

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Основные понятия о процессах в электрических цепях переменного синусоидального тока	7
1.1. Трехфазный переменный синусоидальный ток	7
1.2. Основные виды соединений трехфазных цепей	10
1.3. Соединение звездой	10
1.4. Законы Кирхгофа	11
1.5. Соединение треугольником	12
Выводы к главе 1	13
Контрольные вопросы	13
Список тем для рефератов и докладов	14
Глава 2. Векторные диаграммы. Построение и применение для анализа процессов в электрических сетях	15
2.1. Вектор тока на комплексной плоскости	15
2.2. Векторная диаграмма направления мощности	17
2.3. Электрическая цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью	17
Выводы к главе 2	20
Контрольные вопросы	20
Список тем для рефератов и докладов	20
Глава 3. Основы метода симметричных составляющих	21
3.1. Прямая, обратная и нулевая последовательность	21
3.2. Метод симметричных составляющих	21
Выводы к главе 3	23
Контрольные вопросы	23
Список тем для рефератов и докладов	23
Глава 4. Аварийные режимы электрических сетей	24
4.1. Короткое замыкание	24
4.2. Перегрузка	27
4.3. Асинхронный ход	28
4.4. Качания	29
4.5. Низкая частота	30
Выводы к главе 4	31
Контрольные вопросы	31
Список тем для рефератов и докладов	32
Глава 5. Общие понятия о расчетах токов короткого замыкания (КЗ) для РЗА	33
5.1. Общие понятия и допущения. Методика расчёта токов КЗ	33
5.2. Программный комплекс EnergyCS ТКЗ	35
5.3. Программный комплекс ЕТАР	36
5.4. Программа расчета токов КЗ АВРАЛ	37
5.5. Автоматизированный комплекс ДАКАР	38
5.6. Комплекс программ для расчета электрических величин при повреждениях, и расчета уставок релейной защиты ТКЗ-3000	39
5.7. Программа по расчетам токов КЗ ELPLEK	40
5.8. Программа «ТоКо: Расчет токов КЗ»	41
Выводы к главе 5	41
Контрольные вопросы	42
Список тем для рефератов и докладов	42

Глава 6. Обзор программ просмотра регистраторов аварийных событий ООО «НПП Бреслер», ООО «Свей», ООО «НПП Экра».....	43
6.1. Программа просмотра файлов осциллограмм WinBres «НПП Бреслер».....	44
6.2. Обзор программы просмотра файлов осциллограмм Waves «НПП ЭКРА».....	49
Выводы к главе 6.....	50
Контрольные вопросы.....	50
Список тем для рефератов и докладов.....	51
Глава 7. Технологические нарушения, связанные с отказами и повреждениями электрооборудования электрических сетей. Анализ аварийных осциллограмм.....	56
7.1. Повреждение автотрансформатора с пожаром.....	56
из-за грозового разряда.....	66
7.3. Авария с повреждением и пожаром автотрансформатора, разрушением воздушного выключателя и падением колонок разъединителя.....	70
Выводы к главе 7.....	78
Контрольные вопросы.....	78
Список тем для рефератов и докладов.....	78
Глава 8. Технологические нарушения, связанные с отказами устройств РЗА.....	79
8.1. Излишнее отключение масляного выключателя по причине перекрытия между контактными выводами в разъеме термосигнализатора.....	79
8.2. Отключение автотрансформаторов из-за электродугового повреждения контрольных кабелей токовых цепей ДЗ.....	81
8.3. Отключение выключателя 220 кВ вследствие пуска от резервной защиты, неучтенной в исполнительных схемах устройств РЗА.....	87
Выводы к главе 8.....	91
Контрольные вопросы.....	91
Список тем для рефератов и докладов.....	91
Глава 9. Действующие нормативно-технические документы, регламентирующие создание и эксплуатацию регистраторов аварийных событий (РАС).....	92
9.1. Приказы Минэнерго РФ:.....	93
9.2. Требования к каналам для передачи файлов с неоперативной аварийной информацией с РАС и устройств РЗА энергообъектов в ЦУС и ДЦ.....	95
9.3. Национальные стандарты Российской Федерации (ГОСТ Р) и СТО АО «СО ЕЭС»:.....	96
9.4. Договора и соглашения между АО «СО ЕЭС» и субъектами электроэнергетики:.....	104
9.5. Стандарты СТО ПАО «Россети»:.....	106
Выводы к главе 9.....	110
Контрольные вопросы.....	110
Список тем для рефератов и докладов.....	111
Глава 10. Технологические нарушения, связанные с неправильной работы устройств РЗА.....	112
10.1. Проверка уставок и установленных коэффициентов трансформации ТТ.....	112
10.2. Отказ работы автоматики воздушного выключателя.....	114
10.3. Излишнее отключение воздушной линии (ВЛ).....	117
10.4. Неправильное действие защит и автоматики. Отключение ВЛ-110.....	119
10.5. Отключение в результате грозовой деятельности.....	121
Выводы к главе 10.....	124
Контрольные вопросы.....	124
Список тем для рефератов и докладов.....	124
Глава 11. Анализ срабатывания устройств релейной защиты и автоматики энергетических систем.....	125
11.1. Как проводить анализ срабатывания устройств РЗА.....	125
11.2. Исходные данные для анализа работы РЗА при технологическом нарушении:.....	126
11.3. Анализ аварийной осциллограммы.....	126
11.4. Пример 1: Излишнее срабатывание дифференциальной защиты ошиновки.....	129
Выводы к главе 11.....	140
Контрольные вопросы.....	140
Список тем для рефератов и докладов.....	140
Список литературы.....	147

Посвящается светлой памяти
ТОЧИЛКИНА ВАЛЕРИЯ ГРИГОРЬЕВИЧА,
с его участием подготовлена глава 9

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая сеть — сложный инфраструктурный объект, который в процессе эксплуатации подвергается различным аварийным процессам. Основной причиной аварийных процессов в электрической сети являются короткие замыкания и ненормальные режимы работы электрооборудования.

В процессе эксплуатации необходимо выполнять анализ аварийных процессов, возникающих в электрических сетях. Это необходимо делать как для оценки правильности заданных параметров срабатывания устройств РЗА, так и для оценки выбранных схем коммутации распределительных устройств, выбора режима заземления нейтрали трансформаторов в сети 110 кВ и др. Так как протекание таких процессов обычно очень быстрое, порой десятки миллисекунд, то анализ производится в ретроспективе, по записи параметров аварийных процессов (токов и напряжений) и регистрации работы устройств и отдельных функций РЗА, т. е. процесс «отматывается» назад.

В недавнем прошлом выполнение анализа затруднялось из-за отсутствия достаточной информации о протекании аварийных процессов. Основными средствами получения информации для анализа аварийных процессов были сработавшие сигнальные реле (блинкера) и на крупных подстанциях фотоосциллографы.

Широкое внедрение микропроцессорных устройств РЗА и регистраторов аварийных событий (РАС), позволяет решать данную задачу. Современные устройства РЗА имеют возможность регистрации (осциллографирования) как аварийных процессов, так и поведения функций РЗА при этих процессах. Так же имеется возможность получения информации о параметрах аварийного процесса и работы устройств РЗА, зафиксированных на подстанциях, прилегающих к месту аварии (повреждения), что позволяет проводить более полный анализ.

Внедрение в эксплуатацию программных комплексов анализа работы устройств РЗА возможно позволит в какой-то степени автоматизировать данный процесс, но, по мнению авторов, инженеры и, в достаточном минимальном объёме, электромонтёры по специальностям 13.01.05 «Электромонтер по техническому обслуживанию электростанций и сетей» и 13.01.10 «Электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования»,

должны владеть навыками и знаниями анализа аварийных процессов, чтобы иметь возможность самостоятельного выявления ошибок данных комплексов РЗА и ПА.

Изложение в учебном пособии сопровождается множеством примеров в форме векторных диаграмм рабочих и аварийных режимов электроэнергетических систем. Учебное пособие предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов электроэнергетических специальностей, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Релейная защита и автоматизация энергосистем» при изучении профессиональной дисциплины «Наладка и эксплуатация релейной защиты и автоматики», в соответствии с утвержденной рабочей программой дисциплины, для специалистов технических служб предприятий электрических и распределительных сетей и электрических станций, слушателей курсов повышения квалификации электроэнергетического профиля.

Учебное пособие составлено на основе многолетнего опыта работы в электроэнергетической отрасли, проведения практических занятий и чтения лекций по данным дисциплинам. В конце каждой главы имеется список контрольных вопросов, тем для подготовки рефератов и докладов, а в конце пособия приведен список литературных источников, ознакомление с которыми послужит более глубокому изучению вопросов по выбранной специальности.

ГЛАВА 1. Основные понятия о процессах в электрических цепях переменного синусоидального тока

1.1. Трехфазный переменный синусоидальный ток

В настоящее время производство, передача и распределение электрической энергии осуществляется синусоидальным переменным током, который имеет ряд преимуществ технического и экономического характера перед постоянным током.

Под синусоидальным переменным током (напряжением) понимают ток (напряжение), направление и величина которых изменяются с течением времени t , по гармоническому закону [1].

Графически переменный синусоидальный ток (напряжение) можно представить в виде отрезка (вектора) на комплексной плоскости (рис. 1.1, а) или в виде синусоидальной функции $y = \sin(x)$, где по горизонтальной оси откладывается угол (рад) или время (мс), а по вертикальной оси соответствующие им значения синуса угла, (рис. 1.1, б).

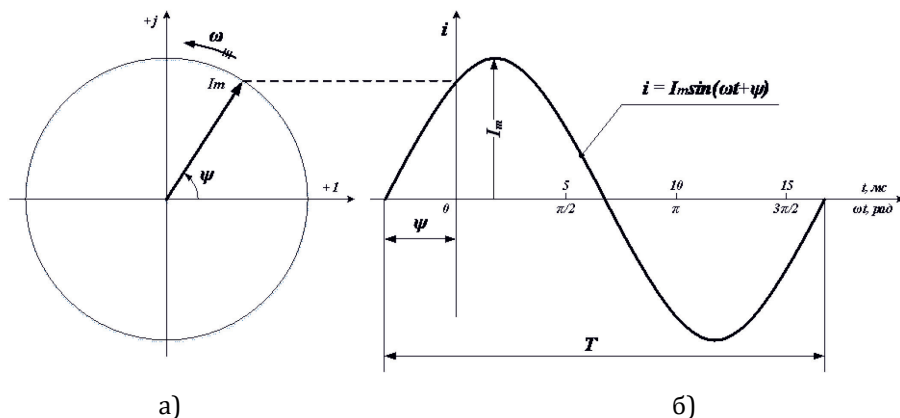


Рис. 1.1. Графическое представление синусоидального тока с начальным фазовым углом $\psi=60^\circ$ на временной диаграмме

Значение переменного синусоидального тока (напряжения), соответствующее какому-либо моменту времени, называется мгновенным значением и выражаются формулой:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) \quad (1.1)$$

где I_m — амплитудное (максимальное) значение тока (А); ω — угловая скорость (рад/с); ψ — угол который называется начальной фазой (рад); угол $(\omega t + \psi)$ — называется фазным углом (рад); T — промежуток времени, в течение которого ток претерпевает один полный цикл изменений, называется периодом переменного тока (мс); f — число периодов в секунду, называется частотой (Гц). В большинстве стран мира частота в электрической сети $f = 50$ Гц.

Между приведенными величинами соблюдаются следующие соотношения:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}; T = \frac{1}{f}. \quad (1.2)$$

Отрезок I_m представляет собой вектор синусоидальной величины — силы тока, который вращается с постоянной угловой скоростью ω против направления вращения часовой стрелки¹. За время одного периода T он проворачивается на 2π рад.

Согласно выражению синусоидальной функции $y = \sin x$ начальный момент отсчета времени для синусоиды должен начинаться с нуля, но в общем случае данный момент не совпадает с прохождением через нуль синусоидальной величины и в связи с этим на (рис. 1.1, б) вектор I_m в начальный момент образует с горизонтальной осью угол ψ .

Синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ создается синусоидальной электродвижущей силой (э. д. с.) источников энергии $e = E_m \sin(\omega t + \psi_u)$, где e — мгновенное значение э. д. с. (В); E_m — амплитудное значение э. д. с. (В); ψ_u — начальная фаза э. д. с.

Если в одной электрической цепи э. д. с. и ток одновременно проходят через нулевое значение, то они сдвинуты относительно друг друга (рис. 1.2), и этот сдвиг фаз равен разности их начальных фаз: $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

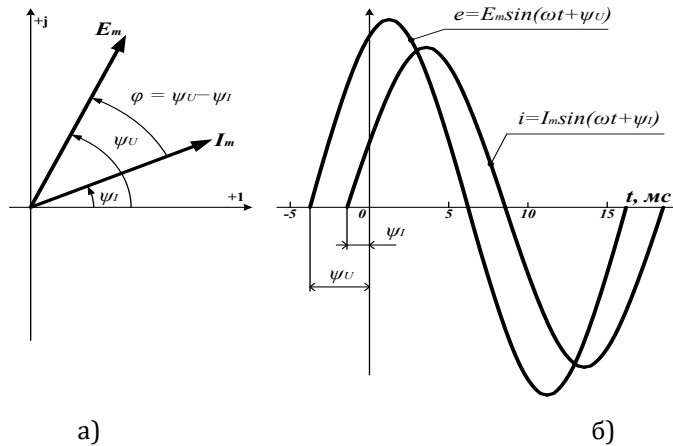


Рис. 1.2. Векторы (а) и кривые мгновенных значений (б) э. д. с. и тока при наличии между ними сдвига фаз

¹ По принятым в электротехнике правилам направление вращения против часовой стрелки является положительным.

Угол сдвига фаз между током и напряжением φ на участке электрической цепи зависит от характера сопротивления данного участка и в общем случае определяется по формуле:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right) \quad (1.3)$$

При измерениях величин тока и напряжения оценивают его действующее (эффективное) значение — величина эквивалентного постоянного тока, который в течение периода T производит то же тепловое и механическое действие, что и рассматриваемый переменный ток.

Т. е. для практических целей используют не амплитудное значение, а действующее:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_m \quad (1.4)$$

Для электроснабжения наибольшее распространение получил трехфазный переменный синусоидальный ток, который представляет собой совокупность трех однофазных цепей переменного тока, в которых действуют э. д. с. одной частоты, но сдвинутые относительно друг друга на 120 градусов, (рис. 1.3) [1].

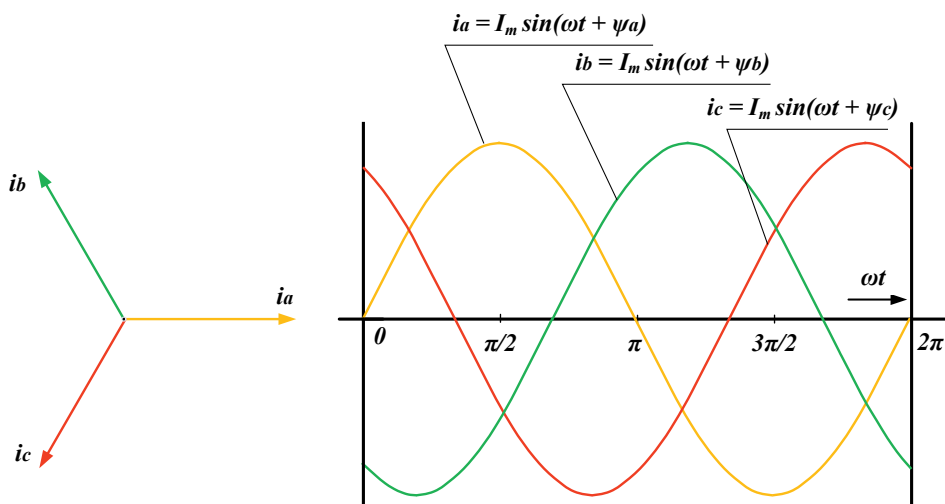


Рис. 1.3. Графическое представление векторной диаграммы (а) и временной диаграммы (б) трехфазного переменного синусоидального тока

Если ЭДС фазы А принять за исходную, т. е. совместить с вещественной осью комплексной плоскости, то ЭДС обмоток (фаз) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin (\omega t - 120^\circ) = E_m \sin (\omega t + 240^\circ); \\ e_C &= E_m \sin (\omega t - 240^\circ) = E_m \sin (\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Такая трехфазная система ЭДС называется *симметричной системой*. Комплексы действующих значений фазных ЭДС будут

$$\dot{E}_A = E; \dot{E}_B = \dot{E}_A e^{-j120^\circ} = \dot{E}_A e^{j240^\circ}; \dot{E}_C = \dot{E}_A e^{-j240^\circ} = \dot{E}_A e^{j120^\circ} \quad (1.6)$$

Обозначим множитель e^{j120° через a и будем называть **оператором трехфазной цепи**. Тогда

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -0,5 + j0,866;$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ = -0,5 - j0,866. \quad (1.7)$$

Теперь комплексы действующих значений фаз можно записать и в виде

$$\dot{E}_A = E; \dot{E}_B = a^2 \dot{E}_A; \dot{E}_C = a \dot{E}_A \quad (1.8)$$

Алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС симметричной системы в любой момент времени равна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0, \quad (1.9)$$

или в комплексной форме $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

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

Рассмотренная система ЭДС образует **прямой** порядок следования фаз (ABC) [1–4].

1.2. Основные виды соединений трехфазных цепей

Совокупность источников трехфазной системы ЭДС, трехфазных нагрузок и соединительных проводов называют **трехфазной цепью**.

Существуют различные способы соединения обмоток трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой.

В целях экономии соединительных проводов фазы генератора (нагрузки) обычно соединяют звездой или треугольником. При этом число соединительных проводов уменьшается до трех или четырех.

1.3. Соединение звездой

Объединим три обратных провода в один общий (нулевой). Для этого концы трех фаз генератора (X, Y, Z) соединим в общую (нулевую) точку O , а концы трех фаз потребителя (x, y, z) — в общую (нулевую) точку O' (рис. 1.4). Такая схема соединения называется «звезда — звезда с нулевым проводом».

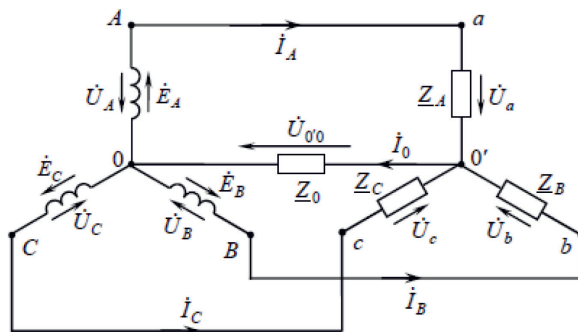


Рис. 1.4. Схема соединения «звезда — звезда с нулевым проводом»

В трехфазных цепях различают **фазные** и **линейные** величины напряжений и токов. Провода, соединяющие генератор с нагрузкой, называются **линейными проводами**, а протекающие по ним токи — **линейными токами** ($\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$). Напряжения между линейными проводами называются **линейными напряжениями** $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ на источнике и $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ на нагрузке.

Каждую из трех обмоток генератора называют **фазой генератора**; каждую из трех нагрузок — **фазой нагрузки**. Протекающие по фазам токи называются **фазными токами** ($\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$), а напряжения на фазах — **фазными напряжениями** $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ на генераторе и $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ на нагрузке.

Напряжение между нулевыми точками источника и нагрузки называется **напряжением смещения нейтрали** $\dot{U}_{0'0}$.

Нулевым (нейтральным) проводом называют провод, соединяющий нулевые точки генератора (0) и нагрузки (0') [2].

1.4. Законы Кирхгофа

Ток нулевого провода \dot{I}_0 находится по **первому закону Кирхгофа** и равен сумме фазных токов:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (1.10)$$

Как видно (см. рис. 1.4), **при соединении звездой фазный ток равен соответствующему линейному току**:

$$\dot{I}_\Phi = \dot{I}_\text{л}$$

Выразим линейные напряжения $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ через фазные $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$. Для этого запишем уравнения по **второму закону Кирхгофа** для трех контуров, образованных одним из линейных напряжений и двумя фазными напряжениями (рис. 1.5):

$$\dot{U}_A - \dot{U}_{AB} - \dot{U}_B = 0; \quad \dot{U}_B - \dot{U}_{BC} - \dot{U}_C = 0; \quad \dot{U}_C - \dot{U}_{CA} - \dot{U}_A = 0 \quad (1.11)$$

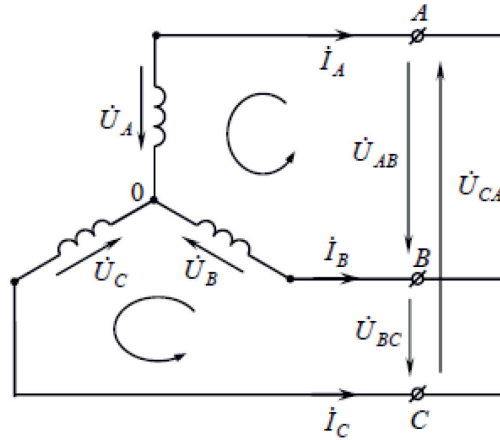


Рис. 1.5. Соединение звездой

Получаем:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (1.12)$$

При соединении звездой в общем случае линейное напряжение равно разности соответствующих фазных напряжений.

Аналитический расчет трехфазных цепей полезно сопровождать построением векторных диаграмм токов и напряжений. Векторные диаграммы облегчают нахождение углов между токами и напряжениями, делают все соотношения более наглядными [1-4].

1.5. Соединение треугольником

Если конец одной фазы источника (рис. 1.6) или нагрузки соединим с началом другой ($X — с B, Y — с C, Z — с A$), то получим соединение треугольником.

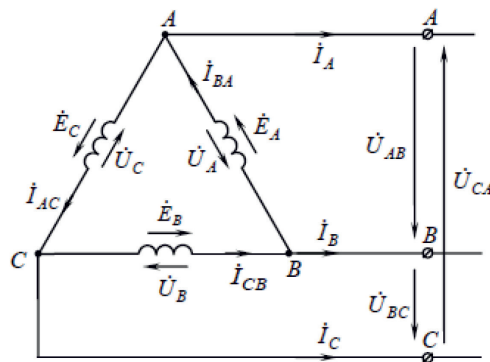


Рис. 1.6. Соединение треугольником

Из схемы (см. рис. 1.6) видно, что

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C. \quad (1.13)$$

т. е. при соединении треугольником линейные напряжения равны соответствующим фазным напряжениям:

$$\dot{U}_л = \dot{U}_ф$$

Выразим линейные токи через фазные. Для этого запишем уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов A , B и C (см. рис. 1.6). Получим:

$$\dot{I}_{BA} - \dot{I}_A + \dot{I}_{AC} = 0; \dot{I}_{CB} - \dot{I}_B + \dot{I}_{BA} = 0; \dot{I}_{AC} - \dot{I}_C + \dot{I}_{CB} = 0, \quad (1.14)$$

откуда имеем

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{BA} - \dot{I}_{AC}; \dot{I}_B = \dot{I}_{CB} - \dot{I}_{BA}; \dot{I}_C = \dot{I}_{AC} - \dot{I}_{CB} \quad (1.15)$$

Из уравнений видно, что **в общем случае при соединении треугольником линейный ток равен разности соответствующих фазных токов [1-5].**

Выводы к главе 1

Изобретателем переменного тока считается П. Н. Яблочков, разработавший трансформатор и питавший от него электрическую свечу. Закон изменения переменного тока может быть разным, поэтому принято разделять цепи на 2 вида: синусоидального и несинусоидального переменного тока. В свою очередь переменный синусоидальный ток может быть однофазный и многофазный (трёхфазный). В данном пособии рассматриваются вопросы, связанные с применением трёхфазного переменного тока в цепях электропитания электроэнергией, основные виды соединений трёхфазных цепей звездой и треугольником, законы Кирхгофа.

Контрольные вопросы

1. Приведите основные определения и понятия теории электрических цепей переменного тока.
2. Как графически изображается переменное синусоидальное напряжение?
3. В чем разница между действующими и амплитудными значениями синусоидальных величин?
4. Запишите и расшифруйте математическое выражение мгновенного синусоидального тока.
5. Запишите и расшифруйте математическое выражение мгновенного синусоидального напряжения.
6. Что такое симметричная система ЭДС (напряжений, токов)?

7. Какое соединение называется «звезда»?
8. Какое напряжение называется фазным?
9. Какое напряжение называется линейным?
10. Какой ток называется фазным током?
11. Какой ток называется линейным током?
12. Как подсчитать ток нулевого провода?
13. Какую роль играет нулевой (нейтральный) провод?
14. В каких случаях находят применение трехпроводная и четырехпроводная системы при соединении приемника звездой?
15. Какое соединение называется «треугольник»?
16. Почему фазы генератора обычно соединяют звездой, а не треугольником?
17. Какая нагрузка трехфазной цепи называется симметричной?
18. Для чего необходимо знать порядок следования фаз трехфазной системы?

Список тем для рефератов и докладов

1. Основные определения и понятия теории цепей.
2. Схема электрической цепи, её элементы.
3. Исследование электрической цепи при помощи уравнений Кирхгофа.
4. Метод составления и решения уравнений по законам Кирхгофа.
5. Метод контурных токов.
6. Метод наложения.
7. Метод преобразований.
8. Метод узловых напряжений.
9. Метод эквивалентного генератора.
10. Основные понятия о синусоидальном переменном токе.
11. Действующие и средние периодические ЭДС и токи.
12. Применение законов Ома и Кирхгофа для цепей переменного тока.

ГЛАВА 2. Векторные диаграммы. Построение и применение для анализа процессов в электрических сетях

Как было сказано в предыдущей главе синусоидальный переменный ток (напряжение) можно представить в виде вектора на комплексной плоскости или синусоиды — временной диаграммы мгновенных значений. В практике эксплуатации для анализа электрических параметров действия (сложение, вычитание) мгновенных значений крайне громоздки.

2.1. Вектор тока на комплексной плоскости

Мгновенный синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_I)$, в определенный момент времени можно представить, как комплексную величину $\underline{I} = I_a + jI_p$ или $\underline{I} = I_m e^{j\psi_I}$ (рис. 2.1).

Где I_a — является действительной частью комплексного числа, I_p — мнимая часть комплексного числа, $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

При этом модуль комплексного числа $|I| = I_m = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$, аргумент комплексного числа $\psi_I = \arctg(I_p/I_a)$. (2.1)

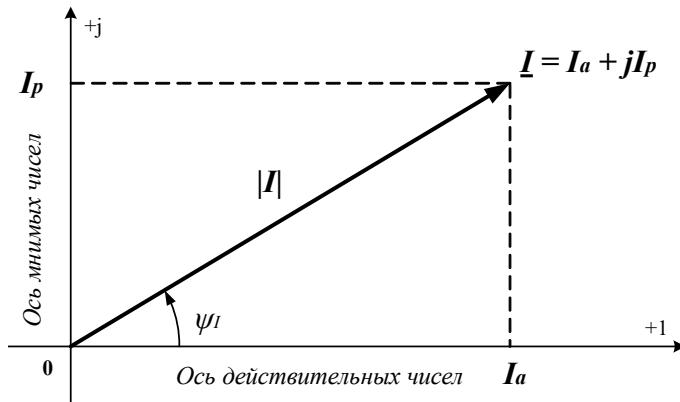


Рис. 2.1. Вектор тока на комплексной плоскости

Величина действительной части комплексного числа I_a является проекцией модуля $|I|$ на ось действительных чисел и определяется как $I_a = |I| \cos \psi_I$, величина мнимой части I_p — проекцией на ось мнимых чисел, $I_p = |I| \sin \psi_I$.

Комплексная форма представления синусоидальных сигналов векторами является более наглядной и позволяет выполнять различные действия с векторами (сложение, вычитание, умножение), не прибегая к громоздким вычислениям.

Т. к. величины токов и напряжений измеряются в действующих величинах (т. е. $I_m/\sqrt{2}$), то длины векторов токов и напряжений на векторных диаграммах представляют в действующих значениях.

В комплексной форме полную мощность электрической цепи S можно выразить как произведение двух векторов напряжения и тока (рис. 2.2, а):

$$S = \dot{U} \dot{I} e^{j(\psi_U + \psi_I)} = \dot{U} \dot{I} e^{\pm j\varphi} = S e^{\pm j\varphi} = UI \cos\varphi \pm jUI \sin\varphi$$

или

$$S = UI_a \pm jUI_P = P \pm jQ \quad (2.2)$$

где P — активная мощность, Вт; Q — реактивная мощность, кВАр.

Знак \pm зависит от соотношения $X_L - X_C$, при $X_L > X_C$ будет знак «+», в случае $X_L < X_C$, будет «-».

Таким образом из формулы математически активная мощность P определяется только активной составляющей полного тока I_a , которая совпадает по фазе с напряжением, т. е. вектор P совпадает по фазе с вектором напряжения U .

При этом вектор полной мощности S совпадает по фазе с вектором полного тока I (рис. 2.2, б) [1–5].

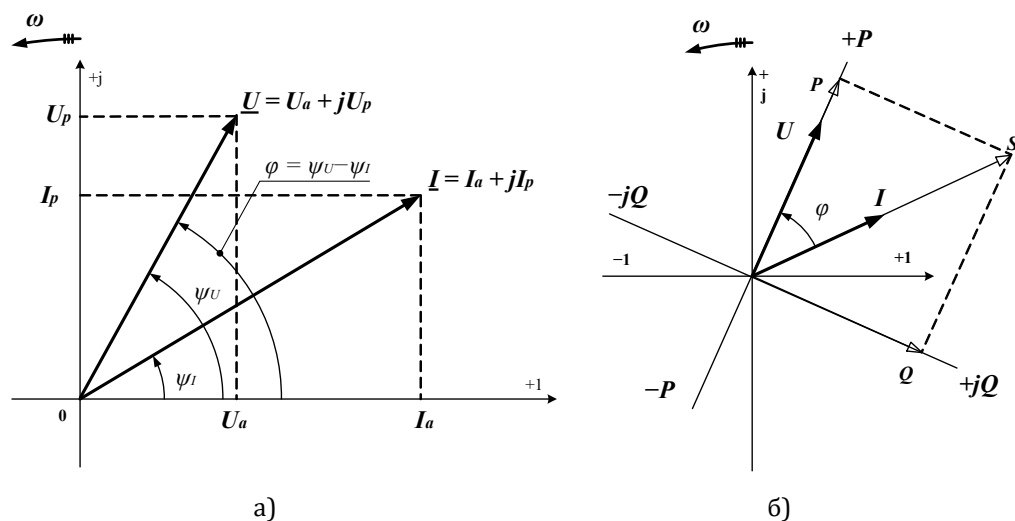


Рис. 2.2. Векторные диаграммы, а) тока и напряжения, б) полной мощности

2.2. Векторная диаграмма направления мощности

В технике РЗА исторически так сложилось, что направление мощности (активной или реактивной) считается положительным если она направлена от шин в линию и отрицательной если направлена из линии к шинам.

Анализируя выражение $S = UI\cos\varphi \pm jUI\sin\varphi$ можно сделать следующий вывод, что направление полной мощности зависит от величины угла между напряжением и током φ .

Таким образом, зная величину угла φ (угла между напряжением и током) можно указать в каком направлении протекает мощность, (рис. 2.3) [1, 2, 5].

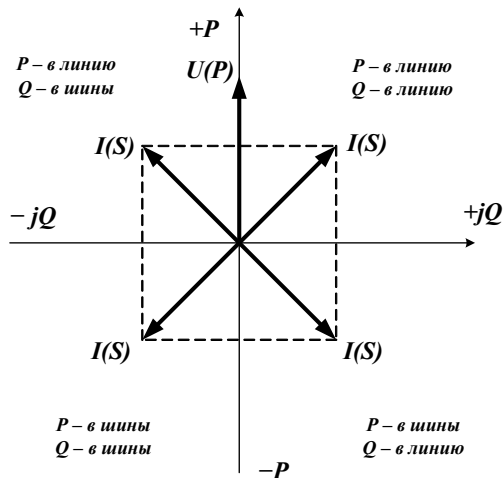


Рис. 2.3. Векторная диаграмма направления мощности

2.3. Электрическая цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

В электрической цепи, содержащей только активное сопротивление (рис. 2.4, а), ток I_R создается действием напряжения U_R источника энергии. При этом:

$$R = \frac{U_R}{I_R} \quad (2.3)$$

Ток, проходящий через активное сопротивление, преобразуется в тепловую энергию, такое преобразование является необратимым.

При этом угол сдвига фаз между током и напряжением составит:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{0}{R} = 0 \quad (2.4)$$

Таким образом, в электрической цепи, содержащей только активное сопротивление, напряжение и ток совпадают по фазе (рис. 2.4, б).

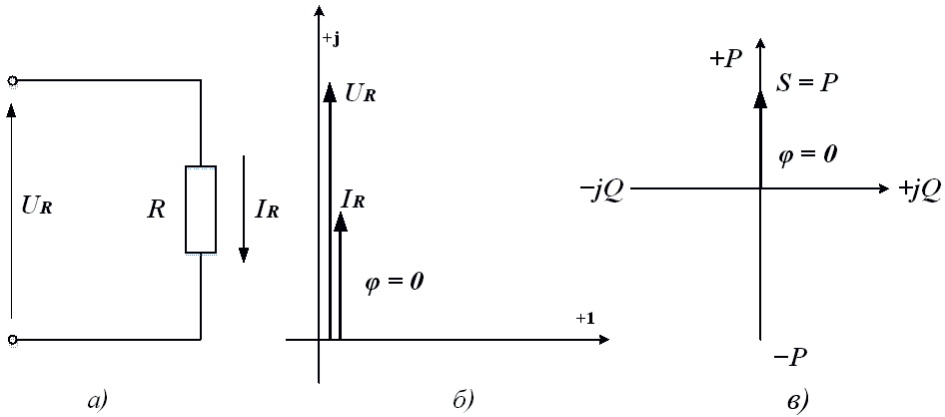


Рис. 2.4. Электрическая цепь переменного тока с активным сопротивлением: а) электрическая цепь, б) векторная диаграмма тока и напряжения, в) векторная диаграмма мощности

Векторная диаграмма полной мощности для электрической цепи с активным сопротивлением определяется только активной мощностью, (рис. 2.4, в).

В электрической цепи, содержащей только индуктивность L , происходит преобразование электрического тока в энергию магнитного поля, накопление и обратное преобразование (рис. 2.5, а).

При этом индуктивность обладает реактивным сопротивлением, которое называется индуктивным.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (2.5)$$

где L — индуктивность, Гн.

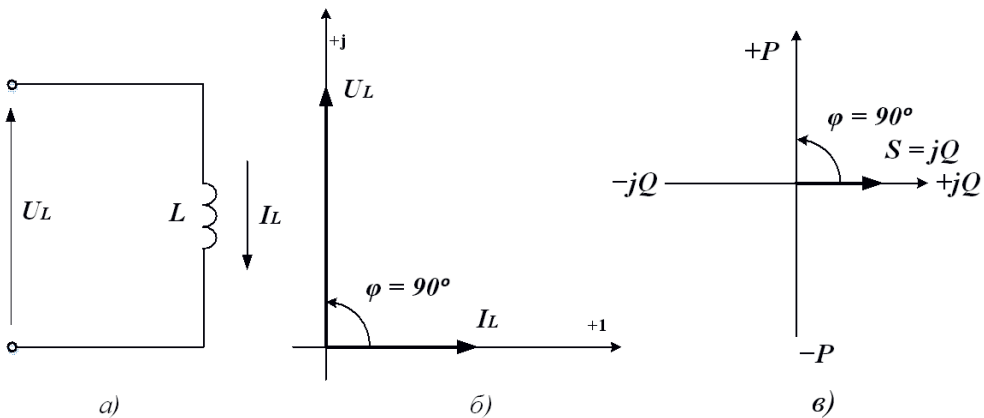


Рис. 2.5. Электрическая цепь переменного тока с индуктивностью: а) электрическая цепь, б) векторная диаграмма тока и напряжения, в) векторная диаграмма мощности

При этом угол сдвига фаз между током и напряжением составит:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R} = \arctg \frac{X_L}{0} = 90^\circ \quad (2.6)$$

Таким образом, в электрической цепи, содержащей только индуктивное сопротивление напряжение, опережает ток на угол 90° .

Векторная диаграмма полной мощности для электрической цепи с реактивным индуктивным сопротивлением определяется реактивной мощностью, (рис. 2.5, в).

В емкости C электрический ток преобразуется в энергию электрического заряда, накопление и обратное преобразование.

Емкостное сопротивление X_C :

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.7)$$

где C — емкость, Ф.

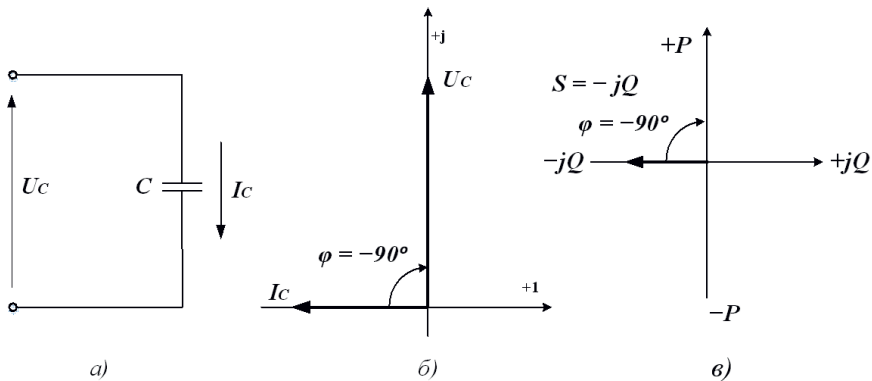


Рис. 2.6. Электрическая цепь переменного тока с емкостью: а) электрическая цепь, б) векторная диаграмма тока и напряжения, в) векторная диаграмма мощности

При этом угол сдвига фаз между током и напряжением составит:

$$\varphi = \arctg \frac{-X_C}{R} = \arctg \frac{-X_C}{0} = -90^\circ \quad (2.8)$$

Таким образом, в электрической цепи, содержащей только емкостное сопротивление напряжение, отстает от тока на угол -90° .

Взаимосвязь между величиной напряжения и тока в электрической цепи переменного тока характеризуется полным сопротивлением Z , которое в свою очередь состоит из активного сопротивления R , индуктивности L и емкости C .

Полное сопротивление Z при последовательном соединении активного R , индуктивного X_L и емкостного X_C , сопротивлений можно записать как:

$$Z = R + jX_L - jX_C = R \pm jX \quad (2.9)$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru