circ}$ в алгебраической форме записи.

Решение.

Переходим к алгебраической форме записи через тригонометрическую

$$\begin{aligned}\underline{I} &= 5e^{j60^\circ} = I(\cos \psi_i + j\sin \psi_i) = 5(\cos 60^\circ + j\sin 60^\circ) = \\ &= 5(0,5 + j0,866) = (2,5 + j4,33) \text{ А.}\end{aligned}$$

Задача 4.6. Комплексное напряжение в цепи переменного тока $\underline{U} = (60 + j80)$ В, а комплексный ток $\underline{I} = (8 - j6)$ А. Определить действующие значения напряжения и тока, комплексное, активное и реактивное сопротивление, а также комплексную проводимость цепи.

Решение.

Действующие значения тока и напряжения

$$U = \sqrt{60^2 + 80^2} = 100 \text{ (В)},$$

$$I = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ (А)}.$$

Комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I} = \frac{(60 + j80)(8 + j6)}{(8 - j6)(8 + j6)} = \frac{480 + j360 + j640 - 480}{64 - j^2 36} = \frac{j1000}{100} = j10 \text{ (Ом)}.$$

Активное сопротивление цепи $R = 0$, реактивное сопротивление $X = 10$ Ом.

Комплексная проводимость

$$\underline{Y} = 1/\underline{Z} = \frac{1}{j10} = \frac{-j10}{j10(-j10)} = \frac{-j10}{100} = -j0,1 \text{ (См)}.$$

5. Однофазные синусоидальные электрические цепи с последовательным соединением элементов цепи

В электрической цепи синусоидального тока с активным сопротивлением R под действием синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$ возникает синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, совпадающий по фазе с напряжением, т.к. начальные фазы напряжения U и тока I равны нулю ($\psi_u = 0$, $\psi_i = 0$). При этом угол сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$.

Комплексное напряжение совпадает по фазе с током, поэтому

$$\underline{U} = Ue^{j\psi_u} = Ue^{j0} = U.$$

Комплексное сопротивление цепи по закону Ома

$$\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I} = U/I = R.$$

В электрической цепи синусоидального тока, содержащей катушку с индуктивностью L под действием изменяющегося по синусоидальному закону напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$ возникает синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, отстающий по фазе от напряжения на угол $\pi/2$.

При этом начальная фаза напряжения $\psi_u = \pi/2$, а начальная фаза тока $\psi_i = 0$. Угол сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$.

Комплексный ток и комплексное напряжение в этой цепи

$$\underline{I} = Ie^{j\psi_i} = Ie^{j0} = I; \underline{U}_L = U_L e^{j\psi_u} = U_L e^{j\pi/2} = jU_L,$$

так как

$$e^{j\frac{\pi}{2}} = \left(\cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} \right) = (0 + j1) = j.$$

Комплексное сопротивление цепи по закону Ома

$$\underline{Z}_L = \underline{U}_L / \underline{I} = jU_L / I = jX_L,$$

где $X_L = 2\pi fL$ – индуктивное сопротивление катушки индуктивности.

Модуль комплексного сопротивления катушки индуктивности

$$Z_L = \sqrt{X_L^2} = X_L \text{ (при } R_k = 0).$$

В электрической цепи синусоидального тока с конденсатором, обладающим емкостью C , под действием напряжения $u = U_m \sin(\omega t - \pi/2)$ возникает ток $i = I_m \sin \omega t$, опережающий напряжение на конденсаторе на угол $\pi/2$.

Начальный фазовый угол тока $\psi_i = 0$, п напряжения $\psi_u = -\pi/2$. Угол сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$.

Комплексный ток в цепи конденсатора

$$\underline{I} = I e^{j\psi_i} = I e^{j0} = I.$$

Комплексное напряжение на конденсаторе

$$\underline{U}_C = U_C e^{j\psi_u} = U_C e^{-j\pi/2} = -jU_C.$$

Комплексное сопротивление конденсатора

$$\underline{Z}_C = \underline{U}_C / \underline{I} = -jU_C / I = -jX_C,$$

где $X_C = 1/2\pi fC$ – емкостное сопротивление конденсатора.

Модуль комплексного сопротивления цепи с конденсатором

$$Z_C = \sqrt{X_C^2} = X_C.$$

Электрическая цепь синусоидального тока в общем случае содержит активное сопротивление R , индуктивность L и емкость C . В электрической цепи с последовательным соединением элементов с параметрами R , L , C комплексное сопротивление и его модуль (полное сопротивление цепи)

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = Z e^{j\varphi}; \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Угол сдвига фаз между напряжением и током

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}.$$

Комплексная мощность цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями (R , L , C)

$$\underline{S} = P + jQ = P + j(Q_L - Q_C),$$

где $P = I^2 R$ – активная мощность; $Q_L = I^2 X_L$ – индуктивная составляющая реактивной мощности; $Q_C = I^2 X_C$ – емкостная составляющая реактивной мощности.

Подставив значения Q_L и Q_C в выражение для \underline{S} получим

$$\underline{S} = P + j(Q_L - Q_C) = I^2 R + jI^2 X_L - jI^2 X_C = I^2 [R + j(X_L - X_C)] = I^2 \underline{Z},$$

где $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$ – комплексное сопротивление цепи.

Так как квадрат модуля тока $I^2 = \underline{I}^* \underline{I}$, то $\underline{S} = I^2 \underline{Z} = \underline{I}^* \underline{I} \underline{Z} = \underline{I}^* \underline{U}$,

где \underline{I} – комплексный ток; \underline{I}^* – сопряженный комплексный ток; I – действующее значение (модуль) тока.

Полная мощность цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями (R , L , C) равна модулю комплексной мощности

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}.$$

При построении векторной диаграммы для электрической цепи с последовательным включением сопротивлений исходным является ток \underline{I} , так как в этом случае значение тока на всех участках цепи одинаково.

Ток \underline{I} откладывают в соответствующем масштабе ($m_I = n$, А/см), затем относительно тока в принятом масштабе ($m_U = k$, В/см) откладывают падение напряжения $\underline{\Delta U}$ на соответствующих сопротивлениях в порядке их расположения в цепи.

При этом падение напряжения \underline{U}_R на активном сопротивлении R строится совпадающим с током \underline{I} по фазе (по направлению). Напряжение \underline{U}_L на индуктивном сопротивлении опережает ток \underline{I} по фазе на угол $\pi/2$, поэтому оно строится к вектору \underline{I} под углом $\pi/2$ в направлении против движения часовой стрелки.

Напряжение \underline{U}_C на емкости C конденсатора отстает от тока \underline{I} на угол $\pi/2$, поэтому оно строится к вектору \underline{I} под углом $\pi/2$ по направлению движения часовой стрелки.

Напряжение \underline{U} , приложенное к цепи находят как векторную сумму $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C$. Угол сдвига фаз φ между током \underline{I} и приложенным напряжением \underline{U} принимается положительным, если он направлен от тока к напряжению против движения часовой стрелки, в противном случае – угол сдвига фаз φ принимается отрицательным

Примеры решения задач

Задача 5.1. В сеть переменного тока при напряжении $U = 220$ В и частоте $f = 50$ Гц включена цепь (рис. 8), содержащая последовательно соединенные конденсатор емкостью $C = 199$ мкФ, резистор с сопротивлением $R_1 = 9,6$ Ом и катушку индуктивности $L = 0,229$ Гн с активным сопротивлением $R_2 = 15$ Ом. Определить ток в цепи, падения напряжения на конденсаторе, резисторе и катушке, вычислить активную, реактивную и полную мощности цепи. Построить в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений.

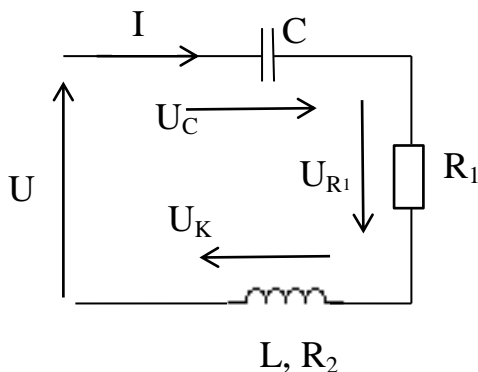


Рис.8. К зад. 5.1

Решение

1. Определяем емкостное сопротивление конденсатора

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 199} = 16 \text{ (Ом)};$$

2. Вычисляем индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = 2\pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,229 = 71,9 \text{ (Ом)};$$

3. Находим полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(9,6 + 15)^2 + (71,9 - 16)^2} = 61,1 \text{ (Ом)};$$

4. Определяем ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{61,1} = 3,6 \text{ (А)};$$

5. Напряжение на конденсаторе

$$U_C = IX_C = 3,6 \cdot 16 = 57,6 \text{ (В)};$$

6. Индуктивное напряжение на зажимах катушки

$$U_L = IX_L = 3,6 \cdot 71,9 = 258,8 \text{ (В)};$$

7. Активное напряжение на зажимах катушки

$$U_{R_2} = IR_2 = 3,6 \cdot 15 = 54 \text{ (В)};$$

8. Полное напряжение на зажимах катушки

$$U_K = \sqrt{(U_{R_2})^2 + (U_L)^2} = \sqrt{54^2 + 258,8^2} = 264,4 \text{ (В)}$$

9. Напряжение на активном сопротивлении

$$U_{R_1} = IR_1 = 3,6 \cdot 9,6 = 34,56 \text{ (В)};$$

10. Определяем активную мощность цепи

$$P = I^2(R_1 + R_2) = 3,6^2 \cdot 24,6 = 318,8 \text{ (Вт)};$$

11. Реактивная индуктивная мощность цепи

$$Q_L = I^2 X_L = 3,6^2 \cdot 71,9 = 931,8 \text{ (вар)};$$

12. Реактивная емкостная мощность

$$Q_C = I^2 X_C = 3,6^2 \cdot 16 = 207,4 \text{ (вар)};$$

13. Полная мощность цепи

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} = \sqrt{318,8^2 + (931,8 - 207,4)^2} = 791,4 \text{ (В*А)};$$

14. Строим векторную диаграмму напряжений и токов.

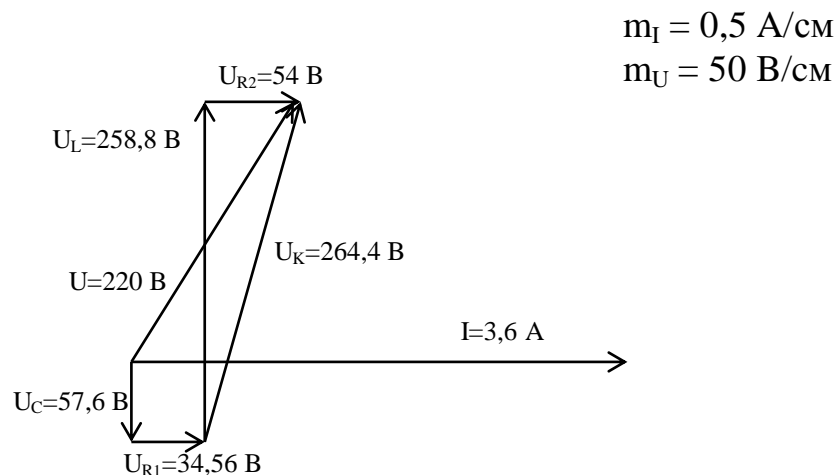


Рис. 9. Векторная диаграмма к зад. 5.1

Задача 5.2. В сеть переменного тока при напряжении $U = 120$ В и частоте $f = 50$ Гц включена катушка с индуктивностью $L = 0,009$ Г ($R_K = 0$). Определить реактивную мощность катушки, записать выражения для мгновенных значений напряжения u , тока i , мгновенной мощности p , если начальная фаза напряжения $\psi_u = \pi/2$.

Задача 5.3. В сеть переменного тока при напряжении $U = 220$ В и частоте $f = 50$ Гц включен конденсатор с емкостью $C = 20$ мкФ. Определить его реактивное сопротивление X_C , ток I , реактивную мощность Q_C ,

6. Однофазные синусоидальные электрические цепи с параллельным соединением элементов цепи

При параллельном соединении параллельные ветви электрической цепи (рис. 10) находятся под одним и тем же напряжением $U = U_{12}$, поэтому для каждой из этих ветвей определение всех расчетных величин производится по формулам, справедливым для отдельных сопротивлений электрических цепей с последовательным соединением сопротивлений. Для участка цепи с параллельным соединением сопротивлений ток на разветвленном участке

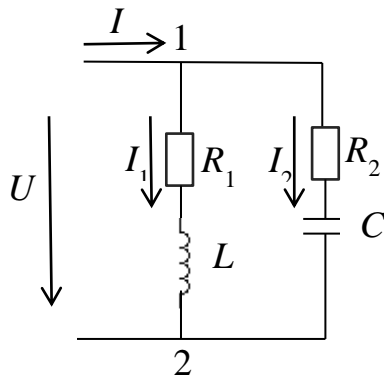


Рис. 10. Параллельное соединение (к зад. 6.1)

определяется в соответствии с первым законом Кирхгофа, записанным для узла разветвления в векторной форме

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2.$$

Этот ток можно определить графически с помощью векторной диаграммы как сумму составляющих векторов тока, с помощью комплексных чисел или способом составляющих токов. При использовании способа составляющих токов, определяются активные и реактивные составляющие токов в ветвях

$$I_a = I \cos \varphi = IR/Z,$$

$$I_p = I \sin \varphi = IX/Z,$$

где φ – угол сдвига фаз между током и напряжением в одной и той же ветви; R – активное сопротивление ветви; X – реактивное сопротивление ветви; Z – полное сопротивление ветви.

Действующее значение тока в неразветвленной части цепи определяется как геометрическая сумма активных и реактивных составляющих токов в ветвях

$$I = \sqrt{(\sum I_a)^2 + (\sum I_p)^2}.$$

Сумма $\sum I_p$ определяется с учетом вида реактивных составляющих токов в ветвях: только индуктивные или только емкостные составляющие тока сум-

мируются, индуктивные и емкостные реактивные составляющие токов в ветвях вычитаются.

Векторная диаграмма при параллельном соединении строится, начиная с вектора общего напряжения на параллельном участке U_{12} , к которому пристраиваются активные и реактивные составляющие токов в ветвях. При этом надо помнить, что активные составляющие токов совпадают по фазе с напряжением, реактивные индуктивные составляющие токов отстают от напряжения на угол $\pi/2$, а реактивные емкостные составляющие токов опережают напряжение на тот же угол.

Примеры решения задач

Задача 6.1. Цепь, показанная на рис. 10, присоединена к сети переменного напряжения $U = 175$ В и частотой $f = 50$ Гц. Сопротивления $R_1 = R_2 = 16$ Ом, индуктивность катушки $L = 0,255$ Г, емкость конденсатора $C = 531$ мкФ. Определить токи в ветвях и в неразветвленной части, найти сдвиги фаз между напряжением и током в обеих ветвях и для всей цепи, определить активную, реактивную и полную мощность цепи. Построить векторную диаграмму.

Решение.

1. Вычисляем индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,255 = 80 \text{ (Ом);}$$

2. Находим полное сопротивление первой ветви

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} = \sqrt{16^2 + 80^2} = 81,6 \text{ (Ом);}$$

3. Определяем ток в первой ветви

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{175}{81,6} = 2,2 \text{ (А);}$$

4. Угол сдвига фаз между током и напряжением в первой ветви

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_L}{R_1} = \arctg \frac{80}{16} = 78,7^\circ;$$

5. Активная и реактивная составляющие тока I_1

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = 2,2 \cdot \cos 78,7^\circ = 0,43 \text{ (А)}$$

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 = 2,2 \cdot \sin 78,7^\circ = 2,16 \text{ (А);}$$

6. Определяем емкостное сопротивление конденсатора

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 531} = 6 \text{ (Ом);}$$

7. Находим полное сопротивление второй ветви

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_C^2} = \sqrt{16^2 + 6^2} = 17,1 \text{ (Ом);}$$

8. Определяем ток во второй ветви

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{175}{17,1} = 10,2 \text{ (A)}$$

9. Угол сдвига фаз между током и напряжением во второй ветви

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_C}{R_2} = \arctg \frac{6}{16} = 20,56^\circ$$

10. Активная и реактивная составляющие тока I_2

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = 10,2 \cos 20,56^\circ = 9,55 \text{ (A)},$$

$$I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = 10,2 \sin 20,56^\circ = 3,58 \text{ (A)};$$

11. Ток в неразветвленной части цепи

$$I = \sqrt{(I_{1a} + I_{2a})^2 + (I_{1p} - I_{2p})^2} = \\ = \sqrt{(0,43 + 9,55)^2 + (2,16 - 3,58)^2} = 10,1 \text{ (A)};$$

12. Угол сдвига фаз между током и напряжением в неразветвленной части цепи

$$\varphi = \arctg \frac{I_p}{I_a} = \arctg \frac{1,42}{9,98} = 8,08^\circ;$$

13. Определяем полную, активную и реактивную мощность цепи

$$S = UI = 175 \cdot 10,1 = 1767,5 \text{ (В} \cdot \text{А)},$$

$$P = S \cos \varphi = 1767,5 \cdot \cos 8,08^\circ = 1750 \text{ (Вт)},$$

$$Q = S \sin \varphi = 1767,5 \cdot \sin 8,08^\circ = 248,4 \text{ (вар)}.$$

14. Строим векторную диаграмму токов и напряжений

$$m_U = 20 \text{ В/см}$$

$$m_I = 1 \text{ А/см}$$

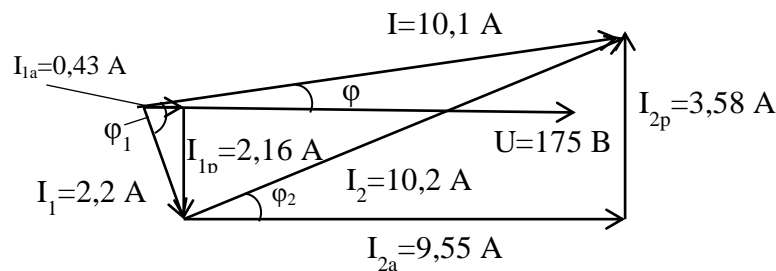


Рис. 11. Векторная диаграмма к зад. 6.1.

Задача 6.2. В сеть переменного тока параллельно катушке индуктивности включены конденсатор и резистор R_1 , соединенные между собой последовательно (рис. 12). Определить токи в ветвях, общий ток в цепи и углы сдвига фаз между напряжением и током в ветвях и в неразветвленной части, если напряжение источника питания $\underline{U} = U = 200 \text{ В}$, а активные и реактивные сопротивления: $R_1 = 3 \text{ Ом}$; $R_2 = 8 \text{ Ом}$; $X_1 = 4 \text{ Ом}$; $X_2 = 6 \text{ Ом}$.

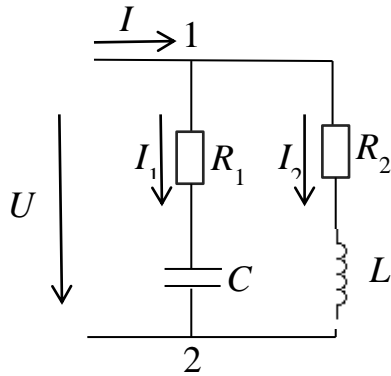


Рис. 12. Схема к зад. 6.1

Решение.

Решим задачу методом комплексных чисел.

1. Определяем комплексные сопротивления ветвей

$$\underline{Z}_1 = R_1 - jX_1 = (3 - j4) \text{ (Ом);}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 = (8 + j6) \text{ (Ом).}$$

2. Проводимости параллельных ветвей

$$\underline{Y}_1 = 1/\underline{Z}_1 = \frac{1}{(3-j4)} = \frac{3+j4}{(3-j4)(3+j4)} =$$

$$= (0,12 + j0,16) \text{ (См);}$$

$$\underline{Y}_2 = 1/\underline{Z}_2 = \frac{1}{8+j6} = \frac{8-j6}{(8+j6)(8-j6)} =$$

$$= (0,08 - j0,06) \text{ (См).}$$

3. Проводимость всей цепи

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = 0,12 + j0,16 + 0,08 - j0,06 = (0,2 + j0,1) \text{ (См).}$$

3. Комплексный ток в неразветвленной части цепи

$$\underline{I} = \underline{U}\underline{Y} = 200(0,2 + j0,1) = (40 + j20) \text{ (А).}$$

Действующее значение тока в цепи

$$I = \sqrt{40^2 + 20^2} = 44,7 \text{ (А).}$$

4. Угол сдвига между общим током и напряжением

$$\operatorname{tg}\varphi = B/G = 0,1/0,2 = 0,5; \varphi = 26^\circ 33',$$

где B – реактивная проводимость цепи; G – активная проводимость цепи.

5. Комплексный ток в ветви конденсатора

$$\underline{I}_1 = \underline{U}\underline{Y}_1 = 200(0,12 + j0,16) = (24 + j32) \text{ (А)}$$

Ток ветви конденсатора

$$I = \sqrt{24^2 + 32^2} = 40 \text{ А.}$$

6. Угол сдвига между напряжением и током в ветви с конденсатором

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = B_1/G_1 = 0,16/0,12 = 1,33; \varphi_1 = 53^\circ 05'$$

7. Комплексный ток в цепи катушки индуктивности

$$\underline{I}_2 = \underline{U}\underline{Y}_2 = 200(0,08 - j0,06) = (16 - j12) \text{ (А).}$$

Ток в ветви катушки

$$I = \sqrt{16^2 + 12^2} = 20 \text{ (А).}$$

8. Угол сдвига между напряжением и током в ветви катушки

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = B_2/G_2 = 0,06/0,08 = 0,75; \varphi_2 = 36^\circ 55'.$$

7. Однофазные синусоидальные электрические цепи со смешанным соединением элементов цепи

При смешанном соединении сопротивлений (рис. 13) электрическую цепь при расчете приводят к следующему виду (рис. 14). Полное сопротивление \underline{Z}_{12} параллельного участка цепи 1-2 может быть определено через полную проводимость $\underline{Z}_{12} = 1/\underline{Y}_{12}$. При этом расчет электрической цепи со сме-

шанным соединением сопротивлений приводится к расчету электрической цепи с последовательным соединением элементов.

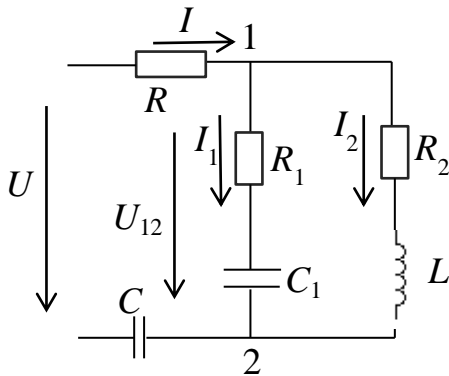


Рис. 13. Схема к зад. 7.1

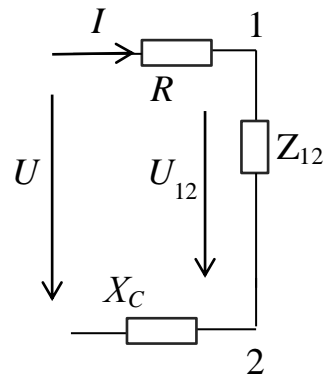


Рис. 14. Схема приведенной цепи

Примеры решения задач

Задача 7.1. Для электрической цепи, показанной на схеме (рис. 13) определить токи и сдвиг фаз между током и напряжением в ветвях и в неразветвленной части цепи при следующих данных: $U = 220$ В, $R = 10$ Ом, $R_1 = 3$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, $X_C = 5$ Ом, $X_{C1} = 4$ Ом, $X_L = 8$ Ом.

Решение

Решим задачу методом проводимостей.

1. Определяем активную и реактивную проводимости 1-й ветви

$$G_1 = \frac{R_1}{Z_1^2} = \frac{3}{25} = 0,12 \text{ (См)};$$

$$B_{C_1} = \frac{X_{C_1}}{Z_1^2} = \frac{4}{25} = 0,16 \text{ (См)},$$

где $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{C_1}^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$ (Ом) – полное сопротивление 1-й ветви.

2. Определяем активную и реактивную проводимости 2-й ветви

$$G_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{6}{100} = 0,06 \text{ (См)};$$

$$B_L = \frac{X_L}{Z_2^2} = \frac{8}{100} = 0,08 \text{ (См)},$$

где $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_L^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10$ (Ом) – полное сопротивление 2-й ветви.

3. Определяем эквивалентную проводимость участка 1-2

$$Y_{1-2} = \sqrt{(\sum G)^2 + (\sum B)^2} = \sqrt{0,18^2 + (-0,08)^2} = 0,20 \text{ (См)},$$

где $\sum G = G_1 + G_2 = 0,12 + 0,06 = 0,18$ (См) – активная проводимость участка 1-2; $\sum B = B_L - B_{C_1} = 0,08 - 0,16 = -0,08$ (См) – реактивная проводимость участка 1-2.

4. Определяем эквивалентное сопротивление участка 1-2

$$Z_{1-2} = \frac{1}{Y_{1-2}} = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ (Ом)},$$

активное и реактивное сопротивления участка 1-2

$$R_{1-2} = \sum G \cdot Z_{1-2}^2 = 0,18 \cdot 5^2 = 4,5 \text{ (Ом)},$$

$$X_{1-2} = \sum B \cdot Z_{1-2}^2 = 0,08 \cdot 5^2 = 2,0 \text{ (Ом)}.$$

5. Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{(R + R_{1-2})^2 + (X_{1-2} \pm X_C)^2} = \sqrt{(10 + 4,5)^2 + (2 + 5)^2} = \\ = 16,1 \text{ (Ом)}.$$

Сопротивление X_C берем со знаком «+», т.к. реактивное сопротивление X_{1-2} имеет емкостной характер.

6. Ток в неразветвленной части цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{16,1} = 13,7 \text{ (А)}.$$

7. Напряжения на участках цепи

$$U_R = IR = 13,7 \cdot 10 = 137 \text{ (В)}, \\ U_{1-2} = IZ_{1-2} = 13,7 \cdot 5 = 68,5 \text{ (В)}, \\ U_C = IX_C = 13,7 \cdot 5 = 68,5 \text{ (В)}.$$

8. Токи в ветвях

$$I_1 = \frac{U_{1-2}}{Z_1} = \frac{68,5}{5} = 13,7 \text{ (А)}, \\ I_2 = \frac{U_{1-2}}{Z_2} = \frac{68,5}{10} = 6,85 \text{ (А)}.$$

9. Углы сдвига фаз между током и напряжением

- в первой ветви

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = B_{C1}/G_1 = 0,16/0,12 = 1,33; \varphi_1 = 53^\circ 05';$$

- во второй ветви

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = B_L/G_2 = 0,08/0,06 = 1,33; \varphi_2 = 53^\circ 05';$$

- во всей цепи

$$\operatorname{tg} \varphi = \Sigma X/\Sigma R = 7/14,5 = 0,48; \varphi = 25^\circ 36',$$

где $\Sigma X = X_{1-2} + X_C = 2 + 5 = 7 \text{ (Ом)}$; $\Sigma R = R + R_{1-2} = 10 + 4,5 = 14,5 \text{ (Ом)}$.

Задача 7.2. Определить токи и углы сдвига фаз между током и напряжением в ветвях и в неразветвленной части цепи для схемы, показанной на рис. 15 при

следующих данных: $U = 220 \text{ В}$, $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 16,6 \text{ Ом}$, $R_3 = 6 \text{ Ом}$, $X_{C1} = 12,5 \text{ Ом}$, $X_{C2} = 2 \text{ Ом}$, $X_{C3} = 8 \text{ Ом}$.

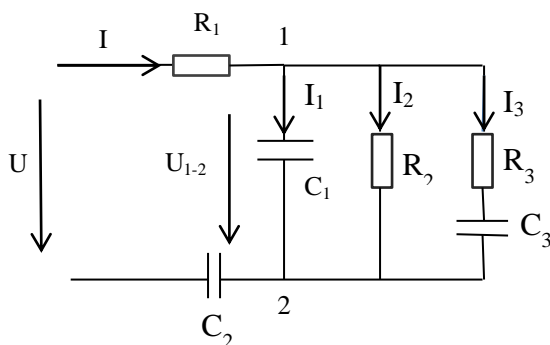


Рис.15. Схема к зад. 7.2

Решение.

Используем метод проводимостей

1. Активная проводимость 1-й ветви $G_1 = 0$

Реактивная проводимость 1-й ветви $B_{C_1} = \frac{1}{X_{C_1}} = \frac{1}{12,5} = 0,08$ (См).

2. Активная и реактивная проводимости 2-й ветви

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{16,6} = 0,06 \text{ (См)}; B_2 = 0$$

3. Активная и реактивная проводимости 3-й ветви

$$G_3 = \frac{R_3}{Z_3^2} = \frac{R_3}{R_3^2 + X_{C_3}^2} = \frac{6}{6^2 + 8^2} = 0,06 = 0,06 \text{ (См)};$$

$$B_3 = \frac{X_{C_3}}{Z_3^2} = \frac{8}{6^2 + 8^2} = 0,08 \text{ (См)}.$$

4. Полная проводимость участка 1-2

$$Y_{1-2} = \sqrt{(\sum G)^2 + (\sum B)^2} = \sqrt{(G_2 + G_3)^2 + (B_{C_1} + B_{C_3})^2} = \\ = \sqrt{(0,06 + 0,06)^2 + (0,08 + 0,08)^2} = 0,20 \text{ (См)}.$$

5. Полное сопротивление участка 1-2

$$Z_{1-2} = \frac{1}{Y_{1-2}} = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ (Ом)}$$

6. Активное и реактивное сопротивления участка 1-2

$$R_{1-2} = \sum G \cdot Z_{1-2}^2 = 0,12 \cdot 5^2 = 3,0 \text{ (Ом)},$$

$$X_{1-2} = \sum B \cdot Z_{1-2}^2 = 0,16 \cdot 5^2 = 4,0 \text{ (Ом)}.$$

7. Полное сопротивление всей цепи

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_{1-2})^2 + (X_{1-2} + X_{C_2})^2} = \sqrt{(5 + 3)^2 + (4 + 2)^2} = \\ = 10 \text{ (Ом)}.$$

8. Ток в неразветвленной части цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ (А)}.$$

9. Напряжения в цепи

- на резисторе R_1 : $U_{R_1} = IR_1 = 22 \cdot 5 = 110$ (В);

- на параллельном участке 1-2: $U_{1-2} = IZ_{1-2} = 22 \cdot 5 = 110$ (В)

- на конденсаторе X_{C_2} : $U_{C_2} = IX_{C_2} = 22 \cdot 2 = 44$ (В).

10. Токи в ветвях

$$I_1 = \frac{U_{1-2}}{X_{C_1}} = \frac{110}{12,5} = 8,8 \text{ (А)};$$

$$I_2 = \frac{U_{1-2}}{R_2} = \frac{110}{16,6} = 6,64 \text{ (А)};$$

$$I_3 = \frac{U_{1-2}}{Z_3} = \frac{U_{1-2}}{\sqrt{R_3^2 + X_{C_3}^2}} = \frac{110}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 11 \text{ (А)}.$$

11. Углы между током и напряжением

- в 1-й ветви $tg\varphi_1 = B_{C_1}/G_1 = 0,08/0 = \infty$; $\varphi_1 = 90^\circ$;

- во второй ветви $tg\varphi_2 = B_2/G_2 = 0/0,06 = 0$; $\varphi_2 = 0$;

- в третьей ветви $tg\varphi_3 = B_3/G_3 = 0,08/0,06 = 1,33$; $\varphi_3 = 53^\circ 05'$;

- в неразветвленной части $tg\varphi = \sum X/\sum R = (X_{1-2} + X_{C_2})/(R_1 + R_{1-2}) = \\ = 6/8 = 0,75$; $\varphi = 36^\circ 54'$.

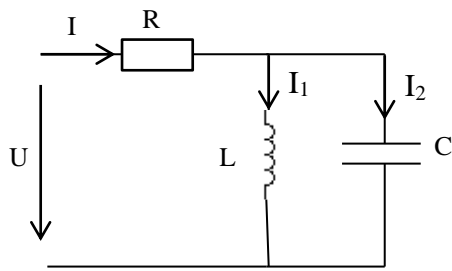


Рис. 16. Схема к зад. 7.3

Задача 7.3. Для электрической цепи, показанной на схеме (рис. 16) определить токи и сдвиг фаз между током и напряжением в ветвях и в неразветвленной части цепи при следующих данных: $U = 127$ В, $R = 20$ Ом, $L = 0,1$ Гн, $C = 150$ мкФ, частота тока $f = 50$ Гц.

8. Трехфазные электрические цепи переменного тока

Трехфазная система питания электрических цепей представляет собой совокупность трех синусоидальных ЭДС или напряжений, одинаковых по частоте и амплитудному значению, сдвинутых по фазе относительно друг друга на угол $2\pi/3$ (т.е. 120°) и генерируемых в одном источнике ЭДС.

В качестве трехфазного источника электрической энергии в основном используются трехфазные синхронные генераторы, преобразующие механическую энергию в электрическую.

К трехфазным потребителям электрической энергии относятся трехфазные синхронные и асинхронные двигатели, трансформаторы, электрические печи, приборы электрического освещения и др.

Существуют различные способы соединения фаз трехфазных источников питания и трехфазных потребителей электроэнергии. Наиболее распространенными являются соединения «звезда» и «треугольник». При этом способы соединения фаз источников и фаз потребителей в трехфазные системы могут быть различными. Фазы источников обычно соединены «звездой», фазы потребителей – «звездой» или «треугольником».

При соединении фаз трехфазного источника питания или потребителя электроэнергии «звездой» концы фаз объединяются в общую нейтральную точку N (или n), а начала фаз подключаются к линейным проводам. При этом могут использоваться трехпроводные или четырехпроводные электрические цепи. В трехфазных четырехпроводных цепях кроме линейных проводов, соединяющих начала фаз источника и потребителя, имеется также нейтральный провод, соединяющий нейтральную точку N источника с нейтральной точкой потребителя n .

Трехфазная четырехпроводная система позволяет получать два различных напряжения. Напряжения между линейным проводом и нейтральным проводом (между началом и концом фазы) называются *фазными* напряжениями, напряжения между соседними линейными проводами (между началами фаз) называются *линейными* напряжениями.

При смешанной силовой и осветительной нагрузках силовые низковольтные потребители питаются линейными напряжениями $U_n = 660; 380; 220$ В. Для осветительной нагрузки используются фазные напряжения $U_\phi = 220; 127$ В.

На схеме рис. 17 показаны условные положительные направления фазных и линейных напряжений. Линейные токи I_L в питающих линиях (I_A , I_B , I_C) при соединении «звездой» одновременно являются и фазными токами, протекающими по фазам потребителя I_ϕ . При наличии симметричной трехфазной системы в случае соединения фаз потребителя звездой $I_\phi = I_L$.

Система называется симметричной, если комплексные сопротивления фаз одинаковы

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\phi.$$

Трехфазные источники питания всегда выполняются симметричными. В этом случае действующие значения фазных напряжений оказываются равными $U_A = U_B = U_C = U_\phi$ и сдвинутыми относительно друг друга на угол $2\pi/3$.

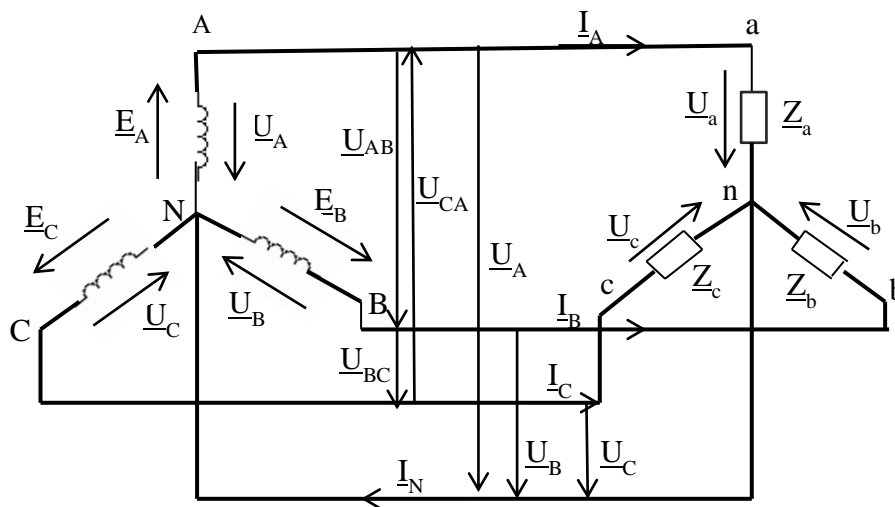


Рис. 17. Соединение «звездой» с нейтральным проводом

Трехфазные потребители электроэнергии могут быть симметричными и несимметричными.

В общем случае соотношения между комплексными линейными и фазными напряжениями трехфазных источников, а также приемников при соединении их фаз «звездой» имеют вид

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

Для симметричных потребителей фазные напряжения оказываются равными между собой, также равны между собой и линейные напряжения

$$U_a = U_b = U_c = U_\phi; \quad U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L.$$

Соотношение между фазными и линейными напряжениями при симметричной нагрузке определяется выражением

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi.$$

Для несимметричных трехфазных потребителей не все эти соотношения выполняются.

При соединении фаз потребителя «звездой» и симметричной нагрузке комплексные фазные токи определяют по закону Ома для участка цепи

$$\underline{I}_A = \underline{U}_a / \underline{Z}_a; \quad \underline{I}_B = \underline{U}_b / \underline{Z}_b; \quad \underline{I}_C = \underline{U}_c / \underline{Z}_c$$

Так как фазные напряжения и полные сопротивления всех фаз потребителей при симметричной нагрузке равны, фазные и линейные токи также будут равны

$$I_A = I_B = I_C = I_\phi = I_L.$$

При несимметричной нагрузке потребителя ($\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$) происходит смещение нейтральной точки n потребителя относительно нейтральной точки N источника, что приводит к перекосу фазных напряжений потребителя. В результате на одних фазах потребителя напряжение будет больше, чем на других, что во многих случаях недопустимо. Поэтому в цепи нейтрального провода недопустимо наличие различного рода предохранителей и выключателей.

Активная P , реактивная Q и полная S мощности потребителя электроэнергии при симметричной нагрузке ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi$) и соединении фаз «звездой» определяются как сумма соответствующих фазных мощностей

$$P = P_a + P_b + P_c = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi_\phi = 3R_\phi I_\phi^2 = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi_\phi;$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin\varphi_\phi = 3X_\phi I_\phi^2 = \sqrt{3}U_L I_L \sin\varphi_\phi;$$

$$S = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi = 3Z_\phi I_\phi^2 = \sqrt{3}U_L I_L = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

где $\cos\varphi = \frac{R_\phi}{Z_\phi}$; $\sin\varphi = \frac{X_\phi}{Z_\phi}$.

В приведенных формулах перед реактивным индуктивным сопротивлением ставится знак «+» ($+X_{\phi L}$), а перед емкостным сопротивлением ставится знак «-» ($-X_{\phi C}$). В комплексной форме записи полная мощность трехфазной цепи $\underline{S} = P \pm jQ$.

При соединении «треугольником» начало первой фазы соединяется с концом второй фазы, начало которой соединено с концом третьей фазы, а начало третьей – с концом первой, при этом начала всех фаз подключаются к соответствующим линейным проводам.

При соединении «треугольником», как видно из схемы рис. 18 фазные напряжения оказываются равными линейным напряжениям $U_\phi = U_L$. При симметричной системе питания $U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_\phi = U_L$.

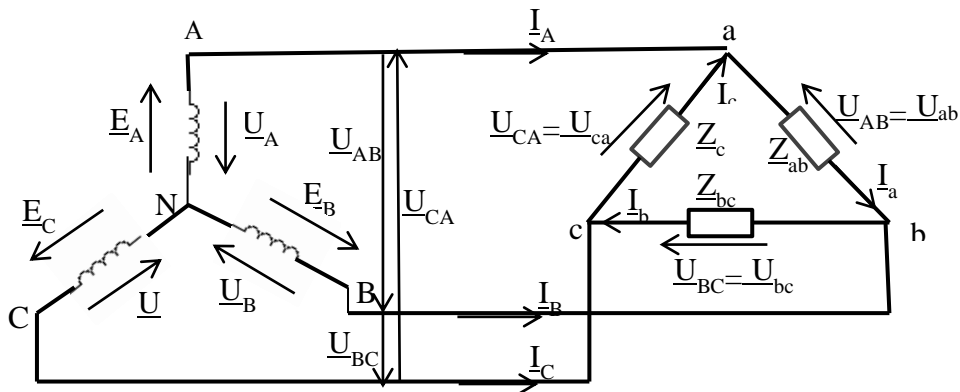


Рис. 18. Схема соединения «треугольником»

Соотношения между линейными и фазными токами при соединении потребителя «треугольником» и симметричной нагрузке определяются из уравнений

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

При симметричной нагрузке линейные токи $I_A = I_B = I_C$ и фазные токи $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$. При этом угол сдвига фаз между фазными токами и напряжениями $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca}$ и соответственно равны коэффициенты мощности $\cos\varphi_{ab} = \cos\varphi_{bc} = \cos\varphi_{ca}$. Соотношение между линейными и фазными токами симметричного трехфазного потребителя при соединении фаз треугольником

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi.$$

При симметричной системе питания и симметричном потребителе с соединением фаз «треугольником» активную P , реактивную Q и полную S мощности определяют по тем же зависимостям, что и при соединении его фаз «звездой».

Примеры решения задач

Задача 8.1. В трехфазную сеть с линейным напряжением $U_L = 380$ В включена трехфазная симметричная нагрузка, сначала по схеме звезда, а затем по схеме «треугольник». В каждой фазе последовательно соединены активное сопротивление $R = 32$ Ом, реактивное сопротивление $X_L = 25$ Ом и емкостное сопротивление $X_C = 10$ Ом. Для каждого соединения определить линейные и фазные токи, коэффициент мощности, активную, реактивную и полную мощность. Построить векторные диаграммы напряжений и токов.

Решение.

Расчет трехфазной цепи при соединении «звезда»

1. Определяем фазное напряжение

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ (В)};$$

2. Полное сопротивление фазы

$$Z_\phi = \sqrt{R_\phi^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{32^2 + (25 - 10)^2} = 35,3 \text{ (Ом)};$$

3. Фазные и линейные токи

$$I_L = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi} = \frac{220}{35,3} = 6,2 \text{ (А)};$$

4. Коэффициент мощности цепи

$$\cos\varphi = \frac{R_\phi}{Z_\phi} = \frac{32}{35,3} = 0,91;$$

5. Угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\varphi = \arccos 0,91 = 24,5^\circ;$$

6. Определяем активную, реактивную и полную мощность цепи

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 6,2 \cdot 0,91 = 3723,7 \text{ (Вт)},$$

$$Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 6,2 \cdot \sin 24,5^{\circ} = 1697 \text{ (вар)},$$

$$S = 3U_{\phi} I_{\phi} = 3 \cdot 220 \cdot 6,2 = 4092 \text{ (В} \cdot \text{А)}.$$

7. Строим векторную диаграмму токов и напряжений

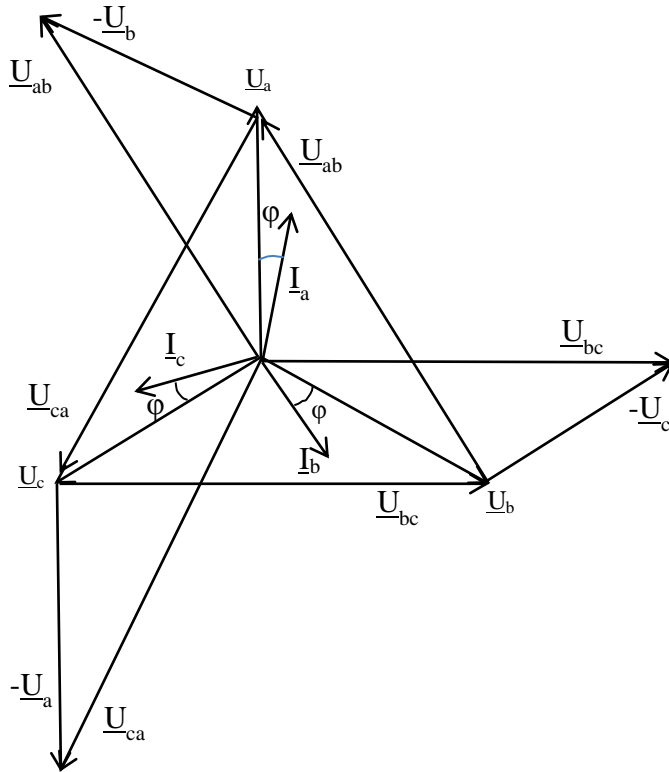


Рис. 19. Векторная диаграмма токов и напряжений при соединении «звезда»

Расчет трехфазной цепи при соединении «треугольник»

1. Фазное напряжение

$$U_{\phi} = U_{л} = 380 \text{ (В)};$$

2. Полное сопротивление фазы

$$Z_{\phi} = \sqrt{R_{\phi}^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{32^2 + (25 - 10)^2} = 35,3 \text{ (Ом)};$$

3. Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{380}{35,3} = 10,8 \text{ (А)};$$

4. Линейный ток

$$I_{л} = \sqrt{3} I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 10,8 = 18,7 \text{ (А)};$$

5. Коэффициент мощности цепи

$$\cos \varphi = \frac{R_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{32}{35,3} = 0,91;$$

6. Определяем активную, реактивную и полную мощность цепи

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 380 \cdot 10,8 \cdot 0,91 = 11204 \text{ (Вт)},$$

$$Q = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 380 \cdot 10,8 \cdot \sin 24,5^{\circ} = 5106 \text{ (вар)},$$

$$S = 3U_{\phi}I_{\phi} = 3 \cdot 380 \cdot 10,8 = 12312 \text{ (В} \cdot \text{А)}.$$

8. Строим векторную диаграмму токов и напряжений

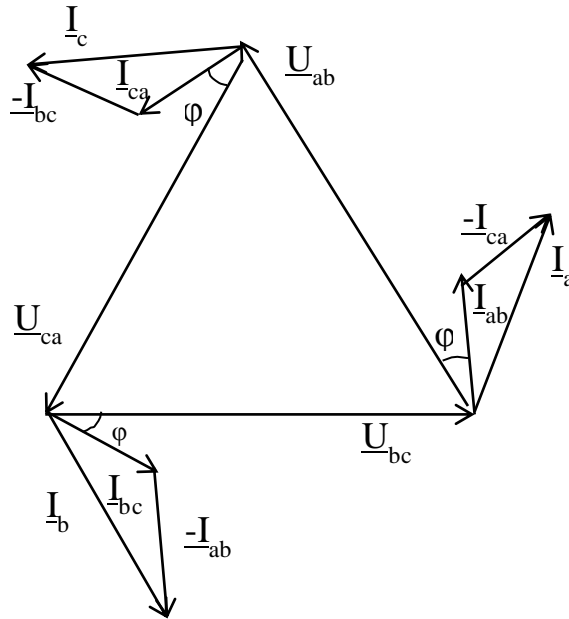


Рис. 19. Векторная диаграмма токов и напряжений при соединении «треугольник»

Задача 8.2. К трехфазной сети с линейным напряжением $U_{л} = 220 \text{ В}$ подключена осветительная нагрузка из 90 ламп мощностью 60 Вт каждая. Нагрузка распределена равномерно по фазам, соединенным «звездой». Определить токи в линейных проводах. Определить токи в линии, если нагрузка соединена «треугольником» и используются лампы, рассчитанные на линейное напряжение сети.

Решение.

При соединении потребителей звездой фазное напряжение на каждом потребителе

$$U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{1,73} = 127 \text{ (В)}.$$

В каждую фазу включено параллельно 30 ламп, рассчитанных на напряжение 127 В, мощностью $P = 60 \text{ Вт}$ каждая.

Ток каждой фазы, а следовательно и ток в линейных проводах

$$I_{\phi} = I_{л} = \frac{30P}{U_{\phi}} = \frac{30 \cdot 60}{127} = 14,17 \text{ (A)}.$$

При соединении нагрузки «треугольником» на каждой фазе будет линейное напряжение $U_{\phi} = U_{л} = 220 \text{ В}$, на которое и должны быть рассчитаны лампы.

Тогда ток в каждой фазе потребителя

$$I_{\phi} = \frac{30P}{U_{\phi}} = \frac{30 \cdot 60}{220} = 8,18 \text{ (A)}.$$

Ток в каждом линейном проводе

$$I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi} = 1,73 \cdot 8,18 = 14,15 \text{ (A)}.$$

Таким образом, при неизменной потребляемой лампами мощности при соединении нагрузки «треугольником» изменяется только фазный ток.

Задача 8.3. В трехфазную трехпроводную питающую сеть с линейным симметричным напряжением $U_{л} = 380 \text{ В}$ включена активная симметричная нагрузка с сопротивлением фаз $R_1 = 10 \text{ Ом}$ и соединением фаз звездой, а также трехфазный симметричный потребитель с активным и реактивным индуктивным сопротивлением фаз $R_2 = 3 \text{ Ом}$ и $X_L = 4 \text{ Ом}$ (рис. 20). Определить линейные токи и коэффициент мощности электрической цепи.

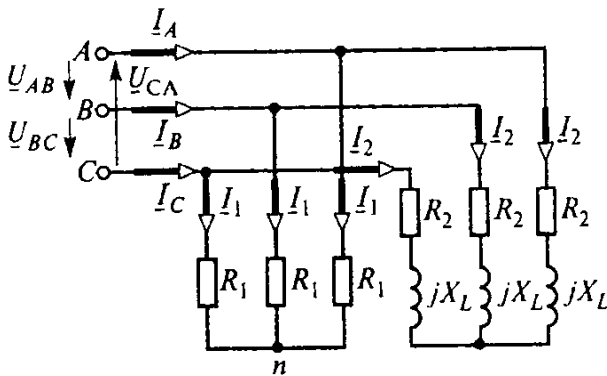


Рис. 20. Схема к зад. 8.3

Решение.

Фазное напряжение

$$U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ (В)}.$$

Ток в цепи активной нагрузки

$$I_1 = \frac{U_{\phi}}{R_1} = \frac{220}{10} = 22 \text{ (A)}$$

Фазный ток трехфазного потребителя, содержащего индуктивное сопротивление,

$$I_2 = \frac{U_{\phi}}{Z} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{R_2^2 + X_L^2}} = \frac{220}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = 44 \text{ (A)}.$$

Составляющие фазных токов потребителей:

$$\text{активная } I_1 = 22 \text{ A}; \quad I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{I_2 R_2}{Z} = 44 \cdot \frac{3}{5} = 26,4 \text{ (A)};$$

$$\text{реактивная } I_{1p} = 0; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = \frac{I_2 X_L}{Z} = 44 \cdot \frac{4}{5} = 35,2 \text{ (A)}.$$

Составляющие токов в линейном проводе:

$$\text{активная } I_a = I_{1a} + I_{2a} = 22 + 26,4 = 48,4 \text{ (A)};$$

$$\text{реактивная } I_p = I_{1p} + I_{2p} = 0 + 35,2 = 35,2 \text{ (A)}$$

$$\text{Линейные токи } I_A = I_B = I_C = I_{л} = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{48,4^2 + 35,2^2} = 59,5 \text{ (A)}$$

Коэффициент мощности всей цепи

$$\cos\varphi = \frac{I_a}{I_L} = \frac{48,4}{59,5} = 0,815.$$

Задача 8.4. К соединенному «звездой» генератору с фазным напряжением 127 В подключен потребитель, соединенный «треугольником», активное сопротивление каждой фазы потребителя $R = 8$ Ом, индуктивное $X_L = 6$ Ом. Определить ток в каждой фазе генератора, отдаваемую им мощность и построить векторную диаграмму.

Задача 8.5. Три группы осветительных ламп мощностью $P = 100$ Вт каждая с номинальным напряжением $U_{ном} = 220$ В соединены по схеме «звезда» с нейтральным проводом. При этом в фазе А включено параллельно $n_1 = 6$ ламп, в фазе В – $n_2 = 4$ лампы, в фазе С – $n_3 = 2$ лампы. Линейное симметричное напряжение источника питания $U_L = 380$ В. Определить фазные сопротивления и фазные токи потребителя электроэнергии.

9. Электрические измерения

Электрические измерительные приборы – необходимые элементы электрических цепей при контроле режимов работы электрооборудования, учете электроэнергии, при экспериментальном исследовании электрических цепей, при получении достоверной информации для систем автоматического управления.

В зависимости от принципа действия различают следующие системы электроизмерительных приборов: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, тепловую, индукционную и др.

Основные характеристики электрических измерительных приборов:

Статическая характеристика.

Статическая характеристика измерительного прибора – зависимость выходного сигнала y от входного сигнала x в статическом режиме работы указанного прибора.

Статическая характеристика в общем случае описывается нелинейным уравнением

$$y=f(x).$$

Так, например, для электронных измерительных приборов магнитоэлектрической системы статической характеристикой будет являться уравнение, в котором входным сигналом будет являться электрический ток I , а выходным – угол поворота катушки α

$$\alpha = S I,$$

где S - чувствительность измерительного механизма.

Поскольку $S = \text{const}$, то статическая характеристика электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы линейная.

Погрешность.

Абсолютная погрешность прибора в данной точке диапазона измерения равна

$$\Delta = x - x_u$$

где x – показание прибора; x_u – истинное значение измеряемой величины.

Однако в связи с тем, что истинное значение чаще всего неизвестно, на практике вместо него используется действительное значение, в качестве которого применяют либо среднее арифметическое значение ряда измерений, либо показания образцового прибора.

Абсолютная погрешность прибора выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Абсолютная погрешность прибора не характеризует в полной мере точность измерения, поэтому при измерениях определяется также относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности к истинному (действительному) значению измеряемой величины

$$\delta = \frac{\Delta}{x_u} = \frac{\Delta}{x_o}$$

или в процентах

$$\delta(\%) = \frac{\Delta}{x_o} 100\% .$$

Погрешность электроизмерительного прибора зависит от условий проведения измерений. Различают основную и дополнительную погрешности.

Основная погрешность – это погрешность, существующая при нормальных условиях, которые указаны в нормативных документах, регламентирующих правила испытания и эксплуатации электроизмерительных приборов.

Дополнительная погрешность возникает при отклонении условий испытания и эксплуатации прибора от нормальных.

Класс точности.

Класс точности электронных измерительных приборов – обобщенная метрологическая характеристика, определяемая пределами допустимых основной и дополнительной погрешностей.

Класс точности K стрелочных и самопишущих приборов, как правило, обозначается одним числом, равным максимально допустимому значению основной приведенной погрешности, выраженной в процентах.

Электронные измерительные приборы делятся на 8 классов точности: 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0.

Вариация.

Вариация показаний электроизмерительного прибора – это наибольшая разность его показаний при одном и том же значении измеряемой величины.

Основной причиной вариации является трение в опорах подвижной части прибора.

Вариацию определяют, сравнивая показания электроизмерительного прибора, считанные один раз после установки требуемого значения измеряемой величины подходом снизу (со стороны меньших значений), а другой раз – подходом сверху (со стороны больших значений).

Цена деления.

Цена деления электроизмерительных приборов численно равна изменению измеряемой величины, вызывающему перемещение указателя (стрелки) на одно деление. При равномерной шкале цена деления равна отношению предела измерения электроизмерительного прибора x_m к числу делений шкалы n :

$$c = \frac{x_m}{n}.$$

Предел измерения.

Предел измерения электроизмерительного прибора – значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы. Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерения (многопредельные приборы). При измерениях такими приборами на различных пределах цена деления будет различна.

Чувствительность.

Чувствительность S электроизмерительного прибора – это отношение изменения сигнала на выходе электроизмерительного прибора Δy к вызвавшему его изменению измеряемой величины Δx :

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

В общем случае чувствительность

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

Следовательно, при нелинейной статической характеристике чувствительность зависит от x , а при линейной статической характеристике – чувствительность постоянна. У электроизмерительных приборов при постоянной чувствительности шкала равномерная, то есть длина всех делений одинакова.

Примеры решения задач

Задача 9.1. Для измерения напряжения в электрической цепи используется вольтметр класса точности 1,0 с пределом измерения $U_{\text{ном}} = 300$ В. Показание вольтметра $U_{\text{и}} = 200$ В. Определить абсолютную $\Delta U_{\text{абс}}$, относительную $\delta_{\text{отн}}$ погрешности измерения и действительную величину измеренного напряжения.

Решение.

Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, для определения абсолютной погрешности измерения используем класс точности прибора

$$\Delta U_{\text{абс}} = \gamma_{\text{пр}} U_{\text{ном.}}/100\% = 1 \cdot 300/100 = 3 \text{ (В)},$$

где $\gamma_{\text{пр}}$ – приведенная погрешность прибора, равная его классу точности ($\gamma_{\text{пр}} = 1\%$).

Относительная погрешность

$$\delta_{\text{отн}} = \gamma_{\text{пр}} U_{\text{ном.}}/ U_{\text{и}} = 1 \cdot 300/200 = 1,5 \text{ (\%)}.$$

Следовательно, измеренное значение напряжения $U_{\text{и}} = 200 \text{ В}$ может отличаться от его действительного значения не более чем на 1,5%.

Задача 9.2. Предельное значение тока, измеряемого миллиамперметром, $I_{\text{ном}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ при сопротивлении $R_{\text{а}} = 5 \text{ Ом}$. Определить сопротивление $R_{\text{ш}}$ шунта, используемого для расширения предела измерения тока до $I = 15 \text{ А}$.

Решение

Падение напряжения на клеммах прибора, соответствующее номинальному значению тока:

$$\Delta U_{\text{а}} = R_{\text{а}} I_{\text{ном}} = 5 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,02 \text{ (В)}.$$

Ток в цепи шунта, соответствующий наибольшему значению измеряемого тока:

$$I_{\text{ш}} = I - I_{\text{ном}} = 15 - 4 \cdot 10^{-3} = 14,996 \text{ (А)}.$$

Так как шунт подключается параллельно миллиамперметру, то падение напряжения на клеммах прибора оказывается равным падению напряжения на шунте, т.е.

$$\Delta U = \Delta U_{\text{ш}} = R_{\text{ш}} I_{\text{ш}} = 0,02 \text{ (В)},$$

Откуда $R_{\text{ш}} = \Delta U_{\text{ш}}/I_{\text{ш}} = 0,02/14,996 = 0,00133 \text{ (Ом)}$.

Задача 9.3. Определить значение сопротивления шунта $R_{\text{ш}}$, необходимого для расширения пределов измерения тока гальванометра, имеющего сопротивление $R_{\text{г}} = 150 \text{ Ом}$, от его номинального значения тока $I_{\text{ном}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ до значения $I = 6 \cdot 10^{-3} \text{ А}$.

Решение

Определяем во сколько раз надо расширить пределы измерения тока:

$$D = I/ I_{\text{ном}} = 6 \cdot 10^{-3}/2 \cdot 10^{-4} = 30.$$

Значение сопротивления шунта определяется по зависимости

$$R_{\text{ш}} = R_{\text{г}}/(D - 1) = 150/(30 - 1) = 5,17 \text{ (Ом)}$$

Задача 9.4. Электроизмерительный комплект К-505 снабжен вольтметром со шкалой, имеющей $N_1 = 150$ делений, и амперметром со шкалой, имеющей $N_2 = 100$ делений. Определить цену деления шкал приборов, показания вольт-

метра, стрелка которого показывает $n_1 = 100$ делений, а также показание амперметра, стрелка которого указывает $n_2 = 50$ делений, для пределов измерения токов и напряжений, номинальные значения которых представлены в табл. 2

Таблица 2

Параметры прибора	Значения параметров					
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	30	75	150	300	450	600
$I_{\text{ном}}, \text{А}$	0,5	1	2,5	5	10	15

Решение.

Расчет выполняем для пределов измерения тока и напряжения, приведенных в первом столбце табл. 2.

Цена деления шкалы вольтметра с номинальным напряжением $U_{\text{ном}} = 30 \text{ В}$

$$C_U = U_{\text{ном}} / N_1 = 30 / 150 = 0,2 \text{ (В/дел)}.$$

Показание вольтметра с пределом измерения $U_{\text{ном}} = 30 \text{ В}$ при отклонении его стрелки на $n_1 = 100$ делений

$$U = C_U n_1 = 0,2 \cdot 100 = 20 \text{ (В)}$$

Цена деления шкалы амперметра с номинальным током $I_{\text{ном}} = 0,5 \text{ А}$

$$C_I = I_{\text{ном}} / N_2 = 0,5 / 100 = 0,005 \text{ (А/дел)}.$$

Показание амперметра с пределом измерения $I_{\text{ном}} = 0,5 \text{ А}$ при отклонении его стрелки на $n_2 = 50$ делений

$$I = C_I n_2 = 0,005 \cdot 50 = 0,25 \text{ (А)}.$$

Для других пределов токов и напряжений, приведенных в табл. 2, расчеты выполняются аналогично.

Задача 9.5. Электроизмерительный комплект К-505 снабжен ваттметром, рассчитанным на пределы тока и напряжения, приведенные в табл. 3. Шкала ваттметра имеет $N = 150$ делений. Определить цену деления ваттметра C_W для всех пределов напряжения и тока и соответствующие его показания, если стрелка ваттметра при измерении во всех случаях отклонилась на $n = 100$ делений.

Таблица 3

Параметры прибора	Значения параметров											
$I_{\text{ном}}, \text{А}$	0,5						1,0					
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	30	75	150	300	450	600	30	75	150	300	450	600

Продолжение таблицы 3

Параметры прибора	Значения параметров											
$I_{\text{ном}}, \text{А}$	2,5						5,0					
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	30	75	150	300	450	600	30	75	150	300	450	600

Решение

Расчет выполняем для пределов измерения тока и напряжения, приведенных в первом столбце табл. 3.

Номинальная мощность ваттметра для предела тока $I_{\text{ном}} = 0,5$ А и напряжения $U_{\text{ном}} = 30$ В

$$P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = 30 \cdot 0,5 = 15 \text{ (Вт)}.$$

Цена деления шкалы ваттметра для указанных пределов тока и напряжения

$$C_W = P_{\text{ном}} / N = 15 / 150 = 0,1 \text{ (Вт/дел.)}$$

Мощность, показываемая ваттметром при отклонении его стрелки на $n = 100$ делений

$$P = C_W n = 0,1 \cdot 100 = 10 \text{ (Вт)}.$$

Расчет для других пределов тока и напряжения, приведенных в табл. 3, выполняется аналогично.

Задача 9.6. Определить абсолютную $\Delta I_{\text{абс}}$ и относительную $\delta_{\text{отн}}$ погрешности измерения тока амперметром с номинальным предельным значением тока $I_{\text{ном}} = 5$ А и классом точности 0,5, если его показание $I_{\text{и}} = 2,5$ А.

Задача 9.7. Определить значение добавочного сопротивления $R_{\text{ш}}$, позволяющего расширить пределы измерения гальванометром, имеющим сопротивление $R_{\text{г}} = 150$ Ом, напряжения от его номинального значения $U_{\text{ном}} = 2 \cdot 10^{-3}$ В до значения $U = 10 \cdot 10^{-2}$ В.

10. Трансформаторы

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого по величине напряжения при той же частоте.

Переменный ток, протекая по виткам первичной обмотки трансформатора, возбуждает в сердечнике магнитопровода переменный магнитный поток Φ . Изменяясь во времени по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, этот поток пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмоток. При этом в соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотках наводятся ЭДС, выражения мгновенных значений которых для первичной и вторичной обмоток имеют вид:

$$e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m1} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right); e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где w_1, w_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора; E_{m1}, E_{m2} – амплитудные значения э.д.с. соответственно в первичной и вторичной обмотках.

Действующие значения ЭДС, индуцированные в первичной и вторичной обмотках трансформатора, определяют в соответствии с выражениями:

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi_m; \quad E_2 = 4,44w_2f\Phi_m,$$

где f – частота переменного тока; Φ_m – амплитудное значение магнитного потока трансформатора.

Амплитудное значение магнитного потока определяется

$$\Phi_m = B_m F_c,$$

где B_m – максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода, Тл; F_c – площадь поперечного сечения стержня магнитопровода

Отношение ЭДС E_1 первичной обмотки трансформатора к ЭДС E_2 вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, является **коэффициентом трансформации трансформатора**:

$$n = E_1/E_2 = w_1/w_2 \approx U_1/U_2.$$

Если $E_1 < E_2$ ($n < 1$), то трансформатор повышающий, при $E_1 > E_2$ ($n > 1$) — понижающий.

Трансформатор характеризуется следующими параметрами:

полная мощность первичной обмотки, В·А

$$S_1 = U_1 I_1,$$

где U_1 – первичное напряжение; I_1 – первичный ток;

полная мощность вторичной обмотки, В·А

$$S_2 = U_2 I_2$$

где U_2 – вторичное напряжение; I_2 – вторичный ток.

Так как потери в трансформаторе невелики, то за номинальную полную мощность трансформатора принимают:

$$S_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} \approx U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}}.$$

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется выражением

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_\rho} = \frac{\beta U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_\kappa},$$

где $P_m = P_0$ — потери в магнитопроводе трансформатора (находят в режиме холостого хода); P_ρ — электрические потери в обмотках трансформатора (при номинальной нагрузке определяют в режиме короткого замыкания); $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$ — отношение текущего значения тока нагрузки к номинальному его значению; $\cos \varphi_2 = P_2/U_2 I_2$ — коэффициент мощности потребителя электроэнергии.

Наибольшее значение КПД трансформатора имеет при равенстве электрических потерь мощности в обмотках и потерь мощности в магнитопроводе трансформатора, т. е. при $P_m = P_\rho$.

Трехфазный трансформатор имеет две трехфазные обмотки — высшего напряжения (ВН) и низшего напряжения (НН), в каждую из которых входят по три фазные обмотки, или фазы.

Фазные обмотки высшего и низшего напряжений соединяют «звездой» или «треугольником». Соединение «звездой» обозначают буквой У, а соединение «треугольником» — буквой Д.

Фазный коэффициент трансформации трехфазного трансформатора находят, как отношение фазных напряжений при холостом ходе

$$n_{\phi} = \frac{U_{\phi BH_x}}{U_{\phi HH_x}}.$$

а линейный коэффициент трансформации, зависящий от фазного коэффициента трансформации и типа соединения фазных обмоток высшего и низшего напряжений, по формуле

$$n_l = \frac{U_{лBH_x}}{U_{лHH_x}}$$

Если соединение фазных обмоток выполнено по схемам У/У или Д/Д, оба коэффициента трансформации одинаковы, т. е.

$$n_l = n_{\phi}$$

При соединении фаз обмоток по схеме У/Д

$$n_l = n_{\phi} \sqrt{3},$$

а по схеме Д/У

$$n_l = \frac{n_{\phi}}{\sqrt{3}}.$$

Соединяя фазы обмоток высшего и низшего напряжений звездой или треугольником, можно получить различные группы соединений, которые характеризуются углом смещения векторов линейных низших напряжений по отношению к соответствующим им векторам линейных высших напряжений.

Примеры решения задач

Задача 10.1. Определить коэффициент трансформации n трансформатора, число витков w_1 его первичной обмотки при числе витков вторичной обмотки $w_2 = 40$, а также номинальные токи $I_{1ном}$ и $I_{2ном}$ в обмотках однофазного трансформатора с номинальной мощностью $S_{ном} = 3$ кВ·А, подключенного к питающей сети с напряжением $U_{1ном} = 127$ В, напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе $U_{20} = 60$ В.

Решение.

Коэффициент трансформации трансформатора

$$n = w_1 / w_2 = E_1 / E_2 = U_1 / U_{20} = 127 / 60 = 2,11,$$

так как $U_{20} = E_2$, при холостом ходе трансформатора падение напряжения на первичной обмотке весьма незначительно, поэтому $U_1 \approx E_1$.

Число витков первичной обмотки

$$w_1 = n w_2 = 2,11 \cdot 40 = 84,4.$$

Номинальный ток первичной обмотки (считая полные мощности обмоток $S_1 \approx S_2$)

$$I_{1\text{НОМ}} = S_{1\text{НОМ}} / U_{1\text{НОМ}} = 3000/127 = 23,6 \text{ (А)}.$$

Номинальный ток вторичной обмотки (принимая $U_{2\text{НОМ}} \approx U_{20}$)

$$I_{2\text{НОМ}} = S_{1\text{НОМ}} / U_{20} = 3000/60 = 50 \text{ (А)}.$$

Задача 10.2. Определить коэффициент трансформации и действующие значения ЭДС E_1 и E_2 обмоток однофазного трансформатора при частоте $f = 50$ Гц, если площадь поперечного сечения магнитопровода $F_c = 4 \text{ см}^2$. Амплитудное значение магнитной индукции $B_m = 2$ Тл, число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора $w_1 = 250$ и $w_2 = 1250$.

Решение.

Коэффициент трансформации трансформатора

$$n = w_1 / w_2 = 250/1250 = 0,2.$$

Амплитудное значение магнитного потока в сердечнике трансформатора

$$\Phi_m = B_m F_c = 2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ (Вб)}.$$

Действующие значения ЭДС, индуцируемые в обмотках трансформатора

$$E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m = 4,44 \cdot 250 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 44,4 \text{ (Вб)};$$

$$E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m = 4,44 \cdot 1250 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 222 \text{ (Вб)}.$$

Задача 10.3. Трехфазный трансформатор типа ТМ-50/6 имеет номинальную мощность $S_{1\text{НОМ}} = 50 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, номинальные напряжения $U_{1\text{НОМ}} = 6000 \text{ В}$ и $U_{2\text{НОМ}} = 525 \text{ В}$. Определить коэффициент трансформации трансформатора и КПД трансформатора при коэффициентах нагрузки $\beta = 1$; $0,75$; и $0,5$ от номинальной ($\cos\varphi_2 = 1$), а также коэффициент нагрузки β_{max} , при котором КПД имеет максимальное значение η_{max} , если потери холостого хода при номинальном напряжении $P_0 = 350 \text{ Вт}$, а потери короткого замыкания $P_K = 1325 \text{ Вт}$.

Решение.

Коэффициент трансформации трансформатора

$$N = U_{1\text{НОМ}} / U_{2\text{НОМ}} = 6000/525 = 11,4$$

КПД трансформатора при номинальной нагрузке $\beta_{\text{НОМ}} = 1$

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{\beta S_{1\text{НОМ}} \cos\varphi_2}{\beta S_{1\text{НОМ}} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} = \frac{50000}{1 \cdot 50000 \cdot 1 + 350 + 1^2 \cdot 1325} = 0,967,$$

или $\eta_{\text{НОМ}} = 96,7\%$;

при $\beta = 0,75$

$$\eta_{0,75} = \frac{\beta S_{1\text{НОМ}} \cos\varphi_2}{\beta S_{1\text{НОМ}} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} = \frac{0,75 \cdot 50000}{0,75 \cdot 50000 \cdot 1 + 350 + 0,75^2 \cdot 1325} = 0,974,$$

или $\eta_{0,75} = 97,4\%$;

при $\beta = 0,5$

$$\eta_{0,5} = \frac{\beta S_{1\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{\beta S_{1\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} = \frac{0,5 \cdot 50000}{0,5 \cdot 50000 \cdot 1 + 350 + 0,5^2 \cdot 1350} = 0,973$$

или $\eta_{0,75} = 97,3\%$;

Нагрузка трансформатора, соответствующая максимальному значению КПД η_{max} трансформатора

$$\eta_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{350}{1325}} = 0,49.$$

Задача 10.4. Определить коэффициент трансформации трехфазного трансформатора и номинальные действующие значения первичного и вторичного фазных и линейных напряжений, при соединении обмоток соответственно по схемам «звезда – звезда» и «звезда – треугольник», если первичная обмотка имеет число витков на фазу $w_1 = 2002$, а вторичная $w_2 = 134$. Номинальное линейное напряжение первичной обмотки $U_{1\text{ЛНОМ}} = 6000$ В.

Решение.

Коэффициент трансформации фазных напряжений

$$n = w_1 / w_2 = 2002 / 134 = 15.$$

Номинальное первичное фазное напряжение трансформатора

$$U_{1\text{ФНОМ}} = U_{1\text{ЛНОМ}} / \sqrt{3} = 6000 / 1,73 = 3470 \text{ (В)}.$$

Номинальные вторичные напряжения трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда – звезда»

$$\text{линейное } U_{2\text{ЛНОМ}} = U_{1\text{ЛНОМ}} / n = 6000 / 15 = 400 \text{ (В)};$$

$$\text{фазное } U_{2\text{ФНОМ}} = U_{2\text{ЛНОМ}} / \sqrt{3} = 400 / 1,73 = 230 \text{ (В)}.$$

Коэффициенты трансформации трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда – звезда»

$$\text{линейных } n_{\text{УЛ}} = U_{1\text{ЛНОМ}} / U_{2\text{ЛНОМ}} = 6000 / 400 = 15;$$

$$\text{фазных } n_{\text{УФ}} = U_{1\text{ФНОМ}} / U_{2\text{ФНОМ}} = 3470 / 230 = 15.$$

Коэффициенты трансформации трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда – треугольник»

$$\text{фазных } n_{\Delta\text{Ф}} = U_{1\text{ФНОМ}} / U_{2\text{ФНОМ}} = 3470 / 230 = 15;$$

линейных $n_{\Delta\text{Л}} = U_{1\text{ЛНОМ}} / U_{2\text{ЛНОМ}} = 6000 / 230 = 26$, так как при соединении «треугольником» $U_{2\text{ЛНОМ}} = U_{2\text{ФНОМ}}$.

Задача 10.5. Однофазный двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью $S_{\text{НОМ}}$ и номинальным током во вторичной цепи $I_{2\text{НОМ}}$ при номинальном вторичном напряжении $U_{2\text{НОМ}}$ имеет коэффициент трансформации n при числе витков в обмотках w_1 и w_2 . Максимальное значение магнитной индукции в стержне B_m , а площадь поперечного сечения этого стержня F_c . ЭДС одного витка $E_{\text{ВИТ.}}$, частота переменного тока в сети $f = 50$ Гц. Значения пере-

численных параметров приведены в табл. 4. Определить не указанные в этой таблице значения параметров для каждого варианта

Таблица 4

Параметры	Значения параметров				
$S_{\text{НОМ}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	–	120	–	240	600
$U_{2\text{НОМ}}, \text{В}$	400	630	–	880	660
w_1	–	1800	–	–	–
w_2	–	–	169	128	140
n	15	–	12	23,4	9,55
$E_{\text{ВИТ}}, \text{В}$	5	–	6	–	–
$F_c, \text{М}^2$	–	0,018	–	0,022	–
$B_m, \text{Тл}$	1,5	1,4	1,5	–	1,55
$I_{2\text{НОМ}}, \text{А}$	172	–	140	–	–

Решение варианта 1.

1. Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_m = E_{\text{ВИТ}} / (4,44fw) = 5 / (4,44 \cdot 50 \cdot 1) = 0,0225 \text{ (Вб)}$$
2. Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода

$$F_c = \Phi_m / B_m = 0,0225 / 1,5 = 0,015 \text{ (м}^2\text{)}$$
3. Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = U_{2\text{НОМ}} / (4,44f \Phi_m) = 400 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,0225) = 80,$$
 принимая $E_{2\text{НОМ}} = U_{2\text{НОМ}}$
4. Число витков первичной обмотки

$$w_1 = n w_2 = 15 \cdot 80 = 1200$$
5. Полная номинальная мощность трансформатора

$$S_{\text{НОМ}} = U_{2\text{НОМ}} I_{2\text{НОМ}} = 400 \cdot 172 = 68800 \text{ (В} \cdot \text{А)} = 68,8 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}$$

11. Трехфазные асинхронные двигатели

Асинхронный электродвигатель – это электрическая машина, в которой при работе возбуждается вращающееся магнитное поле, но ротор вращается асинхронно, т.е. с угловой скоростью, отличной от угловой скорости поля.

При подаче к трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя трехфазного напряжения возникает результирующий вращающийся магнитный поток. Этот поток вращается в пространстве с частотой вращения, которая находится в строгой зависимости от частоты f_1 подводимого напряжения и числа пар полюсов двигателя p

$$n_1 = 60 f_1 / p.$$

Каждый асинхронный электродвигатель характеризуется своими номинальными данными, на которые он рассчитан. Основные технические данные электродвигателя указаны в их паспортах и каталогах.

Конструкция обмотки статора дает возможность соединять обмотки двигателя как «треугольником», так и «звездой». Благодаря этому каждый

трехфазный асинхронный электродвигатель можно использовать при двух различных (линейном и фазном) напряжениях сети.

Одной из важных величин, характеризующих работу асинхронного двигателя, является *скольжение* ротора, под которым понимается отношение

$$s_{\%} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%,$$

где n_2 – частота вращения двигателя, об/мин (мин⁻¹).

В относительных единицах скольжение

$$s = (n_1 - n_2) / n_1,$$

откуда частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1(1 - s)$$

или с учетом частоты вращения магнитного поля статора

$$n_2 = \frac{60f_1}{p}(1 - s).$$

Вращающееся магнитное поле индуцирует в обмотках статора и ротора асинхронного двигателя переменные ЭДС, действующие значения которых можно определить по формулам, аналогичным формулам, полученным для ЭДС трансформатора

$$E_1 = 4,44K_1w_1f_1\Phi_m; \quad E_{2\varepsilon} = 4,44K_2w_2f_2\Phi_m,$$

где E_1 – фазное значение ЭДС, индуцируемой в обмотке статора; E_{2s} = фазное значение ЭДС, индуцируемой в обмотке ротора при скольжении s ; w_1 , w_2 – число витков в фазе статора и ротора; Φ_m – амплитудное значение магнитного потока; K_1 , K_2 – обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора (у трансформатора $K_1 = K_2 = 1$).

При неподвижном роторе ЭДС ротора E_2 .

При вращении ротора асинхронного двигателя в процессе работы в нем будет индуцироваться переменная ЭДС E_{2s} с частотой f_{2s} , значение которой можно найти, заменив в выражении для E_{2s} частоту f_2 на sf_1 , тогда

$$E_{2\varepsilon} = 4,44K_2w_2sf_1\Phi_m,$$

$$E_{2s} = 4,44K_2w_2sf_1\Phi_m = sE_2.$$

При работе асинхронного электродвигателя под действием ЭДС E_{2s} , наводимой во вращающемся роторе, в цепи ротора возникает ток, значение которого в соответствии с законом Ома определяется выражением

$$I_{2s} = I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}},$$

где $I_2 = I_{2s}$ – фазный ток ротора при скольжении s ; Z_{2s} – полное сопротивление фазы ротора при скольжении s ; R_2 – активное сопротивление фазы ротора; X_2 – индуктивное сопротивление фазы ротора при данном скольжении s и частоте f_2 тока ротора.

С учетом того, что $E_{2s} = sE_2$ и $X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 L_2 s = sX_2$, выражение для тока ротора приводится к виду

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}}.$$

При составлении схемы замещения асинхронного электродвигателя параметры ротора приводят к числу витков и напряжению U_1 обмотки статора.

Электромагнитная мощность асинхронного двигателя определяется как

$$P_{эм} = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2 = 4,44 K_2 m_2 f_1 w_2 \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = \frac{\omega_1}{p} M,$$

где m_2 – число фаз обмотки ротора; ω_1 – угловая частота тока статора; p – число пар полюсов двигателя; M – электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем.

Откуда электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем

$$M = C_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

где $C_m = \frac{4,44 K_1 m_1 p f_1 w_1}{\omega_1}$ – машинная постоянная; m_1 – число фаз обмотки статора.

Вращающий момент на валу двигателя $M_{вр}$ несколько меньше электромагнитного момента M из-за механических и добавочных потерь. Поскольку эти потери в асинхронных машинах средней и большой мощности относительно малы, ими можно пренебречь и считать, что вращающий момент двигателя $M_{вр} \approx M$. Вращающий момент асинхронного двигателя можно определить и исходя из электрических потерь мощности в обмотках фаз ротора

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 R_2 = P_{эм} - P_{мех} = M \frac{\omega_1 s}{p},$$

откуда

$$M = \frac{p m_2 I_2^2 R_2}{\omega_1 s} = \frac{p m_1 (I_2')^2 R_2'}{\omega_1 s}.$$

Для пускового момента асинхронного двигателя ($n_2 = 0$) скольжение ротора $s = 1$ и

$$M_{пуск} = \frac{p m_1 (I_2')^2 R_2'}{\omega_1}.$$

Критическое скольжение $s_{кр} = R_2' / (X_1 + X_2')$ ротора соответствует максимальному моменту асинхронного двигателя, поэтому

$$M_{max} = \frac{p m_1 U_1^2}{2 \omega_1 (X_1 + X_2')}.$$

Выражение для момента асинхронного электродвигателя, записанное через максимальный момент и критическое скольжение ротора, приводится к виду

$$M = \frac{2M_{max}}{s/s_{кр} + s/s_{кр}}.$$

Зависимости скольжения s , скорости ротора n_2 , вращающего момента M , мощности потребления электрической энергии P_1 , тока I , коэффициента мощности $\cos\varphi$ и КПД η от полезной мощности на валу машины P_2 при условии, что напряжения U и частота f поддерживаются неизменными, являются рабочими характеристиками асинхронных двигателей.

При этом зависимость $M(P_2)$ определяется выражением

$$M = 9550 \frac{P_2}{n_2}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Зависимость $\cos\varphi_1(P_2)$ находят из выражения

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_2}{\sqrt{3}U_1 I_1}.$$

Значения коэффициента мощности для нормальных асинхронных электродвигателей средней мощности при номинальной нагрузке $\cos\varphi_{ном} = 0,83 \dots 0,89$.

Зависимость КПД асинхронного двигателя от нагрузки $\eta(P_2)$ определяется отношением

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + P_{\Sigma}),$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая электродвигателем из питающей сети; $P_{\Sigma} = P_m + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{мех} + P_d$ – суммарные потери мощности в двигателе, равные сумме потерь в магнитопроводе P_m , электрических потерь в обмотках статора и ротора $P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$, механических $P_{мех}$ и добавочных P_d потерь.

Пусковой ток асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в 5 ... 10 раз превышает номинальный ток. Пусковой момент составляет 0,9 ... 1,8 от номинального $M_{пуск} = (0,9 \dots 1,8)M_{ном}$.

Примеры решения задач

Задача 11.1. Определить значения ЭДС E_1 и E_2 , индуцируемых в фазах статора и ротора трехфазного асинхронного электродвигателя, и частоту тока f_2 в роторе при номинальной нагрузке и неподвижном его состоянии. Амплитудное значение магнитного потока двигателя $\Phi_m = 15 \cdot 10^{-3}$ Вб, числа витков обмоток статора и ротора $w_1 = 200$ и $w_2 = 20$, обмоточные коэффициенты $K_1 = 0,94$, $K_2 = 0,96$, номинальное скольжение ротора $s_{ном} = 0,05$, частота напряжения питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

Решение.

ЭДС, индуцируемая в обмотках статора двигателя,

$$E_1 = 4,44 K_1 w_1 f_1 \Phi_m = 4,44 \cdot 0,94 \cdot 200 \cdot 50 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 626 \text{ (В)}$$

ЭДС, индуцируемая в неподвижном роторе,

$$E_2 = 4,44K_2 w_2 f_1 \Phi_m = 4,44 \cdot 0,96 \cdot 20 \cdot 50 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 63,9 \text{ (В)}$$

ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора при номинальной нагрузке,

$$E_{2s} = sE_2 = 0,05 \cdot 63,9 = 3,2 \text{ (В)}.$$

Частота тока в роторе двигателя

при номинальной нагрузке

$$f_{2s} = f_1 s_{\text{ном}} = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ (Гц)}$$

при неподвижном состоянии ротора (при пуске $s_{\text{пуск}} = 1$)

$$f_{2\text{пуск}} = f_1 s_{\text{пуск}} = 50 \cdot 1 = 50 \text{ (Гц)}.$$

Задача 11.2. Для привода насоса использован трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором с числом пар полюсов $p = 1$ и частотой вращения ротора $n_2 = 0,96 n_1$. Двигатель питается от трехфазной сети с напряжением питания $f_1 = 50$ Гц. Определить частоту вращения магнитного поля n_1 , скольжение ротора s , частоту тока f_{2s} , а также частоту вращения n_2' и частоту тока f_{2s}' в роторе при возрастании нагрузки на валу двигателя с учетом того что частота вращения ротора при этом уменьшилась на 5% и составляет $n_2' = 0,95 n_2$.

Решение.

Частота вращения магнитного поля при числе пар полюсов $p = 1$

$$n_1 = 60 f_1 / p = 60 \cdot 50 / 1 = 3000 \text{ (мин}^{-1}\text{)}.$$

Скольжение ротора двигателя

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 = (3000 - 0,96 \cdot 3000) / 3000 = 0,04$$

Частота вращения ротора двигателя

$$n_2 = 0,96 n_1 = 0,96 \cdot 3000 = 2880 \text{ (мин}^{-1}\text{)}.$$

Частота тока в двигателе при частоте вращения ротора n_2

$$f_{2s} = f_1 s = 50 \cdot 0,04 = 2 \text{ (Гц)}.$$

Частота вращения ротора при возросшей нагрузке на валу двигателя

$$n_2' = 0,95 n_2 = 0,95 \cdot 2880 = 2736 \text{ (мин}^{-1}\text{)}.$$

Скольжение ротора при возросшей нагрузке

$$s' = (n_1 - n_2') / n_1 = (3000 - 2736) / 3000 = 0,088$$

Частота тока ротора при возросшей нагрузке

$$f_{2s}' = f_1 s' = 50 \cdot 0,088 = 4,4 \text{ (Гц)}$$

Задача 11.3 Для трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, обмотки статора которого соединены «звездой» определить в режиме холостого хода коэффициент мощности $\cos\varphi_0$, электрические потери $P_{\Sigma 1}$ в обмотках статора, а также суммарные P_{Σ} , магнитные P_m и механические $P_{\text{мех}}$ потери мощности в двигателе при номинальном напряжении $U_{\text{ном}} = 380$ В. Ток и мощность холостого хода соответственно составляют $I_0 = 8,8$ А, $P_0 = 1072$ Вт, активное сопротивление обмотки статора $R_1 = 0,616$ Ом.

Решение.

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_0 = P_0/(\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}I_0) = 1072/(1,73 \cdot 380 \cdot 8,8) = 0,185.$$

Электрические потери мощности в обмотках статора при холостом ходе

$$P_{\vartheta 1} = 3I_0^2R_1 = 3 \cdot 8,8^2 \cdot 0,616 = 143 \text{ (Вт)}.$$

Суммарные магнитные и механические потери мощности при холостом ходе

$$P_{\Sigma} = P_M + P_{\text{мех}} = P_0 - P_{\vartheta 1} = 1072 - 143 = 929 \text{ (Вт)}.$$

Задача. 11.4. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания асинхронного электродвигателя определить приближенное значение его КПД при номинальной нагрузке. Потери мощности холостого хода номинальном напряжении $U_{\text{НОМ}}$ $P_0 = 1072$ Вт, мощность короткого замыкания при номинальном токе $P_K = 1700$ Вт, номинальная полезная мощность на валу $P_{2\text{НОМ}} = 8003$ Вт.

Решение.

КПД асинхронного двигателя при номинальной нагрузке

$$\eta_{\text{НОМ}} = P_{2\text{НОМ}}/(P_{2\text{НОМ}} + P_0 + P_K) = 8003/(8003 + 1072 + 1700) = 0,743$$

$$\text{или } \eta_{\text{НОМ}} = 74,3\%.$$

Задача 11.5. В таблице 5 приведены данные следующих параметров трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: основной магнитный поток Φ_m , число витков обмотки статора w_1 , номинальное скольжение $s_{\text{НОМ}}$, ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора при его неподвижном состоянии E_2 и ЭДС ротора при его вращении с номинальным скольжением E_{2s} , частота этой ЭДС f_{2s} при частоте вращения ротора $n_{\text{НОМ}}$. Частота тока в питающей сети 50 Гц. Число витков в обмотке короткозамкнутого ротора принимается $w_2 = 0,5$; обмоточный коэффициент $K_2 = 1$. Определить значения параметров, не указанные в таблице в каждом варианте

Таблица 5

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Φ_m , Вб	0,028	0,032	0,048	–	0,025	–	–	0,028	0,028	–
w_1	18	–	24	16	–	24	18	–	36	18
K_1	0,95	0,96	0,96	0,98	0,98	0,96	0,95	0,95	0,98	0,98
$s_{\text{НОМ}}$	0,04	–	0,05	0,04	–	0,05	–	–	–	–
p	2	3	1	2	–	4	2	4	–	2
E_1 , В	–	210	–	98	110	200	–	120	–	100
E_2 , В	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
E_{2s} , В	–	–	–	–	–	–	0,13	–	–	–
f_{2s} , Гц	–	–	–	–	–	–	2,5	3,2	–	2,5
$n_{\text{НОМ}}$, МИН ⁻¹	–	970	–	–	2920	–	–	–	1470	–

Решение варианта 1

1. ЭДС обмотки статора

$$E_1 = 4,44K_1 w_1 f_1 \Phi_m = 4,44 \cdot 0,95 \cdot 18 \cdot 50 \cdot 0,028 = 106 \text{ (В)}$$

2. ЭДС обмотки ротора при номинальной частоте вращения

$$E_{2s} = 4,44K_2 w_2 f_1 s_{\text{НОМ}} \Phi_m = 4,44 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 50 \cdot 0,04 \cdot 0,028 = 0,12 \text{ (В)}$$

3. ЭДС обмотки неподвижного ротора

$$E_2 = E_{2s}/s_{\text{НОМ}} = 0,12/0,04 = 3 \text{ (В)}$$

4. Частота ЭДС ротора при номинальном скольжении

$$f_{2s} = f_1 s_{\text{НОМ}} = 50 \cdot 0,04 = 2 \text{ (Гц)}$$

5. Номинальная частота вращения ротора

$$n_{\text{НОМ}} = n_1(1 - s_{\text{НОМ}}) = 1500 \cdot (1 - 0,04) = 1440 \text{ (мин}^{-1}\text{)},$$

где $n_1 = 60 f_1/p = 60 \cdot 50/2 = 1500 \text{ (мин}^{-1}\text{)}$.

12. Элементная база электроники. Определение h-характеристик транзисторов

Современные электронные устройства, как правило, строятся на основе полупроводниковых элементов. В основе принципа действия полупроводниковых приборов лежат электрические свойства электронно-дырочного перехода, или *p-n*-перехода, образованного на границе двух областей полупроводников различного типа проводимости.

Зависимость тока через электронно-дырочный переход от приложенного к нему напряжения называют вольт-амперной характеристикой (ВАХ) перехода.

Вследствие резко выраженной нелинейности ВАХ *p-n*-переходы широко используют в полупроводниковых приборах, имеющих практически два состояния — проводящее и непроводящее.

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним *p-n*-переходом и двумя внешними выводами от областей с проводимостями разного типа (анодом А и катодом К). Он хорошо пропускает ток одного направления и плохо — противоположного направления.

На рис. 21 приведена вольт-амперная характеристика полупроводникового диода.

Из графика следует, что при положительном смещении, когда ток через *p-n*-переход диода растет с ростом напряжения, переход обладает высокой проводимостью. При отрицательном смещении, когда обратный ток быстро достигает значения тока насыщения, переход обладает очень низкой проводимостью.

По своему назначению полупроводниковые диоды подразделяются на следующие основные типы: выпрямительные, стабилитроны (опорные диоды), быстро восстанавливающиеся (частотные), фото- и светодиоды, варикапы. Кроме указанных типов диодов существуют импульсные, туннельные,

магнитодиоды, тензодиоды и др. Чаще всего диоды изготавливают из германия и кремния.

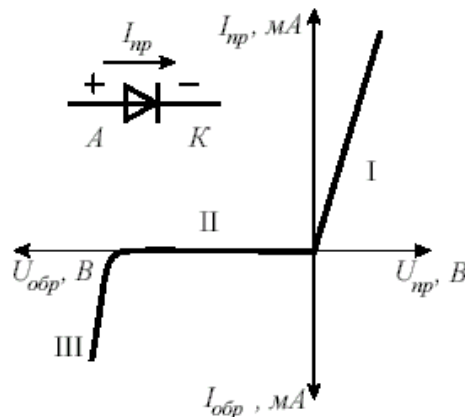


Рис.21. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода и его условное обозначение

К основным параметрам полупроводниковых диодов относятся параметры по напряжению, току, сопротивлению и мощности потерь, коммутационным явлениям, а также температурные и тепловые.

Наиболее важными из них являются:

- импульсное прямое напряжение U_{FM} ;
- пороговое напряжение $U_{(TO)}$;
- предельный (средний прямой) ток I_{FAV} ;
- повторяющийся импульсный обратный ток I_{RRM} ;
- дифференциальное прямое сопротивление r_T ;
- время обратного восстановления t_{tr} ;
- температура $p-n$ -перехода T_j .

Транзистором называют полупроводниковый усилительный прибор с двумя $p-n$ -переходами и тремя внешними выводами. В настоящее время существует большая номенклатура транзисторов, отличающихся по мощности, предельной частоте коммутации и генерации и по другим параметрам.

Все современные транзисторы подразделяются на два типа: биполярные и полевые. Биполярные транзисторы отличаются от полевых большим уровнем мощности и более высокой рабочей частотой. В то же время полевые транзисторы превосходят биполярные по возможностям автоматического регулирования усиления и могут работать в более широком динамическом диапазоне.

Различают три схемы включения транзистора:

- с общей базой (ОБ);
- общим эмиттером (ОЭ);
- общим коллектором (ОК).

Схема с ОБ не усиливает ток $I_K < I_E$, но усиливает напряжение. Она обладает также и свойством усиления мощности входного сигнала.

Схема с ОЭ обладает свойством значительного усиления тока. Поскольку эта схема обладает также свойством усиления напряжения, то усиление мощности в данной схеме значительно больше, чем в схеме с ОБ.

Схема с ОК обладает лучшим усилением тока, чем схема с ОЭ, и, кроме того, свойством усиления мощности.

Наибольшее применение получила схема с общим эмиттером.

Характеристики транзисторов находятся в сильной зависимости от температуры. При повышении температуры в базе и коллекторе, резко возрастает начальный ток коллектора. Для предотвращения перегрева коллекторного *p-n*-перехода необходимо, чтобы его мощность не превышала допустимого значения P_{Kmax} .

Тиристором в общем случае называют полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три *p-n*-перехода и более, который может быть переключен из непроводящего состояния в проводящее и наоборот

По количеству внешних выводов различают двухэлектродные (динисторы) и трехэлектродные (тринисторы) тиристоры, но в любом случае они имеют четырехслойную структуру полупроводника с тремя *p-n*-переходами.

Интегральной микросхемой (ИМС) называют устройство с высокой плотностью упаковки электрически связанных элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и пр.), выполняющее заданную функцию обработки (преобразования) электрических сигналов. С точки зрения конструктивно-технологических и эксплуатационных требований ИМС представляет собой единое изделие.

В зависимости от технологии изготовления интегральные микросхемы делятся на пленочные, полупроводниковые ИМС и микросборки. Пленочные ИМС могут быть тонко- и толстопленочными, имеют в своем составе как элементы, так и компоненты. В последнем случае их называют гибридными ИМС.

Интегральная микросхема, в которой все активные и пассивные элементы и их соединения выполняются в виде сочетания неразъемно связанных *p-n*-переходов в одном полупроводниковом кристалле, называется полупроводниковой

Поскольку и полупроводниковая, и пленочная технологии имеют свои достоинства, то при производстве микросборок, выполняющих более сложные функции, чем ИМС, и состоящих из сочетания элементов, компонентов и ИМС, используют сочетание обеих технологий.

Количественную оценку параметров ИМС производят с использованием двух наиболее важных показателей: уровня интеграции и плотности упаковки. Десятичный логарифм от уровня интеграции — количества N входящих в ИМС элементов, округленного до ближайшего большего целого числа, т. е. $K = \lg N$, называют степенью интеграции ИМС. ИМС первой степени интеграции ($K = 1$) имеют до 10 элементов, второй — до 100 ($K = 2$) и т. д. Количество элементов и компонентов, содержащихся в 1 см^3 объема ИМС, называют плотностью упаковки.

Современные полупроводниковые ИМС имеют $K = 6$, а плотность упаковки может достигать 10^5 эл./см³ и более, при этом размеры отдельных элементов не превышают 1 мкм. Площадь полупроводникового кристалла ИМС в зависимости от сложности составляет 0,3...0,6 мм².

По своему функциональному назначению ИМС подразделяются на цифровые и аналоговые.

Цифровые (логические) ИМС, принцип работы которых базируется на использовании аппарата математической логики, представляют собой устройства с несколькими входами m и выходами n , реализующие определенную логическую функцию

$$y_j = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_m),$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, n$; x_i — информационные значения входных сигналов, равные логической единице и логическому нулю; y_j — информационные значения выходных сигналов, которые в зависимости от значений x , также могут принимать лишь значения логических единицы или нуля.

Аналоговые ИМС представляют собой устройства, которые обеспечивают почти пропорциональную зависимость между входными и выходными сигналами. Аналоговые ИМС разделяются на информационные и силовые.

Информационные ИМС осуществляют функции усиления, генерации, сравнения, модуляции, присущие информационной электронике, а силовые — функции преобразования параметров потока электрической энергии, присущие силовой электронике.

Аналоговые ИМС могут использоваться в качестве усилителей тока, напряжения и мощности.

Для расчетов цепей с биполярными транзисторами используют семейства статических характеристик транзисторов, определяющих соотношения между токами, протекающими через его внешние выводы, и напряжения, приложенные к этим выводам.

Наиболее распространена система h -параметров, выражающая функциональную зависимость между входными напряжением и током и выходным напряжением.

Основные h -параметры транзистора для схемы включения с общим эмиттером можно определить с помощью характеристических треугольников, построенных на семействе входных и выходных характеристик.

Из характеристического треугольника определяют

- входное сопротивление транзистора $h_{11} = \Delta U_{\text{б}} / \Delta I_{\text{б}} |_{U_{\text{к}} = \text{const}}$;

- коэффициент обратной связи $h_{12} = \Delta U_{\text{б}} / \Delta U_{\text{к}} |_{I_{\text{б}} = \text{const}}$.

Из семейства статических выходных характеристик определяют

- коэффициент усиления по току $h_{21} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}} |_{U_{\text{к}} = \text{const}}$;

- выходную проводимость транзистора $h_{22} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta U_{\text{к}} |_{I_{\text{б}} = \text{const}}$.

Параметры транзисторов зависят от схемы включения транзистора. Для пересчета h -параметров транзистора при включении его по данной схеме, если известны его h -параметры, соответствующие другой схеме включения, можно использовать следующие приближенные формулы.

Схемы включения транзистора:

с общим эмиттером (ОЭ)

$$h_{11э} = \frac{h_{11б}}{1 + h_{21б}}; \quad h_{12э} = \frac{h_{11б}h_{22б}}{1 + h_{21б}} - h_{12б}; \quad h_{21э} = \frac{h_{21б}}{1 + h_{21б}}; \quad h_{22э} = \frac{h_{22б}}{1 + h_{21б}};$$

с общей базой (ОБ)

$$h_{11б} = \frac{h_{11э}}{1 + h_{21э}}; \quad h_{12б} = \frac{h_{11э}h_{22э}}{1 + h_{21э}} - h_{12э}; \quad h_{21б} = -\frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}}; \quad h_{22б} = \frac{h_{22э}}{1 + h_{21э}};$$

с общим коллектором (ОК)

$$h_{11к} = \frac{h_{11б}}{1 + h_{21б}} = h_{11э}; \quad h_{12к} = 1; \quad h_{21к} = \frac{1}{1 + h_{21б}} = -(h_{21э} + 1);$$

$$h_{22к} = \frac{h_{22б}}{1 + h_{21б}} = h_{22э};$$

Примеры решения задач

Задача 12.1. Рассчитать значения h -параметров транзистора типа П 416, включенного по схеме с общей базой, если известны значения этих параметров при включении транзистора по схеме с общим эмиттером: $h_{11э} = 650 \text{ Ом}$; $h_{12э} = 32 \cdot 10^{-3}$; $h_{21э} = 40$; $h_{22э} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ См}$.

Решение.

Входное сопротивление транзистора при включении его по схеме с общей базой

$$h_{11б} = \frac{h_{11э}}{1 + h_{21э}} = \frac{650}{1 + 40} = 15,8 \text{ (Ом)}.$$

Коэффициент обратной связи транзистора

$$h_{12б} = \frac{h_{11э}h_{22э}}{1 + h_{21э}} - h_{12э} = \frac{650 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}}{1 + 40} - 32 \cdot 10^{-3} = -29,62 \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент усиления по току

$$h_{21б} = -\frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}} = -\frac{40}{1 + 40} = -0,976.$$

Выходная проводимость

$$h_{22б} = \frac{h_{22э}}{1 + h_{21э}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{1 + 40} = 3,67 \cdot 10^{-6} \text{ (См)}.$$

Задача 12.2. Рассчитать значения h -параметров транзистора типа П 416, включенного по схеме с общим коллектором, если известны значения указанных параметров при включении транзистора по схеме с общей базой: $h_{11б} = 15,8 \text{ Ом}$; $h_{12б} = -29,62 \cdot 10^{-3}$; $h_{21б} = -0,975$; $h_{22б} = 3,67 \cdot 10^{-6} \text{ См}$.

Решение.

Входное сопротивление транзистора при включении его по схеме с общим коллектором

$$h_{11к} = \frac{h_{11б}}{1 + h_{21б}} = \frac{15,8}{1 - 0,975} = 632 \text{ (Ом)}.$$

Коэффициент обратной связи при включении транзистора по схеме с общим коллектором $h_{12к} = 1$.

Коэффициент усиления по току

$$h_{21к} = \frac{1}{1 + h_{21б}} = \frac{1}{1 - 0,975} = 40.$$

Выходная проводимость транзистора

$$h_{22к} = \frac{h_{22б}}{1 + h_{21б}} = \frac{3,67 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,975} = 1,47 \cdot 10^{-4} \text{ (См)}$$

Задача 12.3 Рассчитать значения h-параметров транзистора типа ГТ322А, включенного по схеме с общей базой, если известны значения этих параметров при включении транзистора по схеме с общим эмиттером: $h_{11э} = 330 \text{ Ом}$; $h_{12э} = 1,6 \cdot 10^{-4}$; $h_{21э} = 56$; $h_{22э} = 62,5 \cdot 10^{-6} \text{ См}$.

Решение.

Входное сопротивление транзистора при включении его по схеме с общей базой

$$h_{11б} = \frac{h_{11э}}{1 + h_{21э}} = \frac{330}{1 + 56} = 5,79 \text{ (Ом)}.$$

Коэффициент обратной связи транзистора

$$h_{12б} = \frac{h_{11э}h_{22э}}{1 + h_{21э}} - h_{12э} = \frac{330 \cdot 62,5 \cdot 10^{-6}}{1 + 56} - 1,6 \cdot 10^{-4} = 0,202 \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент усиления по току

$$h_{21б} = -\frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}} = -\frac{56}{1 + 56} = -0,9825.$$

Выходная проводимость

$$h_{22б} = \frac{h_{22э}}{1 + h_{21э}} = \frac{62,5 \cdot 10^{-6}}{1 + 56} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ (См)}.$$

Задача 12.4. Рассчитать значения h-параметров транзистора типа ГТ322А, включенного по схеме с общим коллектором, если известны значения этих параметров при включении транзистора по схеме с общей базой: $h_{11б} = 5,79 \text{ Ом}$; $h_{12б} = 0,202 \cdot 10^{-3}$; $h_{21б} = -0,9825$; $h_{22б} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ См}$.

Решение.

Входное сопротивление транзистора при включении его по схеме с общим коллектором

$$h_{11к} = \frac{h_{116}}{1 + h_{216}} = \frac{5,79}{1 - 0,98255} = 332 \text{ (Ом)}.$$

Коэффициент обратной связи при включении транзистора по схеме с общим коллектором $h_{12к} = 1$.

Коэффициент усиления по току

$$h_{21к} = \frac{1}{1 + h_{216}} = \frac{1}{1 - 0,98255} = 57.$$

Выходная проводимость транзистора

$$h_{22к} = \frac{h_{226}}{1 + h_{216}} = \frac{1,1 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,9825} = 62,8 \cdot 10^{-4} \text{ (См)}$$

Задача 12.5. Рассчитать значения h-параметров транзистора типа ГТ322А, включенного по схеме с общим эмиттером, если известны значения этих параметров при включении транзистора по схеме с общей базой: $h_{116} = 5,79 \text{ Ом}$; $h_{126} = 0,202 \cdot 10^{-3}$; $h_{216} = -0,9825$; $h_{226} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ См}$.

Решение.

Входное сопротивление транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером

$$h_{11э} = \frac{h_{116}}{1 + h_{216}} = \frac{5,79}{1 - 0,9825} = 331 \text{ (Ом)}.$$

Коэффициент обратной связи транзистора

$$h_{12э} = \frac{h_{116}h_{226}}{1 + h_{216}} - h_{126} = \frac{5,79 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,9825} - 0,202 \cdot 10^{-3} = 1,62 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент усиления по току

$$h_{21э} = \frac{h_{216}}{1 + h_{216}} = \frac{-0,9825}{1 - 0,9825} = -56,1;$$

Выходная проводимость

$$h_{22э} = \frac{h_{226}}{1 + h_{216}} = \frac{1,1 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,9825} = 63 \cdot 10^{-6} \text{ (См)}.$$

Литература

1. Рекус Г.Г. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями: учеб. пособие / Г.Г.Рекус. – М.: Высш. шк., 2005. – 343 с.
2. Кацман М.М. Сборник задач по электрическим машинам: учеб. пособие / М.М.Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 160 с.
3. Лотерейчук Е.А. Расчет электрических и магнитных цепей и полей. Решение задач: учеб. пособие. – М.: ФОРУМ ИНФРА-М, 2009. – 272 с.
4. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие / Ю.Г.Синдеев. – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – 407 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Электробезопасность. Оказание первой помощи пострадавшему от электрического тока.....	5
2. Условные обозначения элементов электрических схем.....	7
3. Расчет цепей постоянного тока с применением законов Кирхгофа.....	10
4. Способы представления характеристик синусоидального тока.....	13
5. Однофазные синусоидальные электрические цепи с последовательным соединением элементов цепи.....	18
6. Однофазные синусоидальные электрические цепи с параллельным соединением элементов цепи.....	22
7. Однофазные синусоидальные электрические цепи со смешанным соединением элементов цепи.....	25
8. Трехфазные электрические цепи переменного тока.....	29
9. Электрические измерения.....	36
10. Трансформаторы.....	41
11. Трехфазные асинхронные двигатели.....	46
12. Элементная база электроники. Определение h-характеристик транзисторов.....	52
Литература.....	58

Николай Иванович Ткаченко

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учебное пособие

Для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 280700.62 - «Техносферная безопасность», профиль «Безопасность технологических процессов и производств»

Редакция в авторском исполнении
Компьютерная верстка Н.И.Ткаченко

Донской государственный аграрный университет
346493, пос. Персиановский, Октябрьский район, Ростовская область

Подписано в печать 28.05.2017 г. Тираж 50 экз.
Объем - 1,1 уч. изд. л Заказ № 302 Формат 60x84^{1/16}

Лицензия на полиграфическую деятельность
ЛР №131864 от 12.01.1998
Типография НГМА, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, 111