

В.Ф. КАЛИНИН, В.М. ИВАНОВ, Е.А. ПЕЧАГИН

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХПОЛЮСНИКОВ В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ



УДК (621.039.637:544.013)(075.8)

ББК ζ 211я73-я-5

K172

Р е ц е н з е н т ы:

Заведующий кафедрой физики ТГУ им. Г.Р. Державина,
доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

В.А. Фёдоров

Профессор кафедры "Биомедицинская техника" ТГТУ,
доктор технических наук, заслуженный изобретатель РФ

Е.И. Глинкин

Калинин, В.Ф.

K172 Режимы работы трёхполюсников в электрооборудовании :
учебно-методический комплекс / В.Ф. Калинин, В.М. Иванов,
Е.А. Печагин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. –
152 с. – 150 экз. – ISBN 978-5-8265-0894-7.

Обобщены сведения о свойствах и методах анализа трёхфазных электрических цепей. Большое внимание уделяется синтезу и диагностике данных цепей с наперёд заданными характеристиками и способам экспериментального определения параметров реального промышленного электрооборудования.

Представлено достаточное количество разнообразных задач по данному направлению с решениями, что даёт возможность использования учебного пособия при обучении студентов специальностей 110302, 140106, 140211, 190601.

УДК (621.039.637:544.013)(075.8)

ББК ζ 211я73-я-5

ISBN 978-5-8265-0894-7

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный
технический университет" (ТГТУ), 2010

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"

В.Ф. КАЛИНИН, В.М. ИВАНОВ, Е.А. ПЕЧАГИН

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХПОЛЮСНИКОВ В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

Рекомендовано Учёным советом университета
в качестве учебного пособия



Тамбов
Издательство ТГТУ
2010

Учебное издание

КАЛИНИН Вячеслав Фёдорович,
ИВАНОВ Владимир Михайлович,
ПЕЧАГИН Евгений Александрович

**РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЁХПОЛЮСНИКОВ
В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ**

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 05.02.2010.
Формат 60 × 84/16. 8,83 усл. печ. л. Тираж 150 экз. Заказ № 64

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Жизнь современного человека и, тем более, цивилизованной страны немислима без электричества. Потоки электроэнергии, рождаась на электростанциях, растекаются к городам и заводам, разбиваясь на ручьи, проникают в каждый дом, достигая самых удалённых электроприёмников.

Устойчивость в работе энергосистем, надёжность и безаварийность – одна из главных забот энергетиков. То, что отечественные энергосистемы продолжают функционировать, есть несомненная заслуга специалистов. Они внимательно управляют непрерывными процессами производства и распределения электроэнергии, бдительно защищают от повреждений и бережно поддерживают электрооборудование в исправном состоянии.

У истоков современных трёхфазных электропередач стоял М.О. Доливо-Добровольский – русский инженер, учёный, отличавшийся широтой и тонкостью ума, умением практического воплощения идей и даром предвидеть будущее. Он занимался многими проблемами электротехники (в фирме, которая сегодня носит название АВВ): машинами постоянного и переменного тока, измерительными приборами, электролизом, телефонией. Но главный итог его жизни – создание системы трёхфазного тока.

Следует отметить, что знакомство электротехников с трёхфазной системой проходило не без затруднений. Было непонятно, как это по трём проводам могут проходить три разных тока. Электрики в то время привыкли к тому, что каждый ток должен по одному проводу направляться к потребителю, а по второму – возвращаться. М.О. Доливо-Добровольский наглядно показал, что в системе с разностью фаз 120° ($2\pi/3$) алгебраическая сумма трёх токов или напряжений в каждый момент времени равняется нулю.

Возможность получения вращающегося магнитного поля в электрических машинах банальными и надёжными способами и очевидные практические достоинства стали важнейшими факторами, обеспечившими триумф трёхфазной системы.

Благодаря изобретениям и усилиям М.О. Доливо-Добровольского трёхфазная система убедительно продемонстрировала свои достоинства: короткозамкнутые асинхронные трёхфазные двигатели неприхотливы, надёжны и компактны; двигатели с фазным ротором позволяют регулировать пусковые токи и механические характеристики; трёхфазные трансформаторы надёжны и экономичны.

Достоинство трёхфазной системы при дальних передачах больших мощностей были продемонстрированы в 1891 г. при испытаниях линии электропередачи в Германии от Лондонской гидроэлектростанции до города Франкфурт на Майне. Линия имела протяжённость 170 км и была выполнена на деревянных опорах высотой 8...10 м, со средним пролётом 60 м. По линии передавалась мощность около 220 кВт при напряжении 15 кВ. Фактический КПД линии составил 0,75. Позже были проведены повторные испытания линии при напряжении 28,3 кВ. Испытания подтвердили, что при увеличении напряжения КПД линии возрастает.

Многие специалисты были восхищены блестящим комплексным решением проблемы передачи и распределения электрической энергии в трёхфазной системе и начался бурный процесс освоения линий более высокого напряжения и улучшения их параметров.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРЁХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Трёхфазная электрическая цепь может быть представлена как совокупность трёх однофазных цепей, в которой действуют ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга на одну треть периода или, что то же самое, на угол $2\pi/3$.

Эти три составные части трёхфазной цепи называются фазами и им будем приписывать буквенные обозначения A , B , C . Таким образом, термин "фаза" в электротехнике обозначает два понятия: угол, определяющий стадию периодического процесса, и составную часть трёхфазной цепи.

Изобразим трёхфазную цепь, фазы которой не связаны друг с другом (рис. 1). Такую трёхфазную цепь называют несвязанной (в настоящее время не применяется).

Фазы A , B , C изображены под углом 120° для того чтобы подчеркнуть, что напряжения источников u_A , u_B , u_C сдвинуты относительно друг другу на одну треть периода. Следовательно,

$$u_A = U_T \sin \omega t; \quad u_B = U_T \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \quad u_C = U_T \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Кривые, изображающие эти напряжения, показаны на рис. 2.

При равенстве амплитуд U_m напряжений и одинаковых сопротивлениях нагрузки Z в фазах токи i_A, i_B, i_C также равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на одну треть периода, образуя так называемый трёхфазный ток. Сумма этих токов в любой момент времени равна нулю: $i_A + i_B + i_C = 0$.

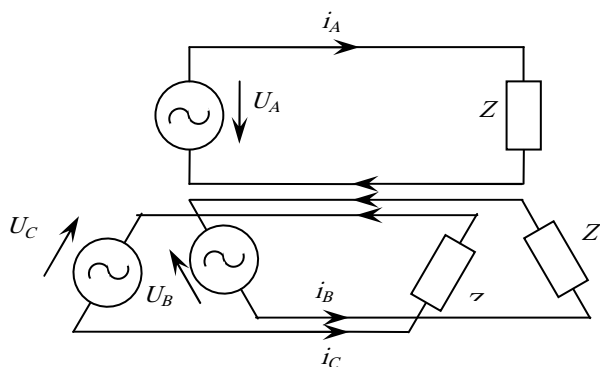


Рис. 1

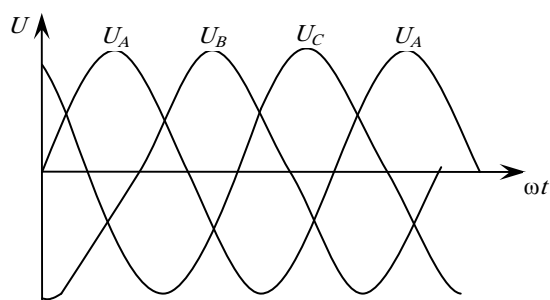


Рис. 2

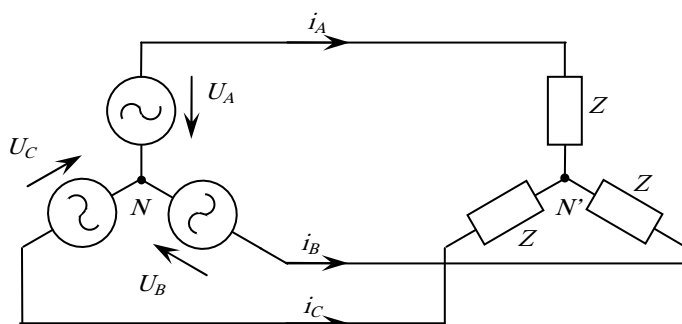


Рис. 3

Поэтому, если три провода, по которым токи возвращаются к источникам, объединить в один, то ток в этом проводе будет равен нулю. При отсутствии в проводе тока излишним в данном случае является и сам провод, от него можно отказаться, перейдя к схеме рис. 3.

В результате этого достигается экономия материала проводов; кроме того, по сравнению с несвязанной трёхфазной цепью исключаются потери мощности от токов i_A, i_B, i_C в обратном проводе.

Трёхфазная цепь (рис. 3), фазы которой соединены электрически, представляет одну из разновидностей так называемых связанных трёхфазных цепей.

Необходимо отметить, что для получения связанной трёхфазной цепи не требуются отдельные однофазные генераторы, а используется один трёхфазный генератор.

Обмотки трёхфазного генератора могут быть соединены либо звездой, либо треугольником. При соединении звездой концы обмоток соединяют в общую точку, которую называют нейтральной. Начало обмоток обозначают A, B, C ; концы – x, y, z (рис. 4, а). Начала обмоток

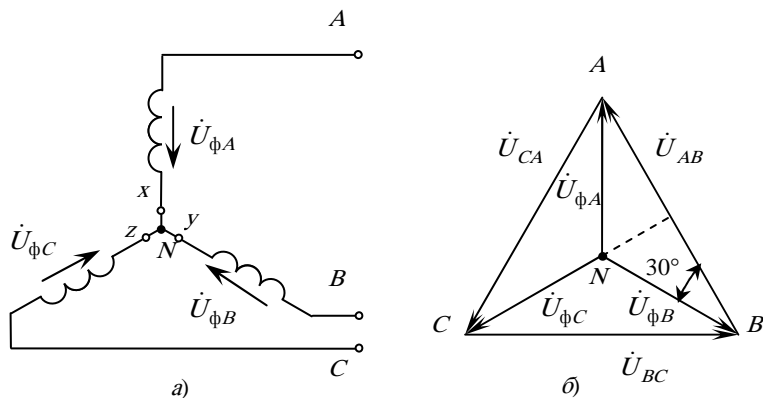


Рис. 4

соединяют с нагрузкой линейными проводами, по которым идут линейные токи.

Будем в дальнейшем пользоваться следующей терминологией: ЭДС, индуцируемые в обмотках генератора или трансформатора, напряжения на зажимах обмоток и токи в них называть фазными ЭДС, напряжениями и токами, а напряжения между линейными проводами и токи в них – линейными напряжениями и токами. На схеме (рис. 4, а) $U_{\phi A}$, $U_{\phi B}$, $U_{\phi C}$ – комплексы фазных напряжений генератора; U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – комплексы линейных напряжений. Абсолютные значения этих напряжений являются их модулями, т.е.

$$|U_{\phi A}| = |U_{\phi B}| = |U_{\phi C}| = U_{\phi};$$

$$|U_{AB}| = |U_{BC}| = |U_{CA}| = U_{л}.$$

Связь между линейными и фазными напряжениями устанавливается на основании второго закона Кирхгофа:

$$U_{AB} = U_A - U_B; \quad U_{BC} = U_B - U_C; \quad U_{CA} = U_C - U_A.$$

Топографическая векторная диаграмма линейных и фазных напряжений генератора приведена на рис. 4, б.

Из векторной диаграммы следует, что при соединении генератора звездой линейные напряжения равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на угол $2\pi/3$.

На основании геометрических соображений легко показать, что между фазными и линейными напряжениями при соединении звездой существует следующее соотношение:

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}.$$

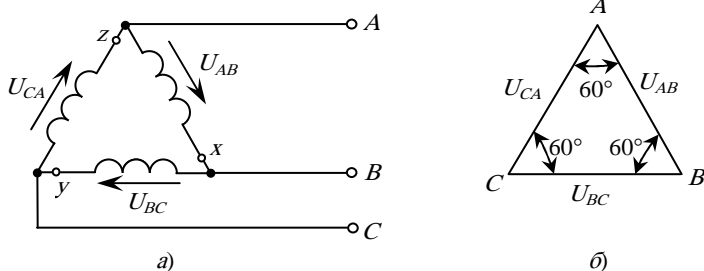


Рис. 5

Действительно из треугольника (рис. 4, б) следует

$$U_{AB} = 2U_{\phi B} \cos 30^\circ = 2U_{\phi B} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_{\phi B}.$$

При соединении генератора треугольником конец первой фазы соединяется с началом второй фазы, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой (рис. 5, а).

Топографическая диаграмма напряжений приведена на рис. 5, а. Векторная диаграмма напряжений показана на рис. 5, б.

Общие точки соединённых обмоток генератора выводятся на зажимы, к которым присоединяются линейные провода или нагрузка.

Нагрузка (потребитель) в трёхфазной цепи также может быть соединена звездой или треугольником.

2. СИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Трёхфазные цепи представляют собой разновидность цепей синусоидального тока и поэтому расчёт и исследование их производятся теми же методами, что и для однофазных цепей. Расчёт трёхфазной цепи, так же как и расчёт всякой сложной цепи, ведётся обычно в комплексной форме. Ввиду того что фазные ЭДС и напряжения генератора сдвинуты относительно друг друга на 120° , для краткости математической записи применяется фазовый оператор – комплексная величина:

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Умножение вектора на оператор a означает поворот вектора на 120° в положительном направлении (против хода часовой стрелки), соответственно умножение вектора на a^2 означает поворот вектора на 240° в положительном направлении или, что то же самое, поворот вектора на 120° в отрицательном направлении:

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Три вектора 1 , a и a^2 образуют симметричную трёхфазную систему векторов. При этом $1 + a + a^2 = 0$. При помощи оператора a можно, например, записать напряжения фаз трёхфазной системы как

$$U_{\phi A}; \quad U_{\phi B} = a^2 U_{\phi A}; \quad U_{\phi C} = a U_{\phi A}.$$

На практике применяются различные комбинации соединений, например, генератор и нагрузка соединяются звездой, генератор может быть соединен звездой, а нагрузка – треугольником и т.д.

На рисунке 6, а показано соединение нагрузки звездой. На схеме обозначены: I_A, I_B, I_C – линейные токи; U_A, U_B, U_C – фазные напряжения нагрузки; Z – сопротивления нагрузки.

В этой схеме комплексы фазных напряжений источника и комплексы фазных напряжений нагрузки соответствующих фаз равны между собой, т.е.

$$U_{\phi A} = U_A; \quad U_{\phi B} = U_B; \quad U_{\phi C} = U_C.$$

Векторная диаграмма напряжений и токов имеет вид, показанный на рис. 6, б. Ток в каждой фазе отстаёт от напряжения той же фазы на угол

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R},$$

где R и X – активное и реактивное сопротивления фаз.

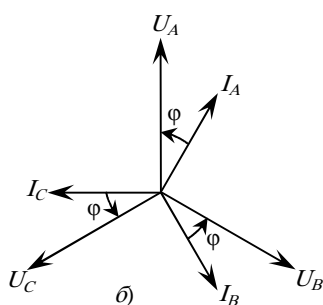
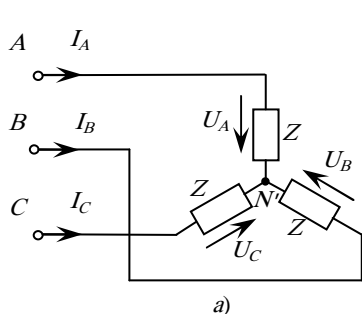


Рис. 6

Ток в каждой из фаз находят так же, как и в однофазной цепи. Например, в фазе A

$$I_A = \frac{U_A}{Z}.$$

Соответственно токи в фазах B и C выражаются через ток I_A :

$$I_B = e^{-j120^\circ} I_A; \quad I_C = e^{j120^\circ} I_A.$$

Таким образом, при симметричном режиме работы трёхфазной цепи задача сводится к расчёту одной из фаз аналогично расчёту однофазной цепи.

Линейное напряжение определяется как разности соответствующих фазных напряжений. Например:

$$U_{AB} = U_A - U_B = U_A(1 - a^2) = \sqrt{3}U_A \angle 30^\circ.$$

При соединении нагрузки треугольником (рис. 7, а) сопротивления отдельных фаз находятся под линейными напряжениями, поэтому фазные токи в них определяются по закону Ома:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z}; \quad I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z} = a^2 I_{AB}; \quad I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z} = a I_{AB}$$

Линейные токи определяются на основании первого закона Кирхгофа. Так, линейный ток фазы A равен

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} = I_{AB}(1 - a) = I_{AB}\sqrt{3}\angle -30^\circ,$$

т.е. линейный ток I_A отстаёт по фазе на 30° от тока I_{AB} , причём модуль его в $\sqrt{3}$ раз больше фазного тока I_{AB} . Таким образом, при симметричном режиме работы цепи имеет место следующее соотношение:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}.$$

Векторная диаграмма линейных напряжений и токов при соединении нагрузки треугольником показана на рис. 7, б. Как и при соединении звездой, угол сдвига фаз равен

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}.$$

Активная мощность симметричной трёхфазной цепи равна

$$P = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi.$$

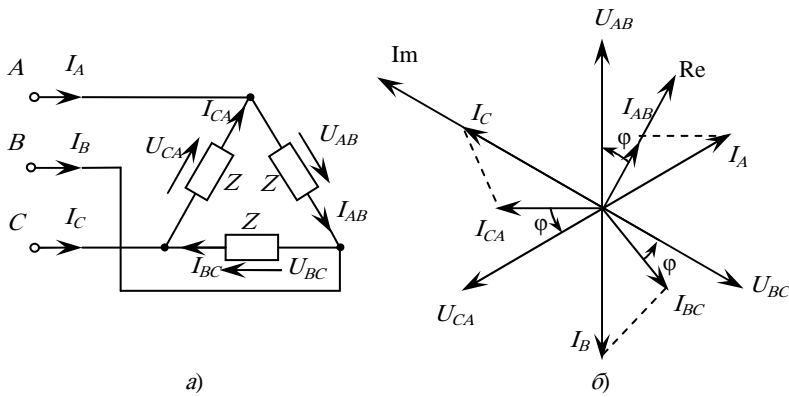


Рис. 7

При соединении нагрузки звездой

$$U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}; \quad I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}.$$

Поэтому активная мощность трёхфазной цепи, выраженная через линейные токи и линейные напряжения,

$$P = 3 \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

При соединении нагрузки треугольником

$$U_{\text{ф}} = U_{\text{л}}; \quad I_{\text{ф}} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}.$$

Активная мощность трёхфазной цепи будет такой же:

$$P = 3 U_{\text{л}} \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

Следовательно, независимо от схемы соединения нагрузки

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

Аналогично, реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi,$$

и полная мощность симметричной треугольной цепи

$$S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}.$$

При этом коэффициент мощности определяется из соотношения

$$\cos \varphi = \frac{P}{S},$$

где φ – угол сдвига фазного тока относительно соответствующего фазного напряжения.

3. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В СИММЕТРИЧНОЙ ТРЁХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Трёхфазное короткое замыкание является наиболее тяжёлым видом повреждения электрической сети (рис. 8)

Ток короткого замыкания изменяется в процессе короткого замыкания (рис. 9) по сложному закону, зависящему от многих факторов: мощности источника питания, времени затухания аperiodических токов, наличия автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) на генераторах и т.п.

В левой части графиков изображены кривые токов предшествующего нагрузочного режима. Пересечение оси токов i с осью времени t соответствует моменту возникновения короткого замыкания. В правой части графика показаны кривые токов i_k , i_n и i_a . Кривая i_k изображает ток короткого замыкания, фактически протекающий по цепи, или полный ток короткого замыкания. Кривые i_n и i_a соответствуют периодической и аperiodической слагающим полного тока i_k .

При коротком замыкании ток в электрической цепи возрастает. Однако мгновенного увеличения тока (кривая i_k) в обмотке статора генератора произойти не может из-за того, что обмотка статора и цепь короткого замыкания обладают индуктивностью.

Для генератора без АРВ, как видно из рис. 9, а, с исчезновением аperiodической слагающей неустановившийся процесс не заканчивается, так как изменение периодической слагающей тока короткого замыкания происходит более длительно. При

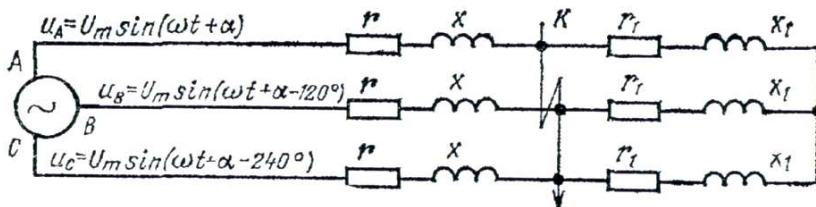


Рис. 8

этом амплитуды периодической слагающей уменьшаются от максимального начального $I_{\text{п.т.0}}$, до некоторого установившегося значения $I_{\text{п.т.∞}} = \sqrt{2} I_{\infty}$.

Благодаря магнитной связи между обмотками статора и ротора синхронной машины при возрастании периодического тока статора в момент возникновения короткого замыкания в обмотке ротора

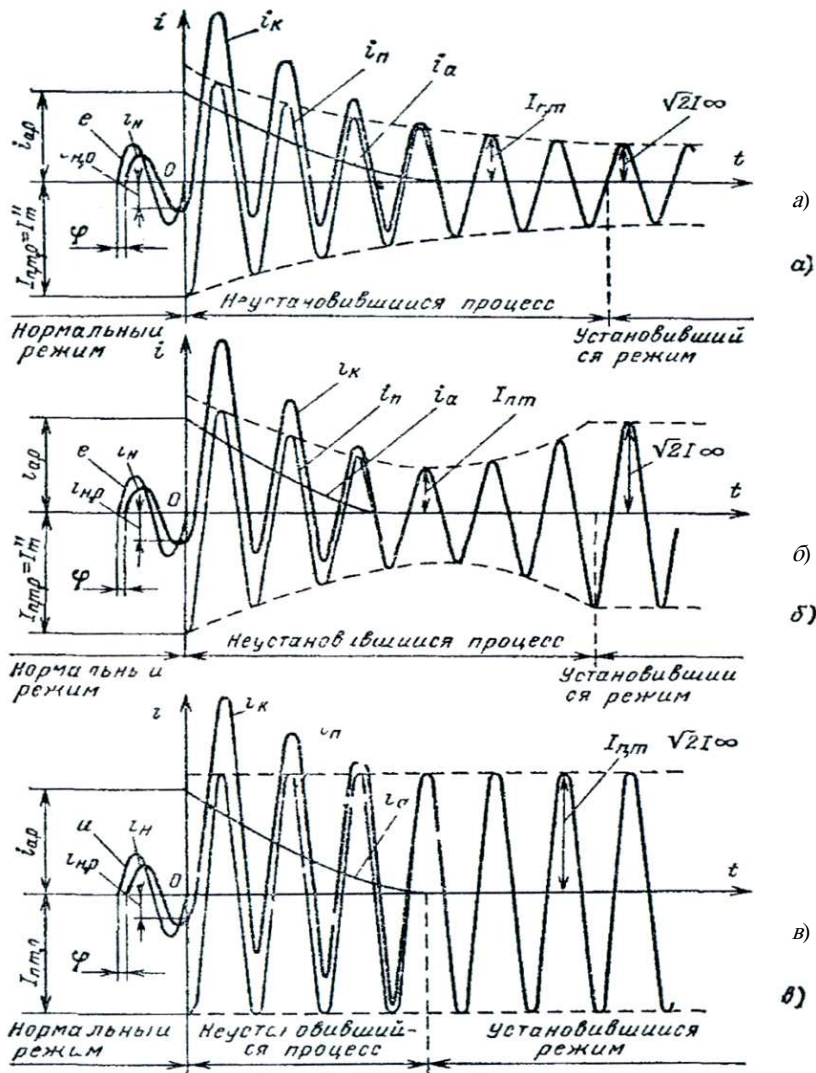


Рис. 9

наводится аperiodический индукционный ток, по направлению совпадающий с током обмотки возбуждения; в результате в начальный момент короткого замыкания результирующий магнитный поток обмотки возбуждения и ЭДС E'_q (или E_q) машины остаются без изменения.

Далее, с затуханием аperiodического тока в обмотке возбуждения результирующий магнитный поток, постепенно уменьшаясь, доходит до установившегося значения; одновременно уменьшается ЭДС и амплитуда периодической слагающей тока короткого замыкания. При достижении периодической слагающей тока короткого замыкания установившегося значения I_∞ неустановившийся процесс заканчивается. Длительность его определяется затуханием аperiodического тока в обмотке возбуждения и при коротком замыкании на выводах генератора составляет примерно 3...5 с.

Отличие процессов короткого замыкания для генераторов с АРВ (рис. 9, б) от рассмотренного случая (рис. 9, а) состоит в том, что снижение напряжения на выводах генератора при коротком замыкании вызывает действие АРВ, увеличивающего ток возбуждения. Однако вследствие инерционности действие АРВ практически становится заметным лишь через 0,08...0,3 с. Этим объясняется спад периодического тока по значению в первые периоды после возникновения короткого замыкания, подобный изменению периодической слагаемой для генератора без АРВ. Повышение возбуждения приводит к возрастанию ЭДС генератора и росту периодической слагающей тока статора вплоть до установившегося значения.

Кривые изменения аperiodической и периодической слагающих тока короткого замыкания и его результирующего значения при питании от системы неограниченной мощности представлены на рис. 9, в.

4. НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРЁХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Несимметричный режим работы трёхфазной цепи имеет место в том случае, когда комплексные сопротивления отдельных фаз нагрузки не равны между собой, т.е. $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$.

Расчёт токов и напряжений при несимметричном режиме производится теми же методами, которые применяются для расчёта сложных однофазных цепей. Рассмотрим несколько схем.

"Звезда-звезда" без нулевого провода. Схема, у которой источник и нагрузка соединены звездой, показана на рис. 10, а. Для расчёта цепи целесообразно воспользоваться методом двух узлов, на основании которого напряжение смещения нейтрали, т.е. напряжение между нулевыми точками источника и нагрузки, равно

$$U_N = U_{NN'} = \frac{U_{\phi A} Y_A + U_{\phi B} Y_B + U_{\phi C} Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C},$$

или, обозначив

$$U_{\phi A} = U_\phi; \quad U_{\phi B} = a^2 U_\phi; \quad U_{\phi C} = a U_\phi,$$

получим

$$U_N = U_\phi \frac{Y_A + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (1)$$

Уравнение (1) позволяет по заданным фазным напряжениям генератора и сопротивлениям приёмника $Z_A = \frac{1}{Y_A}$, $Z_B = \frac{1}{Y_B}$, $Z_C = \frac{1}{Y_C}$ определить напряжение смещения, нейтрали U_N , зная которое, легко найти напряжения на зажимах приёмников и вычислить ток в каждом из них.

Имеем

$$U_A = U_{\phi A} - U_N; \quad U_B = U_{\phi B} - U_N; \quad U_C = U_{\phi C} - U_N. \quad (2)$$

На рисунке 10, б приведена топографическая диаграмма напряжений для некоторых конкретных значений Z_A, Z_B, Z_C .

Как видно из уравнений (2) и диаграммы, при неравномерной нагрузке фаз в системе без нулевого провода напряжения приёмников не равны друг другу. На одних фазах может быть пониженное напряжение по сравнению с фазным, на других – повышенное, что является серьёзным недостатком рассматриваемой схемы. Её нельзя применять в тех случаях, когда нагрузка заведомо несимметрична, например, в осветительной сети.

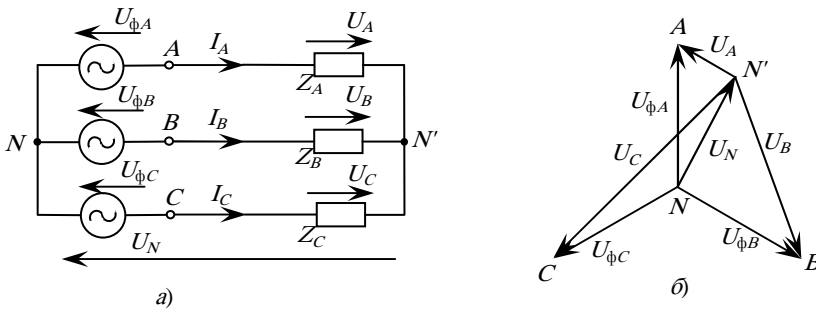


Рис. 10

Если заданы линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} на зажимах нагрузки, то целесообразно пользоваться формулами, полученными подстановкой (1) в уравнения (2).

Имеем

$$U_A = \frac{U_{AB} Y_B - U_{CA} Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C};$$

$$U_B = \frac{U_{BC} Y_C - U_{AB} Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C};$$

$$U_C = \frac{U_{CA} Y_A - U_{BC} Y_B}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (3)$$

Мощность при несимметричной нагрузке, как и при симметричной, равна сумме мощностей отдельных фаз. Следовательно, активная мощность

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

Аналогично, реактивная мощность равна сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C.$$

Поэтому полная или кажущаяся мощность трёхфазной цепи может быть определена как

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

и коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P_A + P_B + P_C}{|S_A + S_B + S_C|}. \quad (5)$$

Здесь S_A, S_B, S_C – полные комплексные мощности отдельных фаз.

Пользуясь комплексной формой записи мощности, можно написать выражение для мощности трёхфазной цепи, приведённой на рис. 10, *а* в функции линейных напряжений. Полная мощность

$$S = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C.$$

Исключая один из токов, например I_B , из условия

$$I_B = -I_A - I_C,$$

получим

$$S = (U_A - U_B) I_A + (U_C - U_B) I_C,$$

или

$$S = U_{AB} I_A + U_{CB} I_C. \quad (6)$$

Уравнение (6) справедливо и для нагрузки, соединённой в треугольник, так как оно определяется линейными напряжениями U_{AB} и U_{BC} . Круговой заменой индексов A, B, C в уравнении (6) можно получить выражения для других напряжений и токов мощности S .

"Звезда-звезда" с нулевым проводом (рис. 11). Одно из главных назначений нейтрального провода состоит в том, чтобы при несимметричной нагрузке выравнять фазные напряжения потребителей. Из схемы (рис. 11) следует

$$U_A = U_{\phi A}; \quad U_B = U_{\phi B}; \quad U_C = U_{\phi C},$$

т.е. фазные напряжения источника равны фазным напряжениям нагрузки (потребителя).

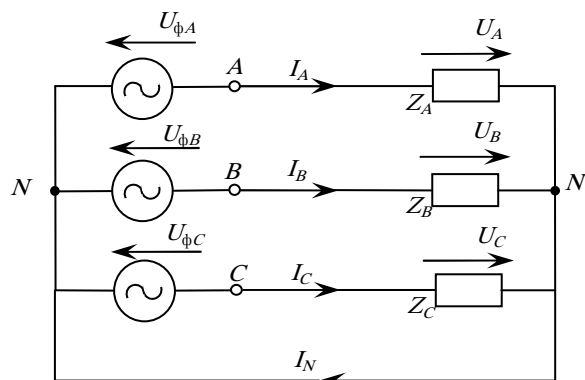


Рис. 11

Соединение нагрузки треугольником. При соединении нагрузки треугольником (рис. 7) токи в фазах находим на основании закона Ома:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}}; \quad I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}}; \quad I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}}.$$

Таким образом, при соединении нагрузки треугольником, независимо от её сопротивлений, напряжения на нагрузке равны линейным напряжениям источника.

5. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ТРЁХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Для измерения мощности в трёхфазной цепи с нейтральным проводом простейшим является метод трёх ваттметров (рис. 12). При таком соединении каждый из ваттметров измеряет активную мощность одной фазы приёмника (нагрузки). Активная мощность всей трёхфазной цепи равна сумме показаний трёх ваттметров:

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C.$$

Если нагрузка симметрична, достаточно произвести измерение одним ваттметром:

$$P = 3P_W.$$

При отсутствии нейтрали провода достаточно иметь два ваттметра. В соответствии с (6) для схемы рис. 13 комплекс мощности всей цепи может быть записан как

$$S = U_{AB}^* I_A + U_{CB}^* I_C.$$

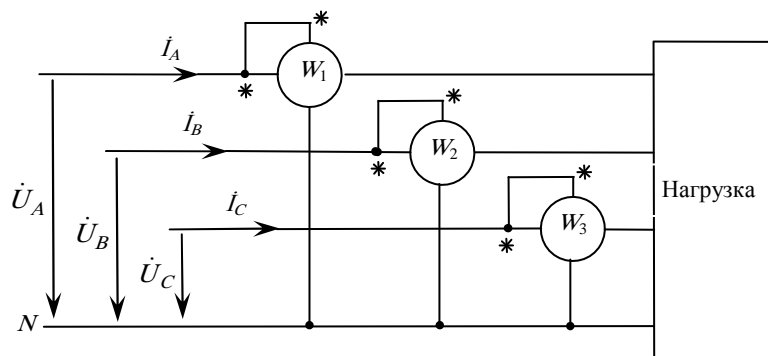


Рис. 12

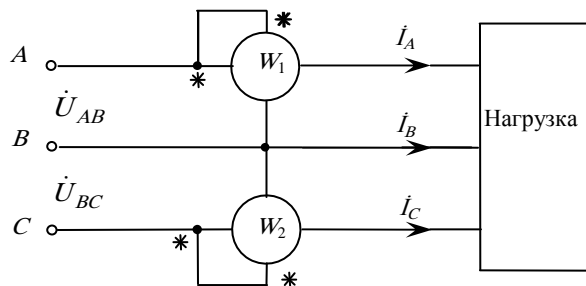


Рис. 13

При выводе формулы (6) не делалось никаких предположений о симметрии цепи; следовательно, данный метод измерения двумя ваттметрами применим как в случае симметричной, так и в случае несимметричной трёхфазной системы.

Показания ваттметров следующие:

$$P_{W_1} = \operatorname{Re} \left[U_{AB}^* I_A \right] = U_{AB} I_A \cos(\hat{U}_{AB} I_A);$$

$$P_{W_2} = \operatorname{Re} \left[U_{CB}^* I_C \right] = U_{CB} I_C \cos(\hat{U}_{CB} I_C).$$

Мощность всей трёхфазной цепи

$$P = P_{W_1} + P_{W_2},$$

т.е. равна сумме показаний отдельных ваттметров.

Измерение реактивной мощности в трёхфазных цепях производится с помощью специальных измерителей реактивной мощности, подобных по устройству ваттметрам. В симметричной трёхфазной цепи измерение реактивной мощности может

быть произведено, кроме того, с помощью ваттметров активной мощности. В этом случае ваттметр может быть включён в схему, как показано на рис. 14.

Поскольку при симметричной нагрузке как при соединении треугольником, так и при соединении звездой угол между линейным напряжением U_{BC} и линейным током I_A равен $90^\circ - \varphi$, то показание ваттметра будет

$$P_W = U_{BC} I_A \cos(\varphi - 90^\circ) = U_{BC} I_A \sin \varphi.$$

Для получения суммарной реактивной мощности показание ваттметра нужно умножить на $\sqrt{3}$:

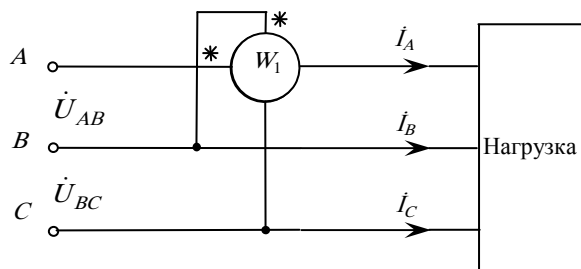


Рис. 14

$$Q = \sqrt{3} P_W = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi,$$

где $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$.

В данном случае $X > 0$, т.е. нагрузка носит индуктивный характер.

6. ТРЁХФАЗНОЕ ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Большим достоинством трёхфазных систем является лёгкость получения вращающегося магнитного поля. Это даёт возможность создания большого класса трёхфазных электрических машин переменного тока – генераторов и двигателей.

Пусть через катушку, показанную на рис. 15, проходит синусоидальный ток i . Катушка условно изображена в виде витка, причём точка и крестик указывают направление тока: точкой обозначено острие, а крестиком – конец стрелки. По правилу буравчика определено направление вектора магнитной индукции B . В среде с постоянной магнитной проницаемостью магнитная индукция в любой точке поля пропорциональна по величине току, создающему магнитное поле. Поэтому, если $i = I_m \cos \omega t$, то и B также изменяется по закону $B = B_m \cos \omega t$ (B_m – максимальное значение магнитной индукции в центре катушки); когда ток отрицателен, вектор магнитной индукции имеет противоположное направление.

Таким образом, магнитное поле изменяется (пульсирует) вдоль оси катушки; такое магнитное поле катушки называется пульсирующим.

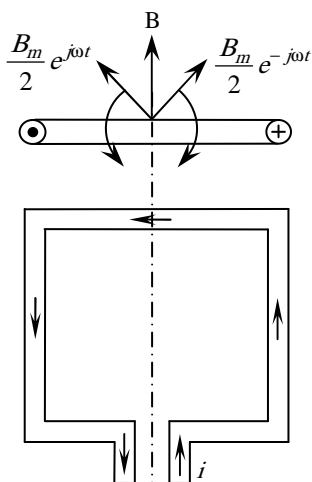


Рис. 15

Условимся круговым вращающимся магнитным полем называть магнитное поле, ось которого равномерно вращается; причём значение магнитной индукции на этой оси неизменно. Легко убедиться в том, что магнитное поле, пульсирующее по закону синуса или косинуса, может рассматриваться как результат наложения двух полей, вращающихся в противоположные стороны со скоростью, равной угловой частоте переменного тока, и имеющих амплитуду вдвое меньшую амплитуды

пульсирующего поля (см. рис. 15). Действительно, если косинусоидальную функцию выразить через экспоненциальную в виде

$$\cos \omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2},$$

то магнитная индукция запишется как

$$B = \frac{B_m}{2} e^{j\omega t} + \frac{B_m}{2} e^{-j\omega t},$$

где $e^{j\omega t}$ – единичный вектор, вращающийся с угловой скоростью ω в положительном направлении (против движения часовой стрелки); вектор с отрицательным показателем вращается в противоположную сторону.

Расположим три одинаковые катушки таким образом, чтобы их оси были сдвинуты друг относительно друга в пространстве на угол 120° (рис. 16, а) и подключим эти катушки к симметричной трёхфазной цепи. Тогда через катушки будут протекать токи

$$i_A = I_m \cos \omega t; \quad i_B = I_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \quad i_C = I_m \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right).$$

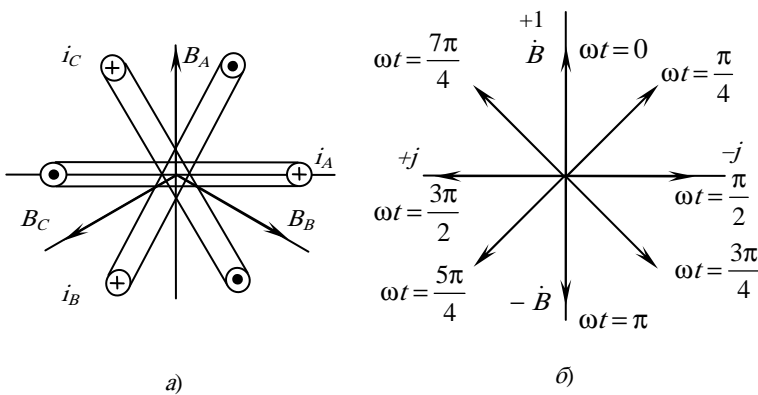


Рис. 16

Направлениям токов i_A, i_B, i_C , обозначенным на рис. 16, а с помощью точек и крестиков, соответствуют по правилу буравчика указанные стрелками направления магнитных потоков (векторов индукций).

При пропорциональной зависимости индукции от токов мгновенные значения индукций фаз выразятся следующим образом:

$$B_A = B_m \cos \omega t; \quad B_B = B_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \quad B_C = B_m \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right),$$

где B_m – амплитуда индукции на оси каждой из катушек.

Заменяя косинусоидальные функции на экспоненциальные, получим

$$B_A = \frac{B_m}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}); \quad B_B = \frac{B_m}{2} \left[e^{j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)} + e^{-j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)} \right];$$

$$B_C = \frac{B_m}{2} \left[e^{j\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)} + e^{-j\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)} \right]. \quad (7)$$

Каждое из уравнений системы (7) выражает собой пульсирующее магнитное поле. Чтобы осуществить направление этих полей в соответствии с рис. 16, а, достаточно представить индукции B_B и B_C в комплексной форме:

$$B_B = B_B e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \quad B_C = B_C e^{j\frac{2\pi}{3}}. \quad (8)$$

Тогда, с учётом (7) и (8), получим

$$B_A = \frac{B_m}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t});$$

$$B_B = \frac{B_m}{2} \left[e^{j\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)} + e^{-j\omega t} \right]; \quad B_C = \frac{B_m}{2} \left[e^{j\left(\omega t - \frac{8\pi}{3}\right)} + e^{-j\omega t} \right].$$

Результирующий вектор индукции находится сложением векторов B_A, B_B, B_C .

В силу того, что сумма трёх единичных векторов $1, e^{-j\frac{4\pi}{3}}, e^{-j\frac{8\pi}{3}}$ равна нулю, результирующая индукция принимает вид

$$B = \frac{3}{2} B_m e^{-j\omega t}. \quad (9)$$

Полученное выражение (9) показывает, что результирующий вектор магнитного поля имеет постоянный модуль, равный $1,5B_m$, и равномерно вращается с угловой скоростью ω от оси фазы A по направлению к оси фазы B и т.д., или по ходу часовой стрелки, т.е. имеет место вращающееся магнитное поле.

Положение результирующего вектора для различных моментов времени показано на рис. 16, б.

Для изменения направления вращения поля достаточно поменять местами токи в каких-нибудь двух катушках, например, токи i_B и i_C .

За один период переменного тока такое магнитное поле совершит один оборот, а за 1 мин. – 60 оборотов.

Известно устройство для получения кругового вращающегося магнитного поля при помощи двух катушек, плоскости которых смещены в пространстве на угол 60° (заявка на изобретение № 2633114/07 от 16 июня 1978 г.)

При подведении к схеме рис. 17 трёхфазной системы напряжений возникают токи i_1 и i_2 , создающие магнитные поля, индукции которых соответственно равны

$$B_1 = B_m \cos \omega t; \quad B_2 = B_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right).$$

Результирующий вектор индукции находится сложением векторов:

$$B_1 = \frac{B_m}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) e^{-j\pi/6}$$

и

$$B_2 = \frac{B_m}{2} \left(e^{j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)} + e^{-j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)} \right) e^{j\pi/6}.$$

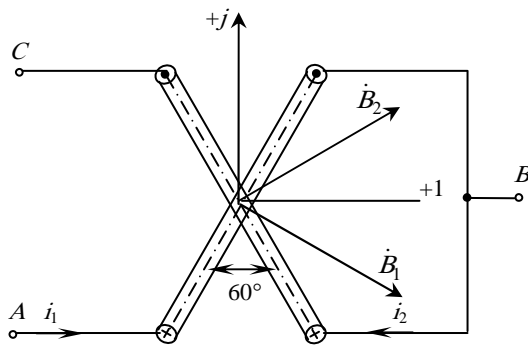


Рис. 17

После простых преобразований получим

$$B = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m e^{j(\omega t - \pi/6)}. \quad (10)$$

Это выражение показывает, что результирующий вектор магнитной индукции вращается с угловой скоростью ω , причём значение индукции на оси неизменно равно $\frac{\sqrt{3}}{2} B_m$, т.е. получается круговое магнитное вращающееся поле.

7. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ В ТРЁХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Если в трёх одинаковых фазах обмотки трёхфазного генератора переменного тока индуктируются одинаковые несинусоидальные напряжения, например, содержащие третью гармонику, то напряжение фазы *A* можно представить в виде

$$u_{\phi A} = U_{1m} \sin \omega t + U_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3).$$

Напряжения во второй и третьей фазах получаются путём замены в этом уравнении ωt соответственно на $\omega t - \frac{2\pi}{3}$ и $\omega t - \frac{4\pi}{3}$. Это даёт

$$u_{\phi B} = U_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + U_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3);$$

$$u_{\phi C} = U_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + U_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3).$$

Таким образом, в то время как основные гармоники смещены по фазе друг относительно друга на 120° , высшие гармоники во всех трёх направлениях совпадают по фазе. Поэтому в линейных напряжениях (проводах) высших гармонических не будет, и они будут синусоидальными (если, конечно, фазные напряжения не содержат пятой или седьмой гармоники).

Если три одинаковые фазы нагрузки подключены к генератору по схеме звезды, то на нагрузку будут действовать синусоидальные напряжения. Схемы для третьей гармоники показана на рис. 18. Здесь

$$u_N = u_{3\phi A} = u_{3\phi B} = u_{3\phi C} = u_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3).$$

При этом легко показать, что $i_{3A} = i_{3B} = i_{3C} = 0$. Поэтому

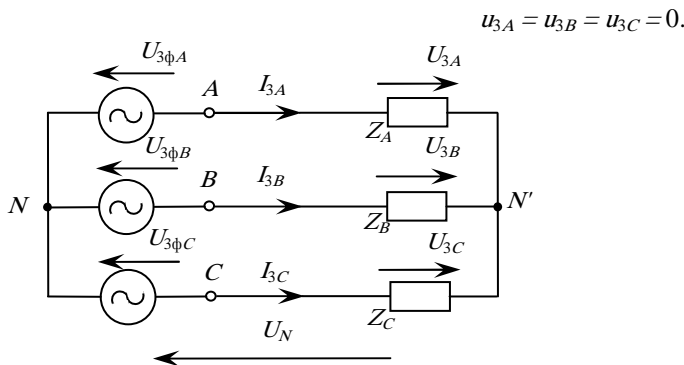


Рис. 18

Если нулевые точки генератора и нагрузки соединить между собой, как это показано на рис. 11, то через линейные провода и нулевой провод будет циркулировать ток утроенной частоты. Он создаёт в фазах нагрузки падение напряжения утроенной частоты и, таким образом, делает несинусоидальным также напряжение на нагрузке.

8. МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ РАСЧЁТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЁХФАЗНЫХ СИСТЕМ

Запишем действующие значения симметричной системы ЭДС

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

Обозначим $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, тогда

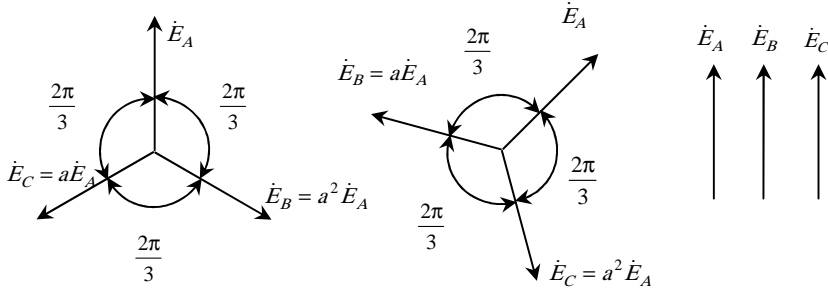
$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^3 = e^{j2\pi} = 1;$$

$$a^4 = a;$$

$$1 + a + a^2 = 0.$$

Симметричную трёхфазную систему ЭДС можно записать в виде



$$\dot{E}_A; \quad \dot{E}_B = a\dot{E}_A; \quad \dot{E}_C = a^2\dot{E}_A.$$

Рис. 19

Как видно из рис. 19, ЭДС в фазах проходят через максимум в алфавитном порядке фаз (A, B, C, A, B, C, \dots). Такую систему называют симметричной системой прямой последовательности.

Симметричную систему обратной последовательности, в которой ЭДС проходит через максимум в обратном алфавитном порядке фаз (A, C, B, A, C, B, \dots), можно записать в виде

$$\dot{E}_A; \quad \dot{E}_B = a^2\dot{E}_A; \quad \dot{E}_C = a\dot{E}_A.$$

Симметричную систему нулевой последовательности, в которой все три ЭДС проходят через максимум амплитуды одновременно, записать в виде

$$\dot{E}_A = \dot{E}_B = \dot{E}_C.$$

Любую несимметричную трёхфазную систему ЭДС, напряжений или токов, например $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$, можно представить в виде суммы трёх симметричных трёхфазных систем: нулевой ($\dot{E}_0; \dot{E}_0; \dot{E}_0$), прямой ($\dot{E}_1; a^2\dot{E}_1; a\dot{E}_1$) и обратной ($\dot{E}_2; a\dot{E}_2; a^2\dot{E}_2$) последовательности, которые называют симметричными составляющими данной несимметричной трёхфазной системы (рис. 20):

$$\begin{cases} \dot{E}_A = \dot{E}_0 + \dot{E}_1 + \dot{E}_2; \\ \dot{E}_B = \dot{E}_0 + a^2\dot{E}_1 + a\dot{E}_2; \\ \dot{E}_C = \dot{E}_0 + a\dot{E}_1 + a^2\dot{E}_2. \end{cases} \quad (11)$$

Из уравнения (11) можно выразить \dot{E}_0, \dot{E}_1 и \dot{E}_2 через \dot{E}_A, \dot{E}_B и \dot{E}_C , если учесть, что

$$1 + a + a^2 = 0; \quad a^3 = 1; \quad a^4 = a.$$

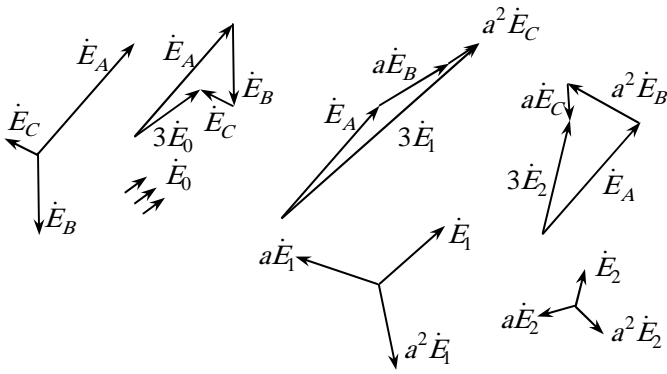


Рис. 20

Для получения \dot{E}_0 следует сложить равенства (11) и разделить полученную сумму на три.

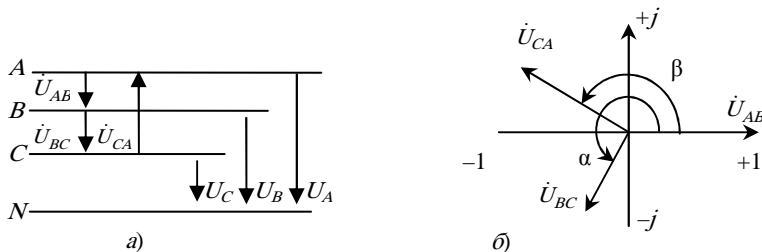
Для получения \dot{E}_1 следует, оставив первое равенство без умножения, умножить второе равенство на a и третье – на a^2 , затем сложить три полученных равенства и разделить сумму на три.

Для получения \dot{E}_2 следует, оставив первое равенство (11) без умножения, умножить второе равенство на a^2 и третье – на a , затем сложить три полученных равенства и разделить сумму на три:

$$\begin{cases} \dot{E}_0 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C); \\ \dot{E}_1 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + a\dot{E}_B + a^2\dot{E}_C); \\ \dot{E}_2 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + a^2\dot{E}_B + a\dot{E}_C). \end{cases} \quad (12)$$

Получили формулы прямой, обратной и нулевой последовательностей линейных и фазных напряжений сети, по которым представляется возможным рассчитывать указанные симметричные составляющие на основании результатов измерения линейных и фазных напряжений обычными вольтметрами и создавать автоматические устройства непрерывного контроля указанных симметричных составляющих.

На рисунке 21, а показан участок сети с указанием положительных направлений линейных U_{CA} , U_{AB} , U_{BC} и фазных U_A ,



U_B , U_C напряжений, а на рис. 21, б представлена векторная диаграмма линейных напряжений.

Рис. 21

Примем следующие обозначения:

$$\dot{U}_{AB} = U_{AB}; \quad \dot{U}_{BC} = U_{BC}e^{j\alpha}; \quad \dot{U}_{CA} = U_{CA}e^{j\beta}.$$

Тогда на основании метода симметричных составляющих для обратной последовательности напряжения U_{AB} можем записать

$$U_{AB_2} = \frac{1}{3}(U_{AB} + a^2U_{BC}e^{j\alpha} + aU_{CA}e^{j\beta}), \quad (13)$$

где $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – фазный множитель.

Перепишем уравнение (13):

$$3U_{AB2} = U_{AB} + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)U_{BC}e^{j\alpha} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)U_{CA}e^{j\beta}.$$

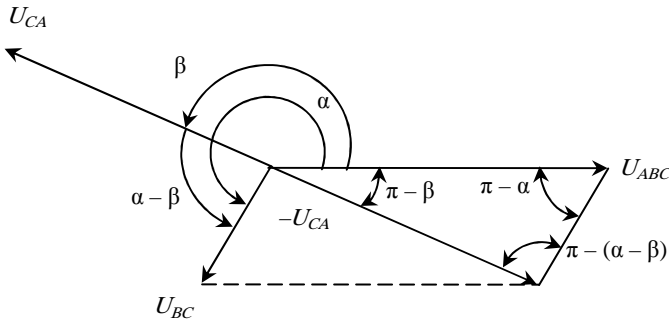
Можно показать, что модуль этого комплекса равен

$$9U_{AB2}^3 = U_{AB}^3 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - U_{AB}U_{CA}(\cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta) - U_{AB}U_{BC}(\cos\alpha - \sqrt{3}\sin\alpha) - U_{BC}U_{CA}\cos(\alpha - \beta) - \sqrt{3}\sin(\beta - \alpha). \quad (14)$$

Так как сумма комплексов линейных напряжений получена из рассмотрения треугольника на рис. 22, из треугольника по теореме косинусов имеем

$$\cos(\alpha - \pi) = \frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{2U_{AB}U_{CA}} = -\cos\alpha; \quad (15)$$

$$\cos(\pi - \beta) = \frac{U_{AB}^2 + U_{CA}^2 - U_{BC}^2}{2U_{AB}U_{CA}} = -\cos\beta; \quad (16)$$



$$\cos(\pi - (\alpha - \beta)) = \frac{U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - U_{AB}^2}{2U_{BC}U_{CA}} = -\cos(\alpha - \beta). \quad (17)$$

Рис. 22

Следовательно, можем записать

$$\sin(\alpha - \pi) = -\sin\alpha;$$

$$\sin\alpha = -\sqrt{1 - \cos^2\alpha}. \quad (18)$$

По теореме синусов

$$\frac{U_{AB}}{\sin(\pi - (\alpha - \beta))} = \frac{U_{BC}}{\sin(\pi - \beta)} = -\frac{U_{CA}}{\sin(\alpha - \pi)},$$

или

$$\frac{U_{AB}}{\sin(\alpha - \beta)} = \frac{U_{BC}}{\sin\beta} = -\frac{U_{CA}}{\sin\alpha}.$$

Таким образом, с учётом (15) имеем

$$\sin\alpha = -\sqrt{1 - \cos^2\alpha} = -\sqrt{1 - \frac{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2)^2}{4U_{AB}^2 + U_{BC}^2}}. \quad (19)$$

Подставляя (15) – (18) в (14) и производя несложные преобразования, с учётом (19) получим окончательное выражение для обратной последовательности линейного напряжения в функции его модулей:

$$U_{AB2} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - \sqrt{3} \sqrt{4U_{AB}^2 U_{BC}^2 - (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2)^2}}. \quad (20)$$

Аналогично можно найти уравнение для напряжения прямой последовательности. Действительно,

$$U_{AB1} = \frac{1}{3} (U_{AB} + aU_{BC}e^{j\alpha} + a^2U_{CA}e^{j\beta}).$$

Квадрат модуля этого комплекса равен

$$9U_{AB1}^2 = U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - U_{AB}U_{BC}(\cos\alpha + \sqrt{3}\sin\alpha) - U_{AB}U_{CA}(\cos\beta - \sqrt{3}\sin\beta) - U_{BC}U_{CA}(\cos(\alpha - \beta) - \sqrt{3}\sin(\alpha - \beta)). \quad (21)$$

Подставляя (15) – (18) в (21), получим уравнение для определения напряжения прямой последовательности:

$$U_{AB1} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 + \sqrt{3} \sqrt{4U_{AB}^2 U_{BC}^2 - (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2)^2}}. \quad (22)$$

Уравнения (20) и (22) являются основными для расчёта симметричных составляющих прямой и обратной последовательности несимметричных линейных напряжений.

Так как соотношения между симметричными составляющими фазных и линейных напряжений являются такими же, как и соотношения между действительными фазными и линейными напряжениями, то симметричные составляющие прямой и обратной последовательности фазных напряжений найдём из выражений

$$U_{A1} = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}} U_{AB1}; \quad U_{A2} = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{6}} U_{AB2}.$$

Для получения нулевой последовательности фазных напряжений рассмотрим векторную диаграмму рис. 23.

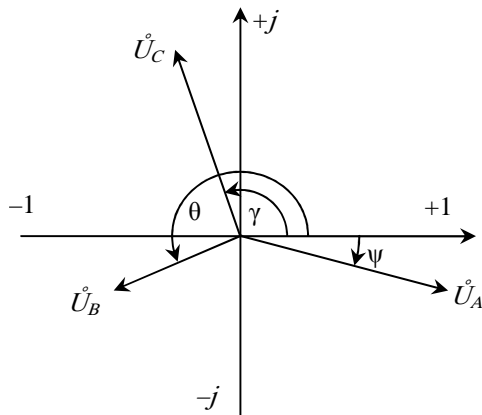


Рис. 23

Запишем фазные напряжения в комплексной форме:

$$U_A = U_A(\cos\alpha + j\sin\alpha); \quad U_B = U_B(\cos\beta + j\sin\beta); \quad U_C = U_C(\cos\gamma + j\sin\gamma).$$

Система линейных напряжений независимо от вида схемы определяется через фазные напряжения:

$$U_{AB} = U_A - U_B; \quad U_{BC} = U_B - U_C; \quad U_{CA} = U_C - U_A,$$

причём

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0.$$

На основании метода симметричных составляющих утроенное напряжение нулевой последовательности равно

$$\begin{aligned} 3U_0 &= U_A(\cos \alpha + j \sin \alpha) + U_B(\cos \beta + j \sin \beta) + U_C(\cos \gamma + j \sin \gamma) = \\ &= U_A \cos \alpha + U_B \cos \beta + U_C \cos \gamma + j(U_A \sin \alpha + U_B \sin \beta + U_C \sin \gamma). \end{aligned}$$

Модуль последнего выражения после простых преобразований будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} 9U_0^2 &= U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 + 2U_C U_B \cos(\alpha - \beta) + \\ &+ 2U_B U_C \cos(\beta - \gamma) + 2U_C U_A \cos(\alpha - \gamma). \end{aligned} \quad (23)$$

С другой стороны, линейное напряжение U_{AB} , выраженное через фазные напряжения U_A и U_B , можно записать

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A(\cos \alpha + j \sin \alpha) - U_B(\cos \beta + j \sin \beta) = \\ &= U_A \cos \alpha - U_B \cos \beta + j(U_A \sin \alpha - U_B \sin \beta). \end{aligned} \quad (24)$$

Его модуль

$$U_{AB}^2 = U_A^2 + U_B^2 - 2U_A U_B \cos(\alpha - \beta).$$

Таким образом,

$$2U_A U_B \cos(\alpha - \beta) = U_A^2 + U_B^2 - U_{AB}^2 \quad (25)$$

Аналогично получим уравнения для линейных напряжений U_{BC} и U_{CA} :

$$2U_B U_C \cos(\beta - \gamma) = U_B^2 + U_C^2 - U_{BC}^2; \quad (26)$$

$$2U_A U_C \cos(\alpha - \gamma) = U_A^2 + U_C^2 - U_{CA}^2. \quad (27)$$

Подставляя уравнения (25) – (27) в (23), имеем

$$9U_0^2 = 3U_A^2 + 3U_B^2 + U_C^2 - U_{AB}^2 - U_{BC}^2 - U_{CA}^2$$

и окончательно искомое напряжение нулевой последовательности фазных напряжений будет определяться формулой

$$U_0 = \sqrt{\frac{1}{3}(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) - \frac{1}{9}(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)}. \quad (28)$$

В частном случае, когда система линейных напряжений симметрична, т.е. $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{л}}$, из (28) получим

$$U_0 = \sqrt{\frac{1}{3}(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 - U_{\text{л}}^2)}. \quad (29)$$

На рисунке 24 дана схема фильтра для выделения составляющих прямой или обратной последовательности системы токов, составляющая нулевой последовательности которой равна нулю. Определим условия, которым следует подчинить полные сопротивления Z_{AB} и Z_{BC} элементов этой цепи, причём полное сопротивление амперметра обозначим через Z_{CA} . На основании законов Кирхгофа имеем

$$I_{AB}Z_{AB} + I_{BC}Z_{BC} + I_{CA}Z_{CA} = 0; \quad I_{AB} = I_A + I_{CA}; \quad I_{BC} = I_C + I_{CA},$$

откуда

$$I_{CA} = -\frac{I_A Z_{AB} + I_C Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}.$$

Так как составляющая нулевой последовательности системы линейных токов по условию равна нулю, то, выражая токи I_C и I_A через составляющие прямой и обратной последовательностей I_1 и I_2 , получим

$$I_a = I_1 + I_2; \quad I_c = aI_1 + a^2I_2$$

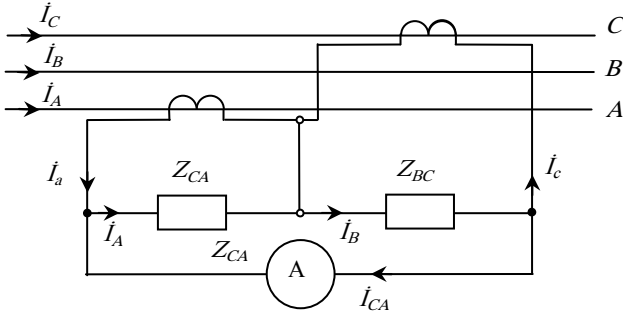


Рис. 24

и, подставив эти значения в выражение для I_{CA} , найдём

$$I_{CA} = -\frac{I_1(Z_{AB} + aZ_{BC}) + I_2(Z_{AB} + a^2Z_{BC})}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}.$$

Из этого выражения следует, что ток I_{CA} , проходящий через амперметр, не зависит от состоящей обратной последовательности и пропорционален составляющей прямой последовательности, если выполнены условия

$$Z_{AB} + a^2Z_{BC} = 0,$$

или

$$Z_{AB} = -a^2Z_{BC} = Z_{BC}e^{j\pi/3}, \quad (30)$$

и не зависит от составляющей прямой последовательности и пропорционален составляющей обратной последовательности, если выполнены условия

$$Z_{AB} + aZ_{BC} = 0,$$

или

$$Z_{BC} = -a^2Z_{AB} = Z_{AB}e^{j\pi/3}.$$

Фильтр для выделения составляющей прямой последовательности логично получить при

$$Z_{BC} = R; \quad Z_{AB} = R' + jX.$$

Нетрудно показать, что равенство (30) будет выполняться при

$$R' = \frac{1}{2}R; \quad X = \frac{\sqrt{3}}{2}R.$$

Схема, в которой реализуются указанные условия, показана на рис. 25, а.

Фильтр для выделения составляющей обратной последовательности получим, взяв

$$Z_{AB} = R; \quad Z_{BC} = R' + jX.$$

Равенство (30), как и ранее, будет выполняться при

$$R' = \frac{1}{2}R; \quad X = \frac{\sqrt{3}}{2}R.$$

Схема для выделения составляющей обратной последовательности показана на рис. 25, б.

Как уже отмечалось, величина напряжения нулевой последовательности равна одной трети суммы фазных напряжений, т.е.

$$U_0 = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C). \quad (31)$$

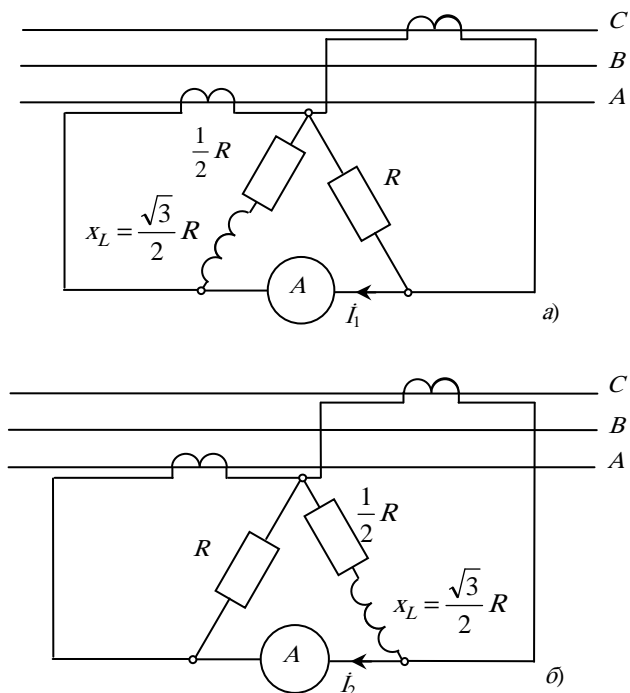


Рис. 25

Это соотношение используется при измерении напряжения нулевой последовательности. Три однофазных трансформатора напряжения соединяются, как показано на рис. 26, причём первичные обмотки соединяются звездой, а общая точка подсоединяется к нейтрали. Вторичные обмотки трансформаторов соединяются открытым треугольником, благодаря чему напряжение на зажимах треугольника пропорционально сумме вторичных фазных напряжений. Вольтметр, показанный на схеме, используется для измерений данного напряжения:

$$U_V = U_A + U_B + U_C,$$

а при соответствующей градуировке его можно использовать для измерения напряжения нулевой последовательности: $U_V \equiv U_0$.

Напряжение нулевой последовательности можно также измерить при помощи схемы, показанной на рис. 27. Три индуктивные катушки с равными сопротивлениями Z соединены звездой и подсоединены к трём фазам линии. Общая точка звезды подсоединена через вольтметр к нейтрали.

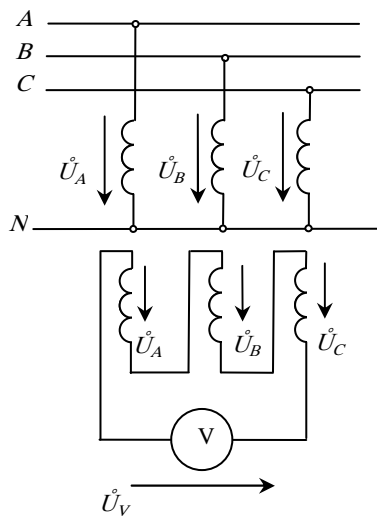


Рис. 26

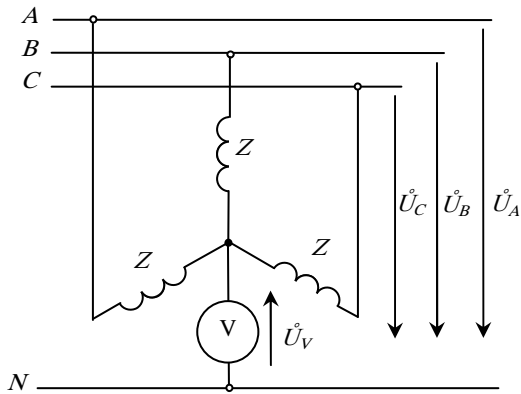


Рис. 27

Напряжение на вольтметре U_V можно определить из следующих соотношений:

$$U'_A - U_V - U_A = 0;$$

$$U'_B - U_V - U_B = 0;$$

$$U'_C - U_V - U_C = 0.$$

Сложив эти уравнения и учтя, что

$$U_A + U_B + U_C = 3U_0; \quad U'_A + U'_B + U'_C = 3U'_0,$$

получим

$$U_V = U'_0 - U_0.$$

Напряжение U'_0 определяется асимметрией фазных напряжений источника питания линии. Эта система, как правило, симметрична. Поэтому показание вольтметра равно напряжению нулевой последовательности $U_V = U_0$.

Аналогично (31) ток нулевой последовательности можно представить в виде

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C), \quad (32)$$

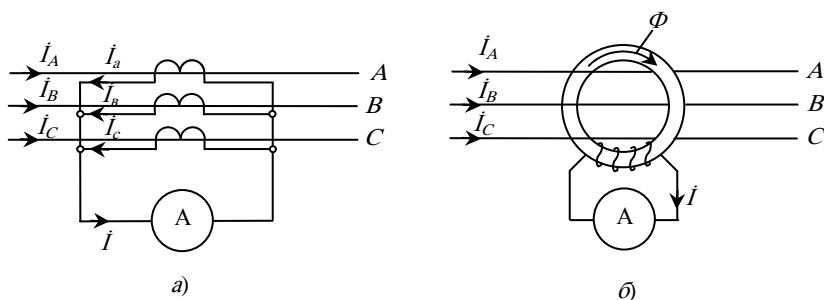
Поэтому для измерения токов нулевой последовательности необходимо использовать три трансформатора тока, вторичные обмотки которых соединяются параллельно (рис. 28, а). Через амперметр А, подсоединённый к концам трёх вторичных обмоток, проходит ток, соответствующий сумме токов:

$$I = I_A + I_B + I_C,$$

и, следовательно, его можно отградуировать на показание тока нулевой последовательности, т. $I \equiv I_0$.

Для этой же цепи часто используется один кольцевой трансформатор, сердечник которого охватывает три провода (рис. 28, б). В этой схеме происходит суммирование магнитных потоков, создаваемых токами трёх фаз I_A, I_B, I_C . Поэтому ЭДС, индуцируемая вторичной обмоткой кольцевого трансформатора, пропорциональна результирующему магнитному потоку Φ , а показание амперметра, как и в схеме рис. 28, а, пропорционально току нулевой последовательности.

Рис. 28



9. ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В МЕСТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРЁХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ

Для расчётов указанных величин предварительно должны быть составлены схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности, и определены результирующие сопротивления $x_{1,\Sigma}$, $x_{2,\Sigma}$, $x_{3,\Sigma}$ и результирующая ЭДС E .

В качестве положительного принимаем направление токов к месту короткого замыкания.

Двухфазное короткое замыкание между фазами B и C (рис. 29) характеризуется следующими условиями:

$$\dot{I}_{kA}^{(2)} = 0; \quad \dot{I}_{kB}^{(2)} = -\dot{I}_{kC}^{(2)}; \quad \dot{U}_{kB}^{(2)} - \dot{U}_{kC}^{(2)} = 0.$$

Так как сумма фазных токов равна нулю, то система является уравновешенной и, следовательно,

$$I_{k0}^{(2)} = 0,$$

произведём разложение тока фазы A на симметричные составляющие:

$$\dot{I}_{kA}^{(2)} = \dot{I}_{kA}^{(2)} + \dot{I}_{kA}^{(2)} = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{kA}^{(2)} = -\dot{I}_{kA}^{(2)}. \quad (33)$$

Исходя из условия $\dot{U}_{kB}^{(2)} = \dot{U}_{kC}^{(2)}$ и рассматривая его совместно с системой (11), можно убедиться в том, что

$$\dot{U}_{kA}^{(2)} = \dot{U}_{kA}^{(2)}. \quad (34)$$

Из (11), а также $U_{k1} = \dot{E} - I_{k1} jx_{1,\Sigma}$ и $U_{k2} = 0 - I_{k2} jx_{2,\Sigma}$, вытекает равенство

$$\dot{E}_A - \dot{I}_{kA}^{(2)} jx_{1,\Sigma} = -\dot{I}_{kA}^{(2)} jx_{2,\Sigma},$$

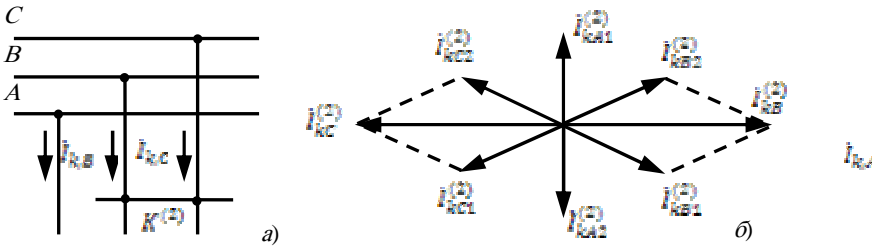


Рис. 29

заменяв в котором $-\dot{I}_{kA}^{(2)}$ на $\dot{I}_{kA}^{(2)}$, согласно (33) получим расчётное выражение для определения тока при двухфазном коротком замыкании:

$$\dot{I}_{kA}^{(2)} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma})}. \quad (35)$$

Комплексная форма выражения (35) означает, что ток отстаёт от фазной ЭДС на угол 90° (деление на j) и по абсолютному значению равен

$$I_{kA}^{(2)} = \frac{E_A}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}}. \quad (36)$$

Токи в повреждённых фазах B и C находим по (11) и (33):

$$\dot{I}_{kB}^{(2)} = a^2 \dot{I}_{kA}^{(2)} + a \dot{I}_{kA}^{(2)} = (a^2 - a) \dot{I}_{kA}^{(2)} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{kA}^{(2)}; \quad (37)$$

$$\dot{I}_{kC}^{(2)} = (a - a^2) \dot{I}_{kA}^{(2)} = j\sqrt{3} \dot{I}_{kA}^{(2)}. \quad (38)$$

Абсолютное значение полного тока при двухфазном коротком замыкании определяется из (36) – (38):

$$I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}}. \quad (39)$$

На основании (39) для момента возникновения короткого замыкания

$$I''^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E''}{\sqrt{3}(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma})} = \frac{E''}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}}, \quad (40)$$

где E'' – сверхпереходная междуфазная ЭДС.

В случае питания короткого замыкания от энергосистемы

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}U_{cp}}{\sqrt{3}(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma})} = \frac{U_{cp}}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}}. \quad (41)$$

Построение симметричных составляющих и полных токов для двухфазного короткого замыкания $B - C$ показано на рис. 29, б.

При определении напряжений в месте короткого замыкания следует учесть следующее: для систем с заземлённой нейтралью, когда сопротивление $x_{0,\Sigma}$ имеет конечное значение, напряжение $\dot{U}_{k0}^{(2)}$ при $\dot{I}_{k0}^{(2)} = 0$ на основании $\dot{U}_{k0} = 0 - \dot{I}_{k0} jx_{0,\Sigma} = 0$ также равно нулю; для систем с изолированной нейтралью, когда $x_{0,\Sigma} = \infty$ и $\dot{U}_{k0}^{(2)} = -\infty \cdot 0$ – неопределённость, короткие замыкания не влияют на смещение нейтрали системы относительно земли и $\dot{U}_{k0}^{(2)}$ в уравнениях напряжений не рассматриваются.

Симметричные составляющие напряжений $\dot{U}_{kA}^{(2)}$ и $\dot{U}_{kB}^{(2)}$ можно определить:

$$\dot{U}_{k1} = \dot{E} - \dot{I}_{k1} jx_{1,\Sigma}; \quad (42)$$

$$\dot{U}_{k2} = 0 - \dot{I}_{k2} jx_{2,\Sigma}; \quad (43)$$

$$\dot{U}_{k0} = 0 - \dot{I}_{k0} jx_{0,\Sigma}, \quad (44)$$

после чего, пользуясь (11) для вычисления полных значений, найти напряжения в месте короткого замыкания.

Однофазное короткое замыкание на землю одной из фаз, например фазы A (рис. 30), определяется следующими условиями:

$$\dot{I}_{kC}^{(1)} = 0; \quad \dot{I}_{kB}^{(1)} = 0; \quad \dot{I}_{kA}^{(1)} = 0.$$

Так как токи в двух фазах отсутствуют, то очевидно, что симметричные составляющие повреждённой фазы A в соответствии с

$$\dot{N}_{A1} = \frac{1}{3}(\dot{N}_A + a\dot{N}_B + a^2\dot{N}_C);$$

$$\dot{N}_{B1} = \frac{1}{3}(\dot{N}_A + a^2\dot{N}_B + a\dot{N}_C);$$

$$\dot{N}_{C1} = \frac{1}{3}(\dot{N}_A + \dot{N}_B + \dot{N}_C),$$

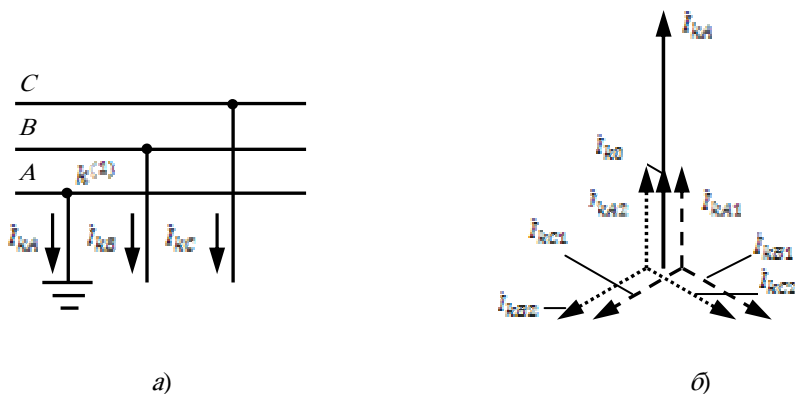


Рис. 30

где $N_{A1}, N_{B1}, N_{C1}, N_A, N_B, N_C$ – векторы симметричных составляющих и фазных величин, равны

$$\dot{I}_{kA}^{(1)} = \dot{I}_{k\mathcal{A}}^{(1)} = \dot{I}_{k\mathcal{A}0}^{(1)} = \frac{1}{3} \dot{I}_{kA}^{(1)}.$$

Выражая напряжение $\dot{U}_{kA}^{(1)}$ через симметричные составляющие и их значения в (42) – (44), получим

$$\dot{U}_{kA}^{(1)} = \dot{U}_{kA}^{(1)} + \dot{U}_{k\mathcal{A}}^{(1)} + \dot{U}_{k\mathcal{A}0}^{(1)}$$

и далее

$$\dot{E}_A - \dot{I}_{kA}^{(1)} j(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma}) = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{kA}^{(1)} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma})}. \quad (45)$$

Абсолютное значение полного тока короткого замыкания равно

$$I_k^{(1)} = 3\dot{I}_{k1}^{(1)} = \frac{3E}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma}}, \quad (46)$$

для начального момента времени

$$I^{(1)} = \frac{3E''}{\sqrt{3}(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma})} = \frac{\sqrt{3}E''}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma}}, \quad (47)$$

где E'' – сверхпереходная междуфазная ЭДС.

При питании от энергосистемы

$$I^{(1)} = \frac{3U_{cp}}{\sqrt{3}(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma})} = \frac{\sqrt{3}U_{cp}}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma}}. \quad (48)$$

При необходимости по (42) – (44) можно определить симметричные составляющие напряжений, а затем по (11) – полные напряжения фаз.

Несимметричные короткие замыкания за трансформаторами. При переходе через трёхфазный трансформатор (или трёхфазную группу однофазных трансформаторов) в нормальном режиме токи и напряжения в общем случае изменяются по значению и фазе, зависящей от группы соединения обмоток трансформатора. В частных случаях возможна трансформация только по значению и фазе, зависящей от группы соединения обмоток трансформатора. В частных случаях возможно трансформация только по значению или по фазе, например для трансформаторов с соединением обмоток Y/Y-12 и для трансформаторов с соединением обмоток Y/Δ и коэффициентом $n = 1$ трансформации, соответственно.

Коэффициентом трансформации называется отношение междуфазных напряжений холостого хода первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$n = \frac{U_{Ix}}{U_{Iix}}.$$

Соотношение первичных и вторичных величин в трёхфазном трансформаторе при $n > 1$, исходя из равенства мощностей в обмотках и в пренебрежении потерями на намагничивание, определяется следующими формулами:

- для понижающего трансформатора

$$U_I = nU_{II} \text{ и } I_I = \frac{1}{n} I_{II}; \quad (49)$$

- для повышающего трансформатора

$$U_I = \frac{1}{n} U_{II} \text{ и } I_I = n I_{II},$$

где U_I, U_{II} и I_I, I_{II} – соответственно линейные напряжения и токи.

В связи с тем, что симметричные системы более просты, для аналитических вычислений или построения векторных диаграмм токов и напряжений, получающихся в результате трансформации в несимметричных режимах, целесообразно использование метода симметричных составляющих, достаточно задать коэффициенты трансформации по (49) и углы поворота этих систем, приведены ниже, чтобы получить действительные значения и угловые смещения токов и напряжений при переходе через трансформатор.

Смещение систем прямой и обратной последовательности по углу при трансформации со стороны звезды на сторону треугольника производится поворотом векторов прямой последовательности на угол $360^\circ - 30^\circ \cdot N$, векторов обратной последовательности на угол $-(360^\circ - 30^\circ \cdot M)$. При трансформации от треугольника к звезде знаки углов поворота меняются на обратные соответственно: $-(360^\circ - 30^\circ \cdot M)$ и $360^\circ - 30^\circ \cdot N$, где N – номер группы соединения обмоток трансформатора.

Токи нулевой последовательности вследствие совпадения по модулю и фазе не выходят за пределы обмотки, соединённой треугольником, и в линейных проводах треугольника отсутствуют.

Однако на практике редко прибегают к аналитическому или векторному решению задач по трансформации симметричных составляющих, учитывая одновременно коэффициент трансформации и угловые смещения систем. Чаще решение производится в два приёма*: для заданной группы соединений трансформатора и $n = 1$ выясняются соотношения токов (напряжений) со стороны питания по отношению к токам (напряжениям) в месте короткого замыкания. Затем для конкретных условий вычисляется ток в месте короткого замыкания и по формулам приведения: и соотношениям, полученным выше, определяют действительные токи (напряжения) на обеих сторонах трансформатора.

Зная из предыдущего текста, как оперировать симметричными составляющими, при прохождении через трансформатор рассмотрим случаи несимметричных коротких замыканий за трансформаторами.

Векторные диаграммы токов короткого замыкания для трансформаторов с наиболее распространёнными группами

соединения обмоток $Y/\Delta-11$ и $Y_0/\Delta-11$ и коэффициентом трансформации $n = 1$ приведены на рис. 31 – 33. Для такого рода

трансформаторов число витков в обмотках, соединённых в треугольник, в $\sqrt{3}$ раз превышает число витков обмоток, соединённых в звезду:

$$n = \omega_Y \sqrt{3} / \omega_\Delta = 1.$$

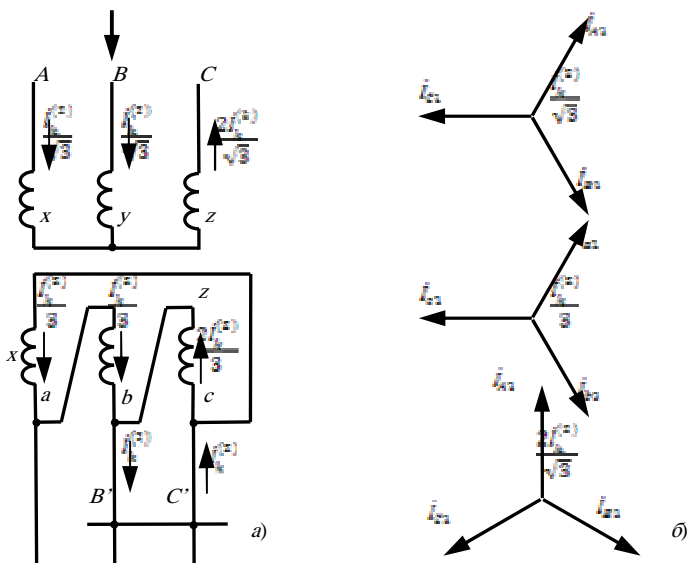
Полные токи в обмотках трансформаторов и на их выводах получены при помощи сложения симметричных составляющих токов короткого замыкания.

Двухфазное короткое замыкание на стороне треугольника (рис. 31).

В связи с тем, что токи короткого замыкания в фазах B' и C' равны по значению и противоположны по направлению (рис. 31, г), составляющие нулевой последовательности при данном виде короткого замыкания отсутствуют.

При переходе с линейных выводов в фазы треугольника a, b, c , что в данном случае соответствует фазам звезды, система токов прямой последовательности (рис. 31, б) поворачивается на угол -30° , токов обратной последовательности (рис. 31, в) – на угол $+30^\circ$.

Токи короткого замыкания протекают по всем трём фазам треугольника, поскольку $I_k^{(2)}$ распределяется между одной и двумя фазами обратно пропорционально их сопротивлениям – как $\frac{2}{3} I_k^{(2)}$ и $\frac{1}{3} I_k^{(2)}$. На стороне звезды изменения систем токов по фазе не происходит, но по значению токи возрастают в $\sqrt{3}$ раз за счёт соотношения витков $\omega_Y / \omega_\Delta = 1 / \sqrt{3}$.



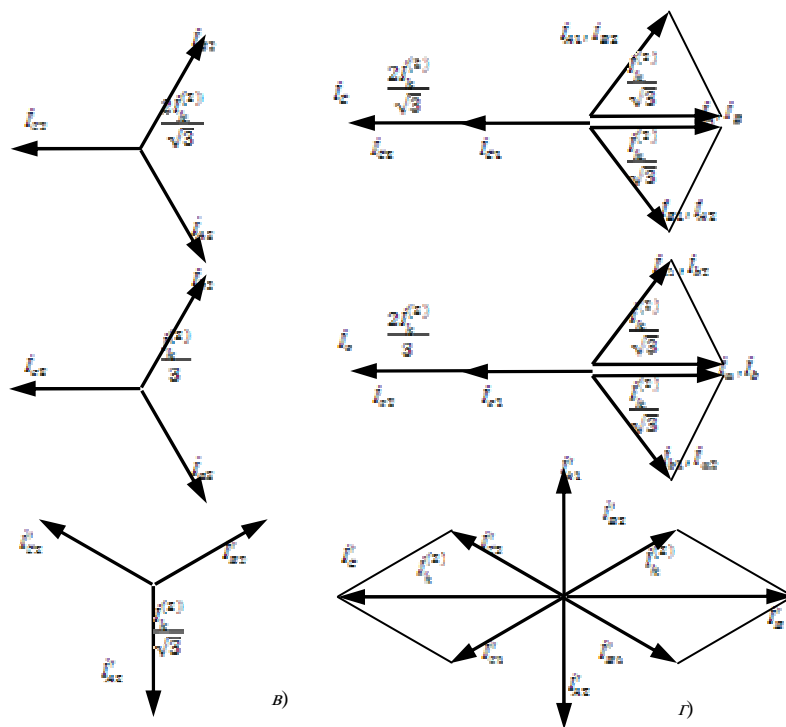


Рис. 31

В результате трансформации в фазах звезды будут протекать токи (рис. 31, г): в фазе C $2I_k^{(2)}/\sqrt{3}$ и в фазах A и B $I_k^{(2)}\sqrt{3}$.

При коротком замыкании между фазами CA и AB максимальное значение тока короткого замыкания со стороны звезды будет циклически перемещаться в фазы A и B . Токи короткого замыкания со стороны звезды при равных сопротивлениях в схемах прямой и обратной последовательности соответствуют току трёхфазного короткого замыкания в одной фазе

$$\frac{I_{п,0}^{(3)}}{I_{п,0}^{(2)}} = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

где $I_{п,0}^{(3)}$, $I_{п,0}^{(2)}$ – соответственно действующие значения периодической слагающей тока двухфазного и трёхфазного короткого замыкания для $t = 0$, и половине этого тока в двух других фазах:

$$I_{k,\max}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3}}{2} I_k^{(3)}.$$

Двухфазное короткое замыкание на стороне звезды. Системы токов прямой и обратной последовательности (рис. 32, б и в) при трансформации со стороны звезды в фазы треугольника уменьшаются в $\sqrt{3}$ раз за счёт большего в раз числа витков в обмотках, соединённых в треугольник.

Ток короткого замыкания протекает только по двум фазам треугольника, соответствующим поврежденным фазам на стороне звезды.

При переходе в линейные провода треугольника система токов прямой последовательности (рис. 32, б) поворачивается на угол $+30^\circ$, токов обратной последовательности (рис. 32, в) – на угол -30° .

Аналогично предыдущему случаю токи короткого замыкания в линейных проводах треугольника (рис. 32, г) составляют: в фазе B $2I_k^{(2)}/\sqrt{3}$, в фазах A и C $I_k^{(2)}/\sqrt{3}$, и при циклическом изменении фаз короткого замыкания максимальное значение тока также перемещается. Если сопротивления схем прямой и обратной последовательности равны, то ток в одной из фаз со стороны треугольника составит $I_k^{(3)}$, в двух других $I_k^{(3)}/2$.

Однофазное короткое замыкание на стороне звезды (рис. 33). Системы токов прямой, обратной и нулевой последовательности

(рис. 33, б–г) трансформируются в фазы треугольника без изменения направления, уменьшаясь в $\sqrt{3}$ раз (см. предыдущий случай короткого замыкания).

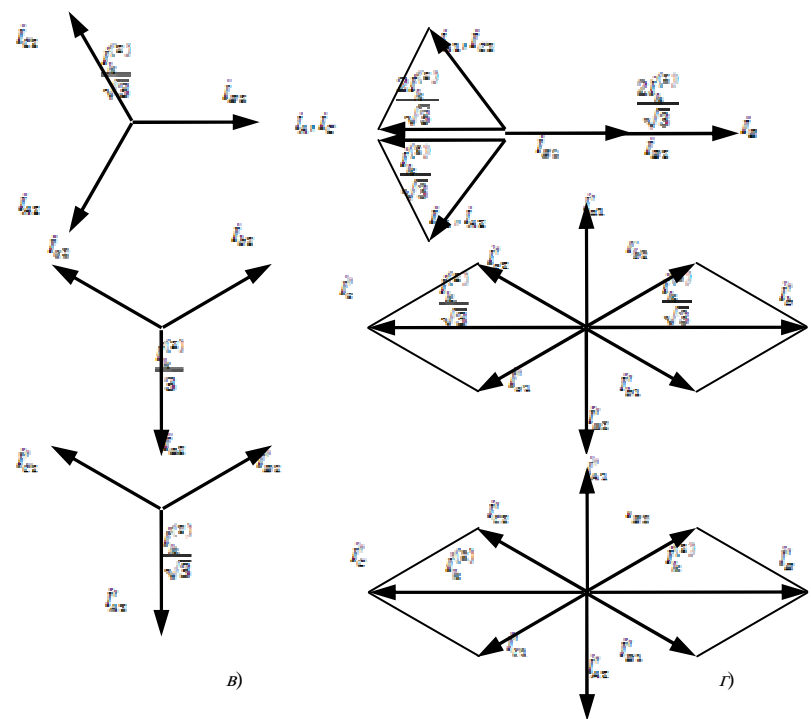
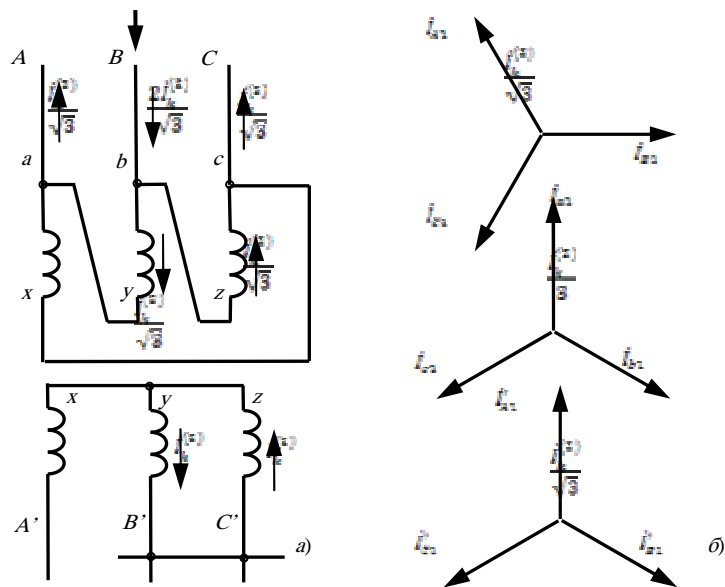
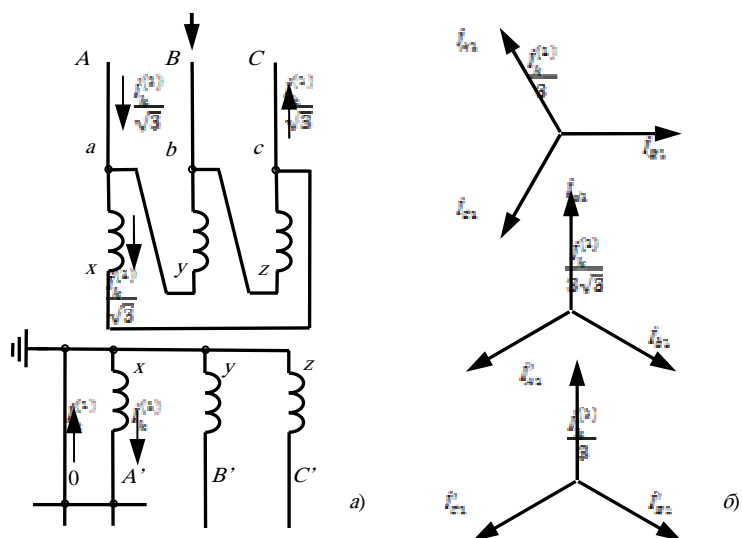


Рис. 32



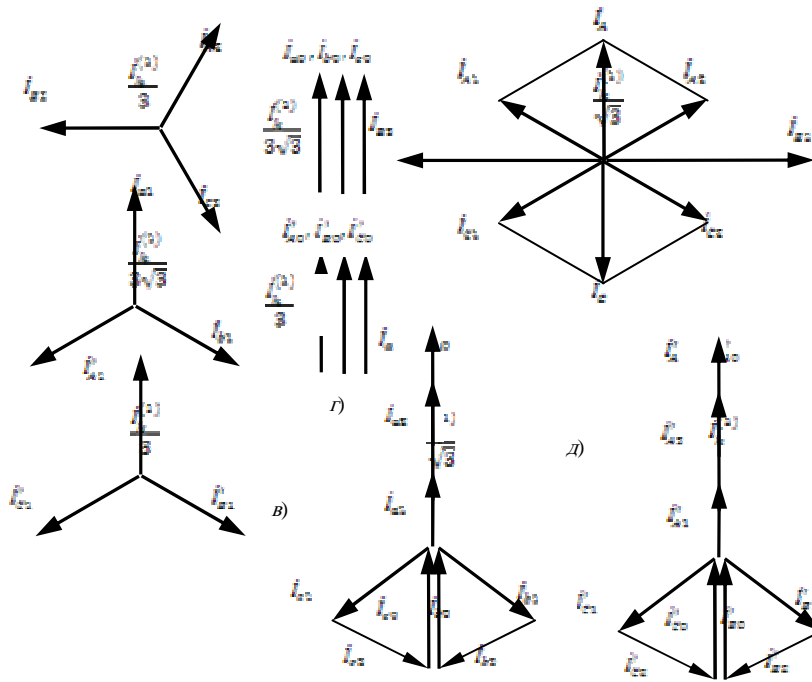


Рис. 33

Ток короткого замыкания протекает только в одной фазе треугольника, соответствующей фазе короткого замыкания.

Углы поворота систем токов прямой и обратной последовательности при выходе из фаз треугольника такие же, как при двухфазном коротком замыкании на стороне звезды.

Результирующие токи в линейных проводах треугольника (рис. 33, д) протекают по двум фазам, А и С, и равны $I_k^{(1)}\sqrt{3}$.

При циклическом изменении фазы короткого замыкания протекание токов в линейных выводах треугольника изменяется аналогично.

Обобщение формул для определения токов несимметричных коротких замыканий. Из (39) и (46) для полных токов в месте короткого замыкания следует, что по абсолютному значению ток несимметричного короткого замыкания пропорционален току прямой последовательности при данном виде короткого замыкания:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{k1}^{(n)}, \quad (50)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от вида короткого замыкания (для трёхфазного короткого замыкания $m^{(3)} = 1$, для двухфазного короткого замыкания $m^{(2)} = \sqrt{3}$, для однофазного короткого замыкания $m^{(1)} = 3$); $I_{k1}^{(n)}$ – ток прямой последовательности для данного вида короткого замыкания.

В общем виде выражение для определения тока $I_{k1}^{(n)}$ можно записать как

$$I_{k1}^{(n)} = \frac{E}{x_{1,\Sigma} + x_{\text{доп}}^{(n)}}, \quad (51)$$

где $x_{1,\Sigma}$ – сопротивление прямой последовательности для данного вида короткого замыкания, характеризующее удалённость точки короткого замыкания; $x_{\text{доп}}^{(n)}$ – дополнительное индуктивное сопротивление, зависящее от вида короткого замыкания (для трёхфазного короткого замыкания $x_{\text{доп}}^{(3)} = 0$; для двухфазного короткого замыкания $x_{\text{доп}}^{(2)} = x_{2,\Sigma}$; для однофазного короткого замыкания $x_{\text{доп}}^{(1)} = x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma}$).

На основании (51) ток прямой последовательности определяется как ток трёхфазного короткого замыкания в точке, удалённой от действительной точки короткого замыкания на дополнительное сопротивление $x_{\text{доп}}^{(n)}$.

Соотношение токов двухфазного и трёхфазного короткого замыкания для начального момента времени и ударный ток двухфазного короткого замыкания. На практике, как правило, принимают $x_{1,\Sigma} = x_{2,\Sigma}^*$. После замены $x_{2,\Sigma}$ на $x_{1,\Sigma}$ выражения (40) и (41) для определения тока двухфазного короткого замыкания в начальный момент времени приобретут следующий вид:

$$I^{(2)n} = \frac{E^n}{2x_{1\Sigma}}; \quad (52)$$

$$I^{(2)} = \frac{U_{\text{ср}}}{2x_{1\Sigma}}. \quad (53)$$

Обозначив начальное значение тока через $I_{\text{п},0}$ и поделив (52) на (50), а также (53) на (52), получим искомое соотношение токов для двухфазного и трёхфазного короткого замыкания:

$$\frac{I_{\text{п},0}^{(2)}}{I_{\text{п},0}^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (54)$$

где $I_{\text{п},0}^{(2)}$, $I_{\text{п},0}^{(3)}$ – соответственно действующие значения периодической слагающей тока двухфазного и трёхфазного короткого замыкания для $t=0$.

* Имеется в виду использование для приближённых расчётов в качестве сопротивления обратной последовательности сопротивления генераторов $x_2 \approx x_d^n$.

10. РАБОТА РАЗЛИЧНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ТРЁХФАЗНЫХ СЕТЯХ

10.1. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Соединение трансформаторов тока и обмоток реле в полную звезду. Схема соединения представлена на рис. 34, векторные диаграммы иллюстрирующие работу схемы на рис. 35 – 37.

В нормальном режиме (если он симметричный) $I_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ (практически из-за погрешностей трансформаторов тока проходит небольшой ток – ток небаланса).

Схема применяется для включения защиты от всех видов однофазных и междуфазных коротких замыканий.

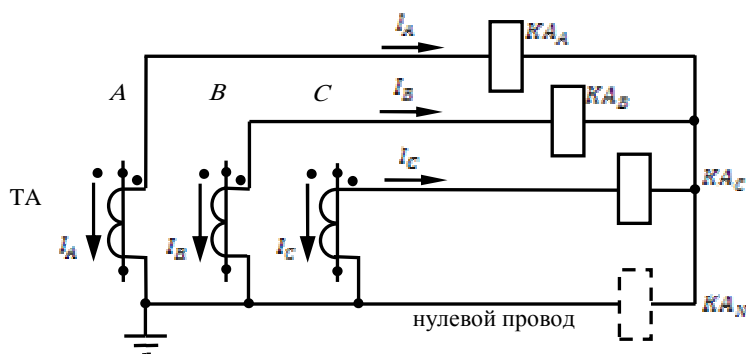
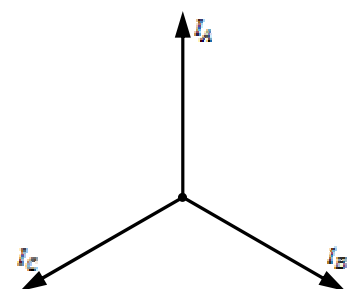


Рис. 35

Двухфазное короткое замыкание

Рис. 34

Трёхфазное короткое замыкание



$$I_N = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)$$

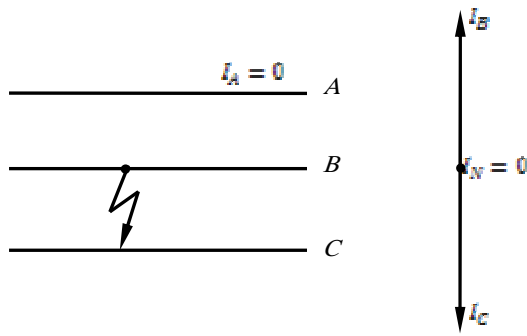


Рис. 36

Однофазное короткое замыкание

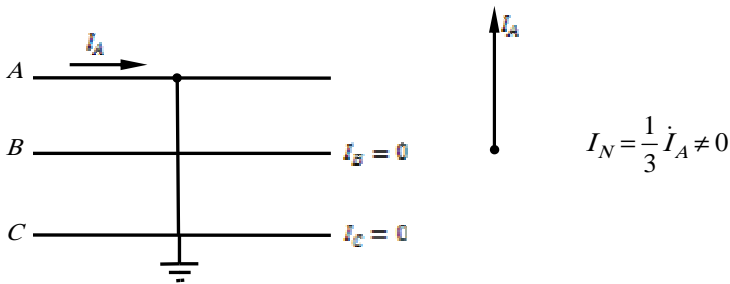


Рис. 37

Для каждой схемы соединений можно определить отношение тока в реле I_p к току в фазе I_ϕ , это отношение называется коэффициентом схемы $k_{сх} = \frac{I_p}{I_\phi}$, для данной схемы $k_{сх} = 1$.

Соединение трансформаторов тока и обмоток реле в неполную звезду. Схема соединения представлена на рис. 38, векторные диаграммы, иллюстрирующие работу схемы на рис. 38:

- трёхфазное короткое замыкание: токи проходят по обоим реле и в обратном проводе:

$$I_N = -(I_A + I_C); I_N = I_B;$$

- двухфазное короткое замыкание: токи проходят в одном или двух реле в зависимости от того, какие фазы повреждены.

Схема неполной звезды реагирует не на все случаи однофазного короткого замыкания и применяется только для защиты от междуфазных коротких замыканий в сетях с изолированными нулевыми точками: $k_{сх} = 1$.

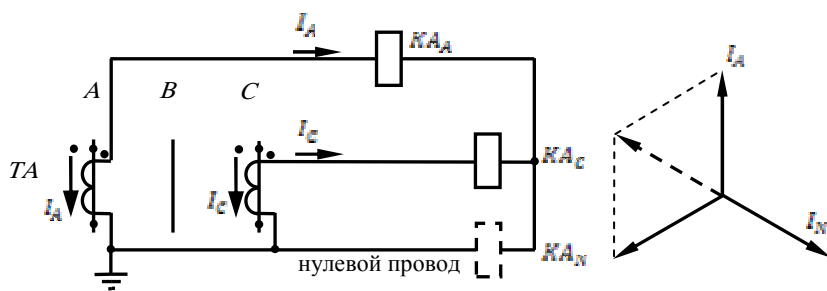
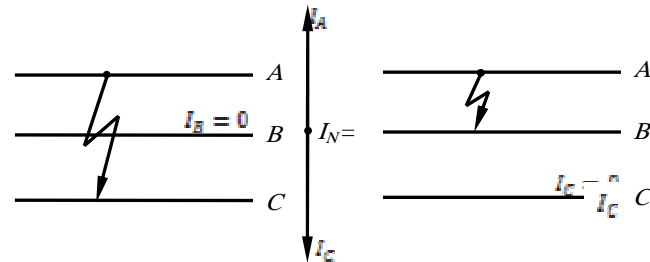


Рис. 39

Рис. 38



Двухфазное короткое замыкание фаз AC и AB и векторные диаграммы, иллюстрирующие работу схемы при данном виде повреждения, представлены на рис. 39.

Однофазное короткое замыкание фазы B: токи в схеме защиты не появляются (рис. 40).

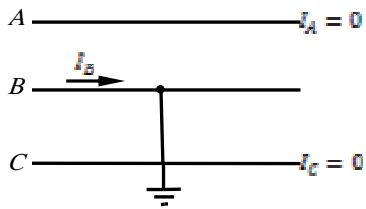


Рис. 40

Соединение трансформаторов тока в треугольник, а обмоток реле в звезду. Схема соединения и векторные диаграммы токов представлены на рис. 41.

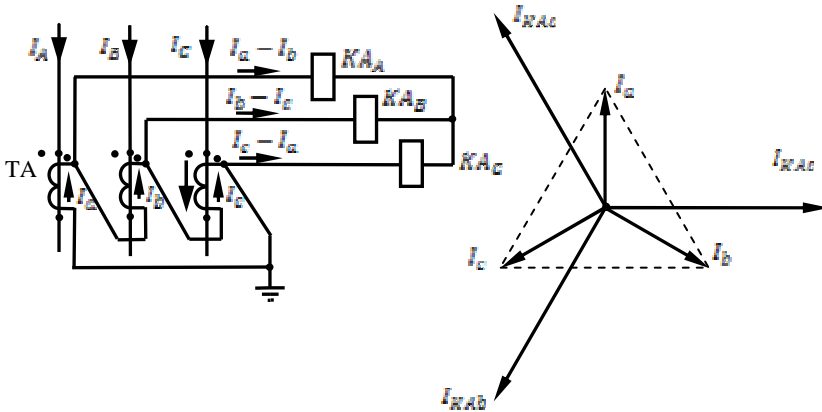


Рис. 41

При трёхфазном коротком замыкании при симметричной нагрузке в реле проходит линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше тока фазы и сдвинутый относительно него по фазе на 30° .

Особенности схемы:

- 1) токи в реле проходят при всех видах короткого замыкания, защиты построенные по такой схеме реагируют на все виды короткого замыкания;
- 2) отношение тока в реле к фазному току зависит от вида короткого замыкания;
- 3) токи нулевой последовательности не выходят за пределы треугольника трансформаторов тока, не имея пути для замыкания через обмотки реле.

Схема применяется в основном для дифференциальных защит трансформаторов и дистанционных защит.

Коэффициент схемы

$$k_{\text{сх}}^3 = \frac{I_p}{I_\phi} = \frac{\sqrt{3}I_\phi}{I_\phi} = \sqrt{3}.$$

Включение реле на разность токов двух фаз (схема восьмёрки). Схема соединения представлена на рис. 42; векторные диаграммы, иллюстрирующие работу схемы, на рис. 43, 44.

При трёхфазном коротком замыкании (симметричная нагрузка)

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

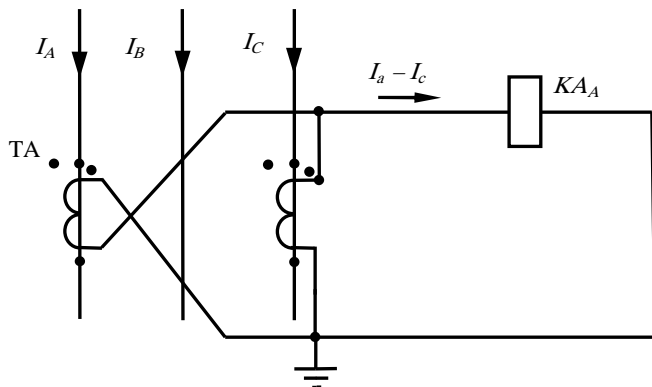


Рис. 42

Двухфазное короткое замыкание AC

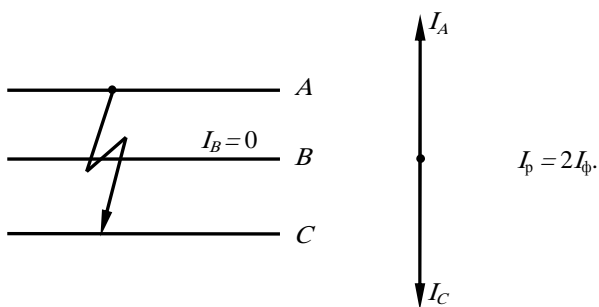


Рис. 43

Двухфазное короткое замыкание AB или BC

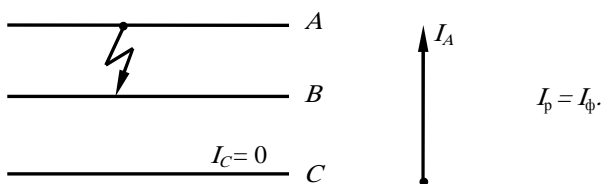


Рис. 44

Ток в реле, следовательно, и чувствительность при различных видах короткого замыкания будут различными.

Однофазное короткое замыкание фазы B: ток в реле равен нулю.

Схема применяется для защиты от междуфазных коротких замыканий, когда она обеспечивает необходимую чувствительность, когда не требуется её действие за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ – 11 группа.

Коэффициент схемы $k_{сх} = \sqrt{3}$.

Соединение трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности. Схема соединения представлена на рис. 45.

Ток в реле появляется только при одно- и двухфазных коротких замыканий на землю

$$I_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Схема применяется в защитах от замыканий на землю.

При нагрузках трёхфазных и двухфазных коротких замыканий $I_N = 0$.

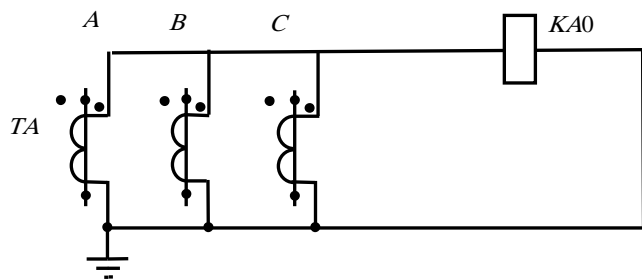


Рис. 45

Однако из-за погрешности трансформаторов тока в реле появляется ток небаланса $I_{нб}$.

10.2. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Схема соединения трансформаторов напряжения в звезду предназначена для получения напряжения фаз относительно земли и линейных напряжений.

Заземление нейтрали первичной обмотки трансформатора напряжения и наличие нулевого провода во вторичной цепи является обязательным условием для получения фазных напряжений относительно земли.

Обмотки реле 1, 2, 3 включены на фазные напряжения; 4, 5, 6 – на линейные напряжения; F – плавкий предохранитель; FA – плавкий предохранитель в цепях релейной защиты (рис. 46).

Соединение трансформатора напряжения по схеме Y/Y может выполняться по 6 и 12 группам. Типовым является соединение по 12 группе.

Рассмотренная схема соединений может быть выполнена посредством трёх однофазных трансформаторов напряжений или одного трёхфазного пятистержневого трансформатора напряжений. Трёхфазные трёхстержневые трансформаторы напряжений не применяются, так как в их магнитопроводе нет пути для замыкания магнитных потоков нулевой последовательности Φ_0 , создаваемых током I_0 в первичных обмотках при замыкании на землю в сети. Поток Φ_0 замыкается через воздух, это резко увеличивает $I_{\text{нам}}$, вызывая недопустимый нагрев трансформатора.

Возможна дополнительная обмотка на основных или дополнительных стержнях для получения напряжения нулевой последовательности (рис. 47).

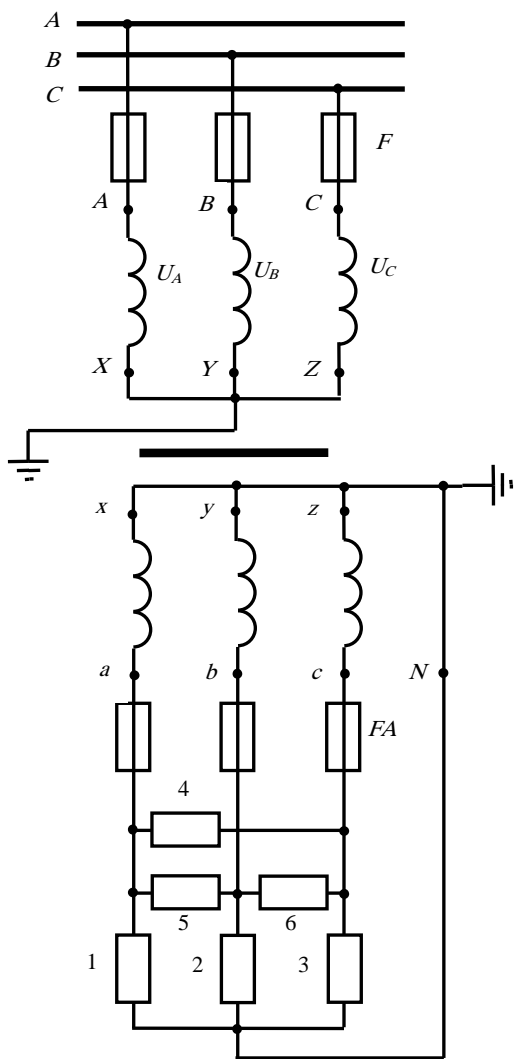


Рис. 46

Схема соединения обмоток трансформаторов напряжения в открытый треугольник. Два однофазных трансформатора напряжения включены на два междуфазных напряжения. Между проводами вторичной цепи включаются реле. Схема позволяет получить три междуфазных напряжения (рис. 48).

A B C

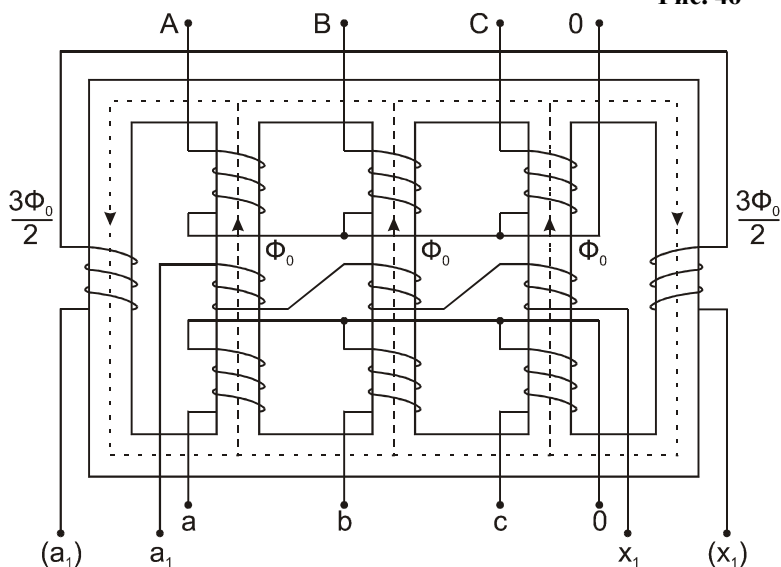


Рис. 47

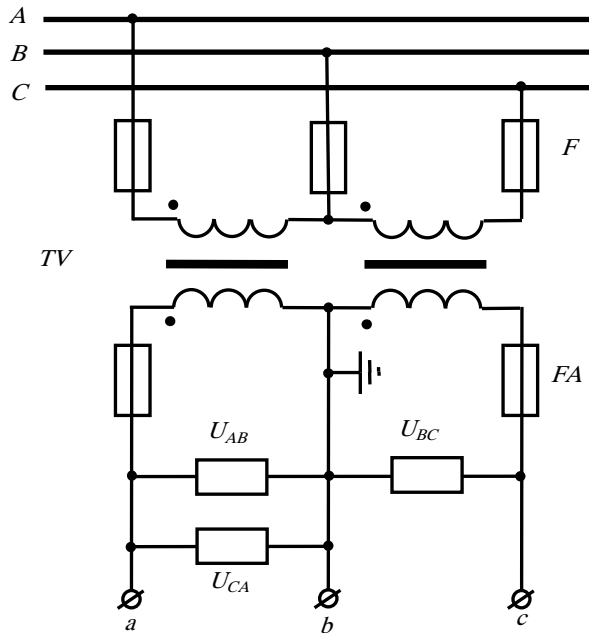


Рис. 48

Схема соединения трансформаторов напряжения в разомкнутый треугольник. Схема соединения, показанная на рис. 49, позволяет получить напряжение нулевой последовательности:

$$U_p = \frac{U_A + U_B + U_C}{n_H} = \frac{3U_0}{n_H}. \quad (55)$$

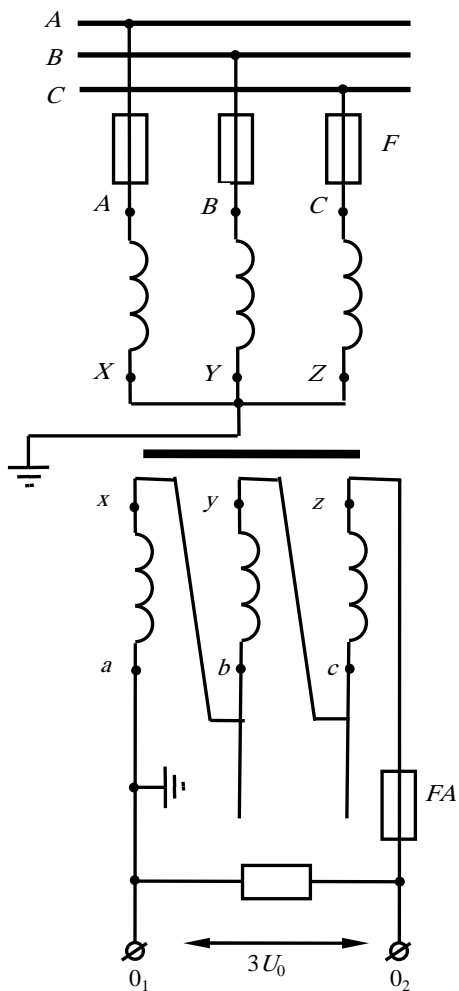


Рис. 49

В нормальном режиме $U_p = 0$.

Необходимым условием работы схемы является *заземление нейтрали первичной обмотки трансформатора напряжения*.

При отсутствии заземления напряжение на реле будет отсутствовать. Для вторичной обмотки принимается $U_{ном} = 100$ В – для сетей с заземлённой нейтралью и $100/3$ В – для изолированной.

Практически в нормальных условиях напряжение на реле составляет $U_{нб} = 0,5...2$ В.

При однофазном коротком замыкании в сети с заземлённой нейтралью

$$U_A = 0; \quad U_B + U_C = U_\phi = U_p.$$

В сети с изолированной нейтралью $U_p = 3U_\phi$, поэтому у трансформаторов напряжения, предназначенных для таких сетей, вторичные обмотки имеют увеличенный в три раза коэффициент трансформации (например: 6000/100/3).

Напряжение нулевой последовательности может быть получено и от специальных обмоток трёхфазных трансформаторов напряжения (рис. 47). Чаще всего применяются трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками. Одна соединяется по схеме звезды, а вторая – разомкнутым треугольником.

Вторичные обмотки трансформаторов напряжения *подлежат обязательному заземлению*. Оно является защитным, обеспечивая безопасность персонала при попадании высокого напряжения во вторичные цепи.

Обычно заземляется нулевая точка звезды или один из фазных проводов. В проводах, соединяющих точку заземления с обмотками трансформаторов напряжения, не должно быть коммутационных и защитных аппаратов.

Контроль за исправностью цепей напряжения. Повреждения во вторичных цепях трансформаторов напряжения (короткое замыкание и обрывы) могут вывести из строя оборудование релейной защиты или привести к неправильным её действиям.

При коротком замыкании опасно увеличивается ток, для защиты оборудования устанавливают предохранители или автоматы.

Повреждения вторичных цепей искажают величину и фазу вторичного напряжения, что приводит к неправильной работе защиты.

При обрыве фазы напряжение, подводимое к обмоткам реле, исчезает, что воспринимается защитой как короткое замыкание в сети. Для предотвращения ложных действий предусматриваются специальные устройства (блокировки).

Одна из простейших схем *сигнализации обрыва в цепях трансформаторов напряжения* приведена на рис. 50.

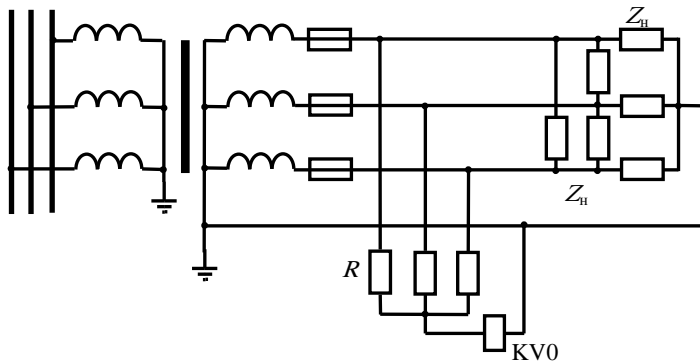


Рис. 50

Принципиальная схема блокировки защиты при повреждении в цепях трансформаторов напряжения типов КРБ-11 и КРБ-12 приведена на рис. 51.

В нормальном режиме напряжение на реле $KV0$ отсутствует. При обрыве одной или двух фаз возникает U_0 , под влиянием которого в реле $KV0$ появляется ток и оно срабатывает, давая сигнал и выводя защиту из работы.

Реле $KV0$ действует не только при обрывах, но и при коротком замыкании на землю в первичной сети; чтобы предотвратить блокирование защиты при этом, ставится реле KVA , реагирующее на появление тока I_0 в первичной сети.

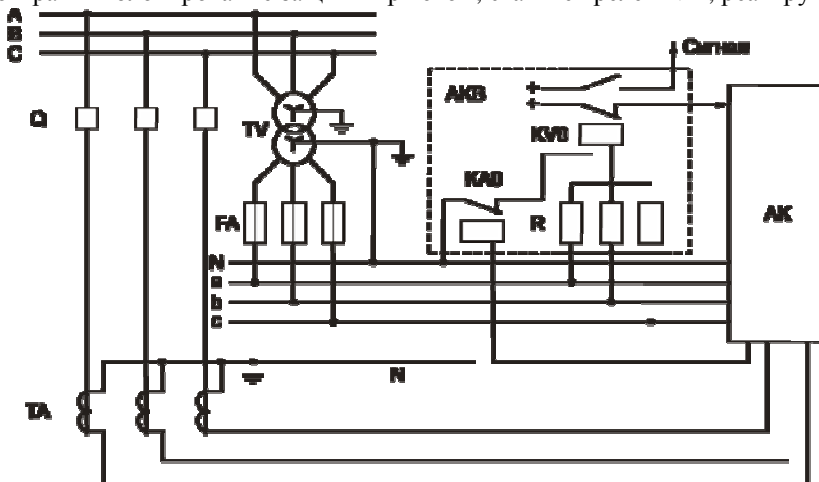


Рис. 51

10.3. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Требования к схемам включения. Реле KW включается, как правило, на фазный ток и фазное или междуфазное напряжение. Сочетание фаз тока и напряжения, питающего реле, называемое схемой включения, должно быть таким, чтобы реле правильно определяло знак мощности короткого замыкания при всех возможных случаях и видах повреждений, и чтобы к нему подводилась наибольшая мощность S_p :

$$S_p = U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p), \quad (56)$$

где α – угол внутреннего сдвига реле.

Мощность S_p может быть недостаточна для действия реле, при коротком замыкании близких к месту установки реле снижается напряжение U_p или при неблагоприятном значении угла $\varphi_p - \sin(\alpha - \varphi_p) \approx 0$. Отсюда вытекают следующие требования к схемам включения:

1. Реле должно включаться на такое напряжение, которое при близких коротких замыканиях не снижается до нуля.
2. U_p и I_p , подводимые к реле, должны подбираться так, чтобы угол сдвига между ними φ_p в условиях короткого замыкания не достигал значений, при которых S_p на зажимах реле ≈ 0 .

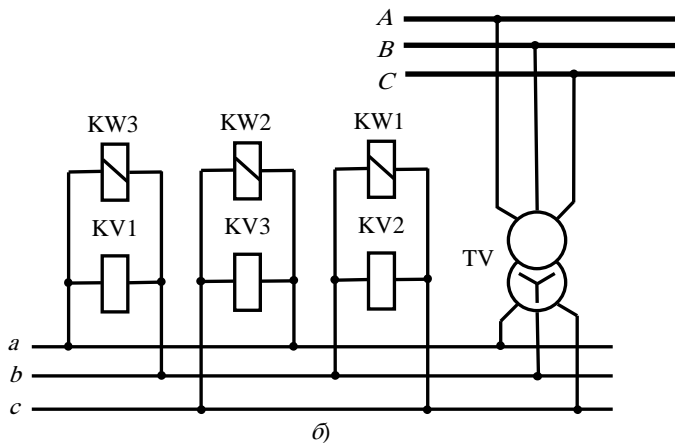
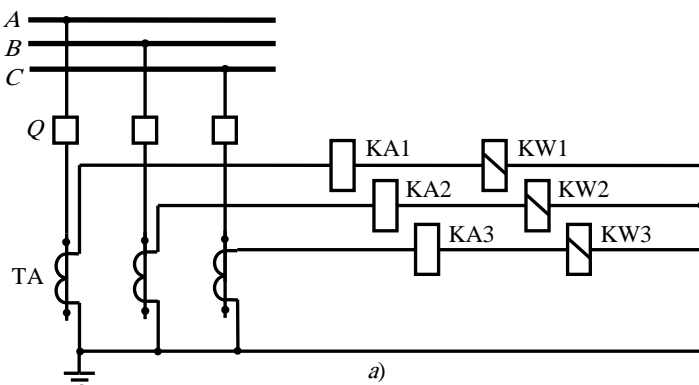
90° и 30° схемы. В современных схемах ТНЗ применяется включение реле направления мощности по так называемым 90° и иногда 30° схемам.

Принципиальная схема максимальной направленной защиты с двумя пусковыми органами: тока и минимального напряжения и однофазными реле направления мощности, включёнными по 90° схеме, приведена на рис. 52 (*a* – токовые цепи; *b* – цепи напряжения; *в* – цепи оперативного тока).

Принципиальная схема максимальной направленной защиты с токовым пусковым органом и трёхфазным реле направления мощности, включённым по 30° схеме, представлена на рис. 53 (*a* – токовые цепи; *b* – цепи напряжения; *в* – цепи оперативного тока).

Таблица 1

Реле	90° схема		30° схема	
	I_p	U_p	I_p	U_p
1	I_A	U_{BC}	I_A	U_{AC}
2	I_B	U_{CA}	I_B	U_{BA}
3	I_C	U_{AB}	I_C	U_{CB}



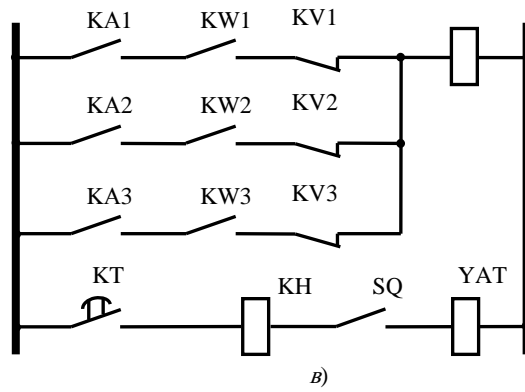


Рис. 52

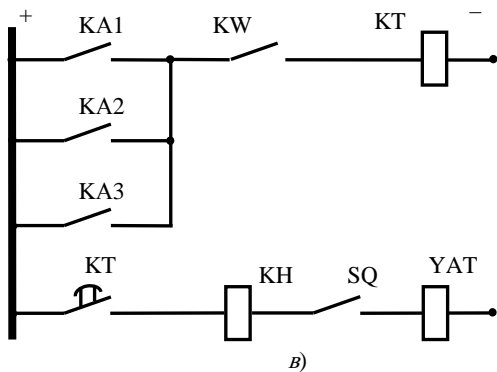
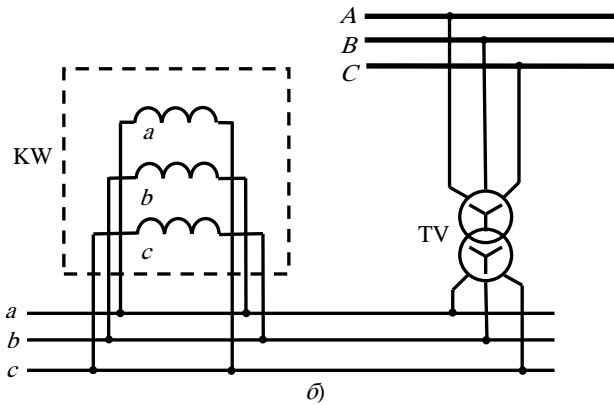
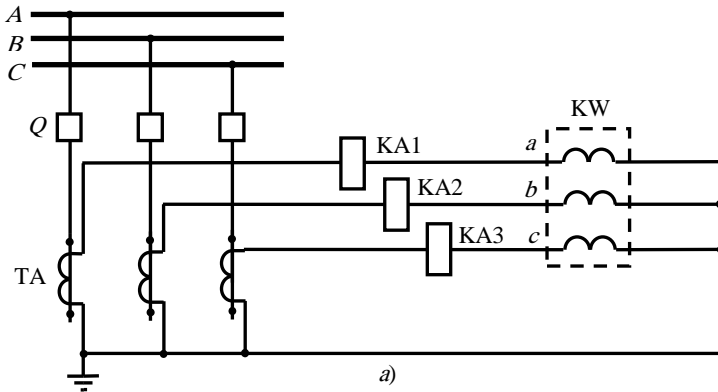


Рис. 53

Векторные диаграммы для 90° и 30° схемам соответственно представлены на рис. 54 и 55.

Названия схем условны – их именуют по углам φ_p между U_p и I_p в симметричном трёхфазном режиме при условии, что угол сдвига фаз между фазными током и напряжением равен нулю: $I_A \angle U_A = 0$ (чисто активная нагрузка).

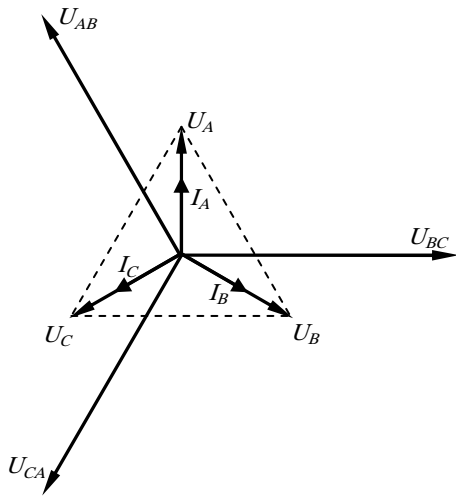


Рис. 54

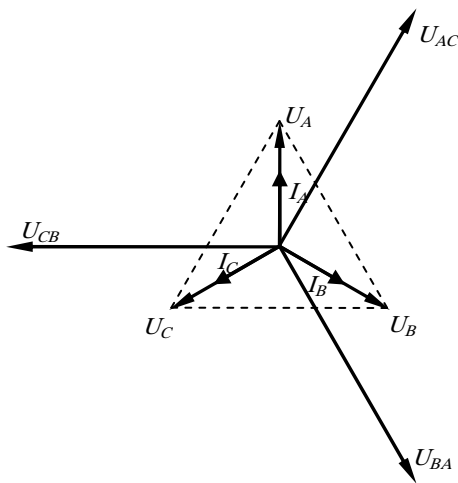


Рис. 55

Работа реле, включенных по 90° и 30° схемам. Рассмотрим работу 90° схемы (анализ работы 30° должен быть выполнен студентами самостоятельно):

$$\varphi_p = -30^\circ;$$

$$\alpha = 90^\circ + \varphi_p = 90 - 30 = 60^\circ;$$

$$M_s = kU_p I_p \cos(\varphi_p + 30^\circ);$$

$$I_p = I_A, \quad U_p = U_{BC}.$$

Трёхфазное короткое замыкание на линии. Ток I_A отстаёт от U_A на φ_k – определяется активным и реактивным сопротивлением линии от шин до точки короткого замыкания и влиянием активного сопротивления дуги (рис. 56): I'_A и I''_A – два предельных положения векторов тока; I''_A – ток короткого замыкания через дугу в начале линии; I'_A – ток при коротком замыкании за чисто реактивным сопротивлением; угол $\varphi_p = -(90^\circ - \varphi_k)$ – его предельные значения колеблются от 0 до 90°.

Диаграмма токов и напряжений на зажимах реле показана на рис. 56.

Величина электромагнитного момента максимальна: $M_{s, \max}$ при $\varphi_p = -30^\circ$ ($\varphi_k = 60^\circ$). При $\varphi_p = 0$ величина электромагнитного момента составляет 0,86 от $M_{s, \max}$, при $\varphi_p = -90^\circ$ величина момента составляет 0,5 от $M_{s, \max}$.

Из анализа векторной диаграммы можно сделать вывод, что работа реле при трёхфазном коротком замыкании в зоне и вне зоны действия будет правильной и величина электромагнитного момента M_s вполне достаточной для действия реле.

С точки зрения величины U_p схема обеспечивает максимально возможное значение напряжения на зажимах реле, поскольку питается линейным напряжением.

Исследования показали, что 90° схема оказывается наиболее выгодной для реле направления мощности с углом α от 30 до 60°, оптимальные условия имеют место при $\alpha = 45^\circ$.

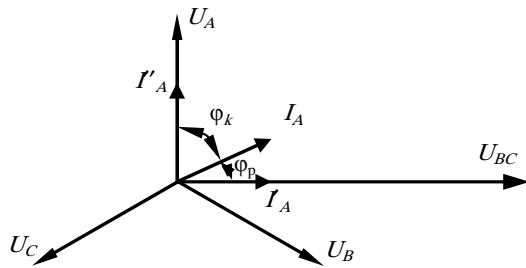


Рис. 56

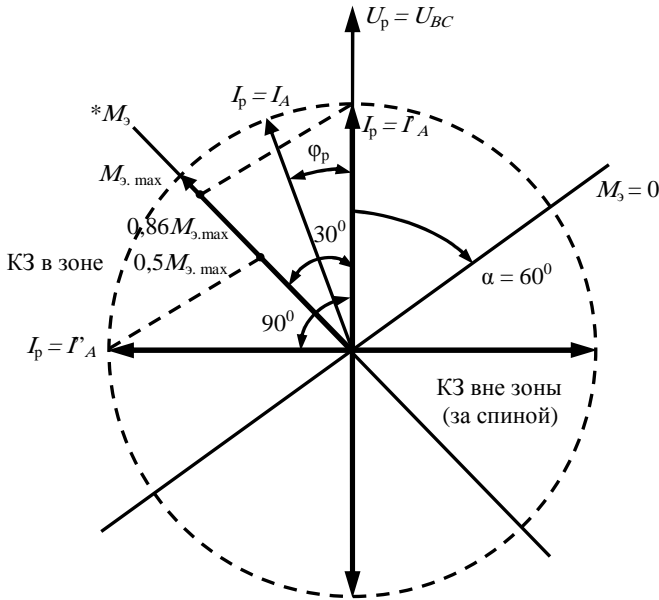


Рис. 57

Выводы по схеме:

1. Знак момента реле при всех видах короткого замыкания в зоне положителен, а вне зоны – отрицателен.
2. Величина электромагнитного момента M_3 в диапазоне возможных изменений угла φ_p остаётся значительной и достаточной для действия реле.
3. Напряжение U_p при симметричных коротких замыканиях имеет максимально возможное значение, обеспечивающие минимальную величину мёртвой зоны (при близких коротких замыканиях $U_p = 0$ – реле не срабатывает).

Недостаток 90° схемы: возможность неправильной работы однофазных реле направления мощности КВ при коротком замыкании за силовым трансформатором с соединением обмоток Y/Δ . (Чисто теоретическая возможность: короткое замыкание должно произойти через дугу с большим сопротивлением, на практике подобные происшествия не зафиксированы.) Трёхфазные реле в подобных случаях должны действовать правильно.

90° схема считается *лучшей* и *рекомендуется как типовая* для реле направления мощности КВ смешанного типа.

30° схема используется, в основном, для реле косинусного типа. Реле, включённые по такой схеме, ведут себя правильно при всех видах короткого замыкания.

Недостаток аналогичен реле, включённым по 90° схеме – возможность отказа при коротком замыкании за трансформатором Y/Δ .

Блокировка максимальной направленной защиты при замыканиях на землю. Для отключения однофазных коротких замыканий обычно применяются защиты, реагирующие на токи и напряжения нулевой последовательности.

Максимальная направленная защита (МНЗ), включаемая на фазные токи, используется только в качестве защиты от междуфазных замыканий. При коротком замыкании на землю защита блокируется. Пример выполнения блокировки показан на рис. 58 (*a* – токовые цепи; *b* – цепи оперативного тока).

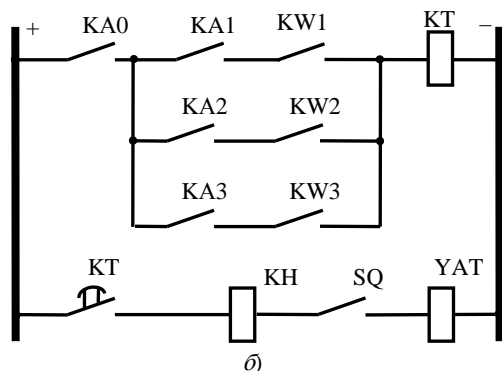
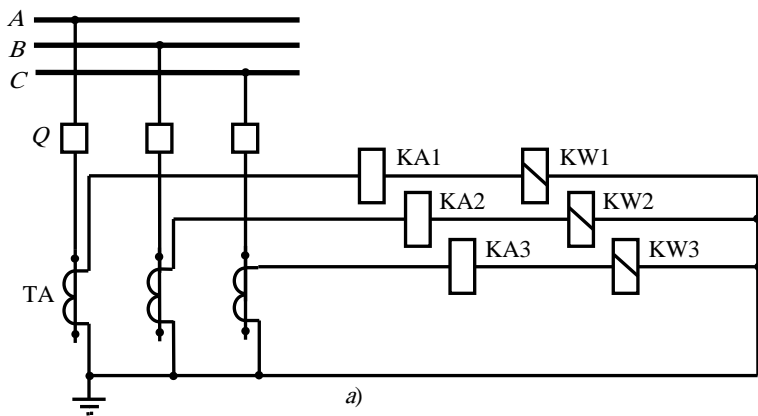


Рис. 58
10.4. ВЫБОР УСТАВОК ЗАЩИТЫ

Ток срабатывания реле выбирается, исходя из двух условий.

1. Отстройка от токов нагрузки

$$I_{с.з} = k_n k_3 I_{н.макс}.$$

2. Отстройка от токов, возникающих в неповреждённых фазах при коротком замыкании на землю в сети с глухозаземлённой нейтралью.

Анализ работы защит показал, что реле направления мощности, включённые на ток неповреждённых фаз, могут действовать неправильно. Рассмотрим токораспределение при однофазном коротком замыкании (рис. 59).

Реле KW, включённые в фазы A и B линии w1, могут разрешить защите отключить неповреждённую линию. Ток срабатывания защиты должен быть отстроен от тока неповреждённой фазы:

$$I_{с.з} = k_n I_{н.ф},$$

где $I_{н.ф}$ – ток в неповреждённой фазе; $k_n = 1,15 \dots 1,3$;

$$I_{н.ф} = I_n + kI_K$$

где k – коэффициент, учитывающий долю тока I_K замыкающегося по неповреждённой фазе, $k < 1$; I_n – ток нагрузки.

Для защит в сети с малым током замыкания на землю и защит, блокируемых при замыканиях на землю, ток срабатывания $I_{с.з}$ выбирается только по первому условию.

Для обеспечения селективности чувствительность защит, действующих в одном направлении, необходимо согласовывать так, чтобы токи срабатывания нарастали при обходе защит против направления их действия (рис. 60).

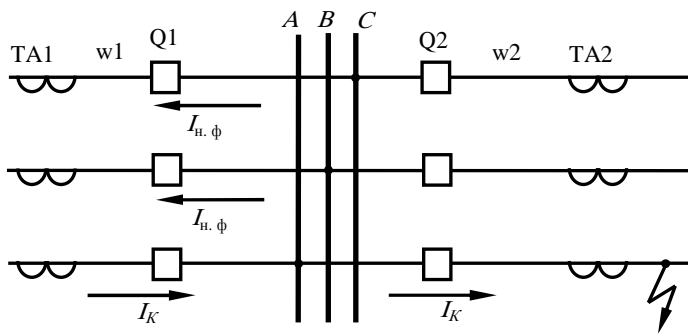


Рис. 59

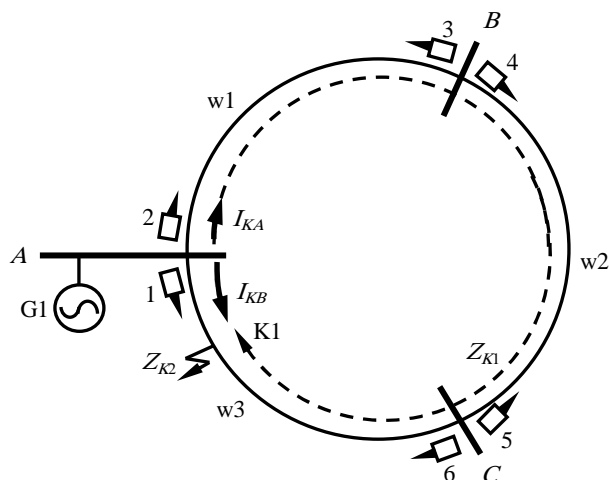


Рис. 60

Пояснение к рисунку. Рассмотрим действие защит в представленной сети при коротком замыкании в точке K1: $\frac{I_{KA}}{I_{KB}} = \frac{Z_{K2}}{Z_{K1}}$, отсюда следует, что $I_{KB} \gg I_{KA}$. Короткое замыкание должно быть устранено срабатыванием защит 1 и 6. Однако действие защит будет *каскадным*. $I_{KB} > I_{с.з. 1}$, $I_{KA} < I_{с.з. 6}$ вначале сработает защита 1, после отключения выключателя 1 ток I_{KA} резко возрастёт, превысив $I_{с.з. 6}$ – сработает защита 6:

$$I_{с.з. 6} < I_{с.з. 4} < I_{с.з. 2}.$$

Разница в величине тока срабатывания двух смежных защит должна составлять 10 %.

11. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ АВАРИЙ И ОТКАЗОВ В РАБОТЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Замыкание фазы на землю в сетях, работающих с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов в трёхфазной электрической сети, работающей с изолированной нейтралью, о замыкании фазы на землю узнают по показаниям вольтметров контроля изоляции. Вольтметры подключаются к зажимам основной вторичной обмотки трёхфазного трёхобмоточного трансформатора напряжения серии НТМИ, каждая фаза которого имеет отдельный броневого магнитопровод, рассчитанный на длительное повышение индукции. При металлическом замыкании фазы на землю (рис. 61, а) обмотка трансформатора напряжённой повреждённой фазы сети оказывается замкнутой накоротко, и показание её вольтметра снизится до нуля. Две другие фазы будут находиться под линейным напряжением. Индукция в магнитопроводах этих фаз возрастёт в $\sqrt{3}$ раз, и вольтметры покажут линейные напряжения. (Для контроля изоляции применяются также однофазные трансформаторы напряжения).

В точке замыкания фазы на землю проходит ток, равный геометрической сумме ёмкостных токов неповреждённых фаз:

$$I_C = -3U_\phi j\omega C, \quad (57)$$

где I_C – ток замыкания на землю, А; C – ёмкость сети, Ф; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, c^{-1} .

Чем протяженнее сеть, тем больше её ёмкость и, следовательно, тем больше ток замыкания на землю.

Замыкание фазы на землю не изменяет симметрии линейных напряжений и не нарушает электроснабжения потребителей. Однако опасность замыкания фазы на землю состоит в том, что в месте повреждения обычно возникает перемежающаяся заземляющая дуга, длительное горение которой при большом ёмкостном токе приводит к тепловому эффекту и значительной ионизации окружающего пространства, что создаёт благоприятные условия для возникновения междуфазных коротких замыканий. Прерывистый характер горения заземляющей дуги приводит к опасным перенапряжениям (до $3,2 U_\phi$),

распространяющимся по всей сети. Если при этом на отдельных участках сети изоляция окажется пониженной (например, вследствие загрязнения и увлажнения), то дуговые перенапряжения могут привести к междуфазным перекрытиям и аварийным отключениям оборудования. Но даже при отсутствии дуговых перенапряжений само по себе повышение до линейного напряжения двух фаз уже может привести к пробое дефектной изоляции.

Назначение дугогасящих реакторов. Задача эксплуатации состоит в том, чтобы уменьшить ток замыкания на землю и тем самым обеспечить быстрое погасание заземляющей дуги. Для этого необходимо, чтобы ёмкостные токи замыкания на землю не превышали следующих значений:

Напряжение сети, кВ	6	10	20	35
Ёмкостный ток, А	30	20	15	10

Эти токи соответствуют требованиям ПТЭ. Однако опыт показывает, что для обеспечения надёжного самопогасания дуги в сетях 6 и 10 кВ ёмкостные токи целесообразно снизить до 20 и 15 А, соответственно. В случае превышения указанных значений токов в нейтраль обмотки трансформатора включается дугогасящий реактор (рис. 61, б), уменьшающий (компенсирующий) ёмкостный ток через место повреждения до минимальных значений.

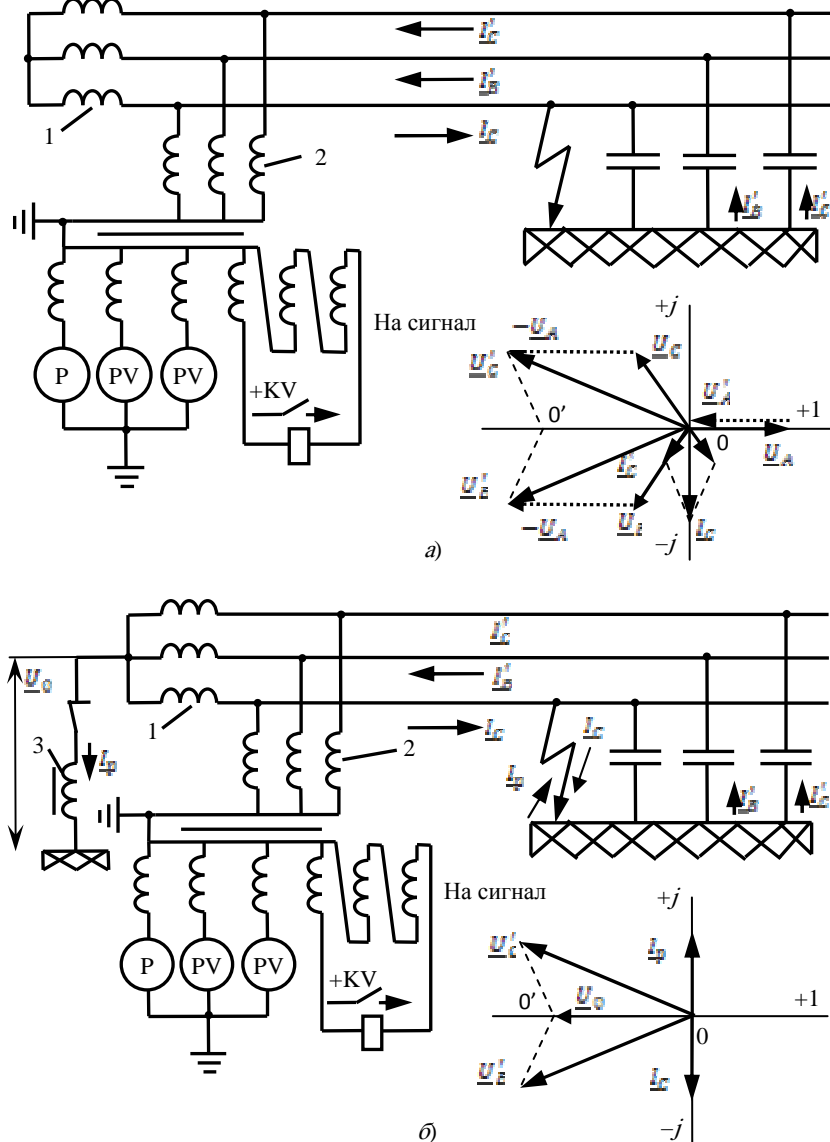


Рис. 61

Индуктивный ток дугогасящего реактора I_p возникает в результате воздействия на него напряжения смещения нейтрали $U_0 = -U_A$, появляющегося на нейтрали при замыкании фазы на землю. Ток равен

$$I_p = j \frac{3U_\phi}{3\omega L_p + \omega L_\tau},$$

где L_p и L_τ – индуктивности дугогасящего реактора и трансформатора, соответственно, Гн; U_ϕ – фазное напряжение.

С компенсацией ёмкостных токов воздушные и кабельные сети могут некоторое время работать с замыканием фазы на землю.

Выбор настройки дугогасящих реакторов. При $I_p = I_c = 0$ ёмкостная составляющая тока в месте замыкания на землю полностью компенсируется индуктивным током реактора – наступает резонанс токов. Дугогасящие реакторы, как правило, имеют резонансную настройку, что облегчает гашение дуги. Отклонение от резонансной настройки называют расстройкой компенсации. На практике допускается настройка с перекомпенсацией ($I_p = I_c$), если реактивная составляющая тока замыкания на землю не более 5 А, а степень расстройки $\frac{I_c - I_p}{I_c}$ не превышает 5 %.

Настройка с недокомпенсацией ($I_p < I_c$) может применяться в кабельных и воздушных сетях, если любые аварийно возникшие несимметрии ёмкостей фаз не приводят к появлению напряжения смещения нейтрали, превышающего $0,7 U_{\phi}$.

Ток замыкания на землю определяется расстройкой компенсации, активными утечками по изоляции и некомпенсируемыми токами высших гармоник. При резонансной настройке ток замыкания минимален, и, как показывает опыт, перенапряжения в сети не превышают $2,7 U_{\phi}$.

При эксплуатации воздушных сетей нередко отступают от резонансной настройки, чтобы устранить искажения фазных напряжений на шинах подстанций, ошибочно принимаемые персоналом за неполные замыкания на землю. Дело в том, что в любой воздушной сети 6...35 кВ всегда имеется несимметрия ёмкостей фаз относительно земли, зависящая от расположения проводов на опорах и распределения по фазам конденсаторов связи. Это вызывает появление на нейтрали некоторого напряжения несимметрии U_{nc} .

Степень несимметрии $u_0 = (U_{nc} / U_{\phi}) \cdot 100$ обычно не превышает 1,5 %. Для сетей 10 кВ она, например, составляет около 100 В и практически в нормальном режиме работы сети не сказывается на показаниях вольтметров, измеряющих напряжения фаз.

Включение в нейтраль дугогасящего реактора существенно изменяет потенциалы нейтрали и проводов сети. На нейтрали появляется напряжение смещения нейтрали U_0 , обусловленное наличием в сети несимметрии. Это напряжение будет приложено к выводам дугогасящего реактора. При резонансной настройке напряжение смещения нейтрали может достигнуть значений, соизмеримых с фазным напряжением. Оно приведёт к искажению фазных напряжений и даже появлению сигнала "земля в сети", хотя замыкание на землю в это время отсутствует. Расстройкой дугогасящего реактора удаётся отойти от точки резонанса (колебательный контур образуется индуктивностью реактора и суммарной ёмкостью фаз сети), снизить напряжение смещения нейтрали и выровнять показания вольтметров. При отсутствии замыкания на землю в сети смещение нейтрали допускается не более $0,15 U_{\phi}$. Однако с точки зрения гашения дуги оптимальной все же является резонансная настройка. Всякая расстройка компенсации ведёт к увеличению тока, проходящего в месте повреждения в режиме работы сети с замыканием на землю, и поэтому не рекомендуется. При большом смещении нейтрали должны приниматься меры, направленные на снижение несимметрии ёмкостей в сети. В кабельных сетях применяется исключительно резонансная настройка, так как ёмкости фаз кабелей симметричны и напряжение несимметрии там практически отсутствует.

12. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. Генератор трёхфазного тока питает нагрузку через соединительную линию (рис. 62). Даны активное и реактивное сопротивления фазы генератора, линии и нагрузки, а также фазная ЭДС генератора: $r_g = 0,25$ Ом; $x_g = 1,25$ Ом; $r_l = 0,25$ Ом; $x_l = 0,45$ Ом; $r_n = 8,0$ Ом; $x_n = 6,0$ Ом; $U_{\phi} = 120$ В.

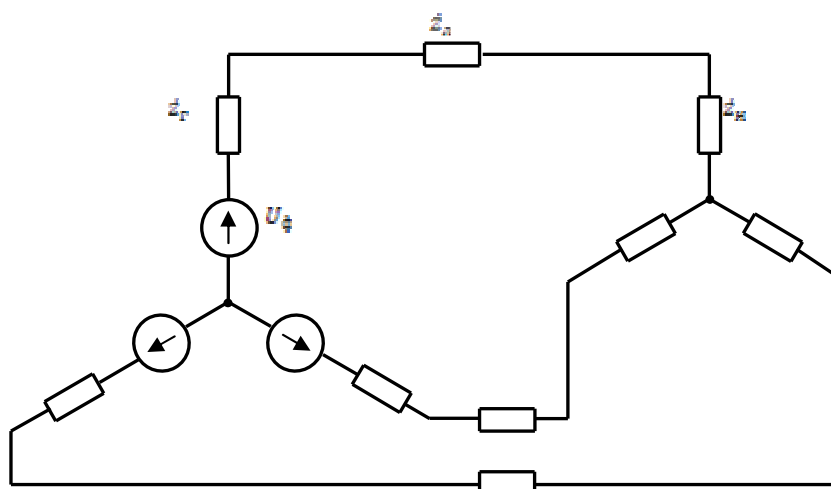


Рис. 62

Определить линейные токи и напряжения в начале и конце линии, а также полезную мощность.

Решение. Полное сопротивление одной фазы

$$Z_{\phi} = \sqrt{(\sum r)^2 + (\sum x)^2} = \sqrt{8,5^2 + 7,7^2} = 11,47 \text{ Ом.}$$

Ток в линии (при соединении звездой этот ток является также током фазы генератора и нагрузки)

$$I_{\text{л}} = I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{120}{11,47} = 10,46 \text{ А.}$$

Фазное напряжение нагрузки

$$U'_{\phi} = I_{\phi} Z_{\text{н}} = 10,46 \cdot 10 = 104,6 \text{ В,}$$

где $Z_{\text{н}}$ – полное сопротивление фазы нагрузки, равное

$$Z_{\text{н}} = \sqrt{r_{\text{н}}^2 + x_{\text{н}}^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом.}$$

Линейное напряжение в конце линии (на зажимах нагрузки)

$$U'_{\text{л}} = \sqrt{3} U'_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 104,6 = 181 \text{ В.}$$

Фазное напряжение в начале линии

$$U_{\phi} = I_{\text{л}} Z_{\text{н+л}} = 10,46 \cdot 10,48 = 109,7 \text{ В,}$$

где $Z_{\text{н+л}}$ – полное сопротивление фазы нагрузки вместе с фазой линии,

$$Z_{\text{н+л}} = \sqrt{(r_{\text{н}} + r_{\text{л}})^2 + (x_{\text{н}} + x_{\text{л}})^2} = \sqrt{8,25^2 + 6,45^2} = 10,48 \text{ Ом.}$$

Линейное напряжение в начале линии (на зажимах генератора)

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 109,7 \approx 190 \text{ В.}$$

Полезная мощность

$$P = \sqrt{3} U'_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = 1,73 \cdot 181 \cdot 10,46 \cdot 0,8 \approx 262 \text{ Вт}$$

или, что то же,

$$P = 3 I_{\phi}^2 r_{\text{н}} = 3 \cdot 10,46^2 \cdot 8 \approx 262 \text{ Вт.}$$

Пример 2. В качестве примера применения формул (3) рассмотрим схему фазоуказателя, используемую для определения чередования фаз по времени (рис. 63). Ёмкостное сопротивление конденсатора берётся равным по величине сопротивлению лампы, т.е. $X_C = R$. Тогда

$$Y_A = \frac{1}{-jX_C} = j\frac{1}{R}; \quad Y_B = Y_C = \frac{1}{R}.$$

Пусть

$$U_{BC} = a^2 U_{AB}; \quad U_{CA} = a U_{AB}.$$

Из (3) получим

$$U_B = \frac{U_{AB}(a^2 + j)}{2 + j}; \quad U_C = \frac{U_{AB}(ja - a^2)}{2 + j}.$$

Отношение модулей этих комплексов даёт

$$\left| \frac{U_B}{U_C} \right| = \left| \frac{a^2 + j}{a(j - a)} \right| = 3,73.$$

Следовательно, лампа, присоединённая к фазе B , будет светить ярко, а лампа, присоединённая к фазе C , – тускло.

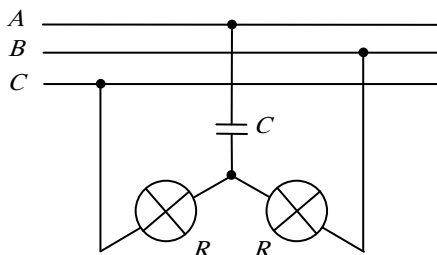


Рис. 63

Пример 3. Определить активное сопротивление кабеля (на фазу) при передаче активной мощности $P = 2,5$ кВт при КПД $\eta = 25\%$, линейном напряжении $U_{\text{л}} = 200$ В и $\cos \varphi = 0,7$.

Решение. Ток в кабеле

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{л}} \cos \varphi} = \frac{2,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 200 \cdot 0,7} \approx 10,3 \text{ А.}$$

Потери в кабеле на одну фазу

$$\Delta P_{\phi} = \frac{100 - \eta}{3 \cdot 10} P = \frac{100 - 85}{300} 2,5 \cdot 10^3 = 125 \text{ Вт.}$$

Активное сопротивление кабеля

$$r_{\text{л}} = \frac{\Delta P_{\phi}}{I^2} = \frac{125}{10,3^2} = 11,8 \text{ Ом.}$$

Пример 4. Нагрузка, соединённая в звезду с нулевым проводом, к которой приложено напряжение симметричной трёхфазной системы, представлена на рис. 64. Линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380$ В; $R = 22$ Ом.

$$X_L = \frac{22}{\sqrt{3}} \text{ Ом}; \quad X_C = \frac{22}{\sqrt{3}} \text{ Ом.}$$

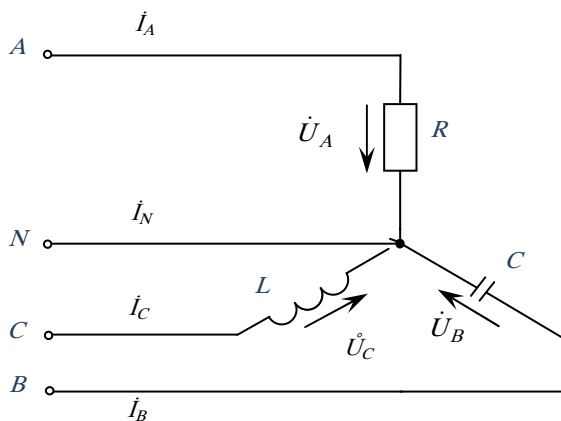


Рис. 64

Требуется:

а) определить линейные токи и ток в нулевом проводе;

б) построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Решение. Выбираем положительные напряжения для токов и фазных напряжений и отмечаем их стрелками на расчётной схеме рис. 65.

Принимаем, что

$$U_A = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}; \quad U_B = a^2 U_A = a^2 220 \text{ В};$$

$$U_C = a U_A = a 220 \text{ В},$$

находим комплексы линейных токов:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{R} = \frac{220}{22} = 10 \text{ А};$$

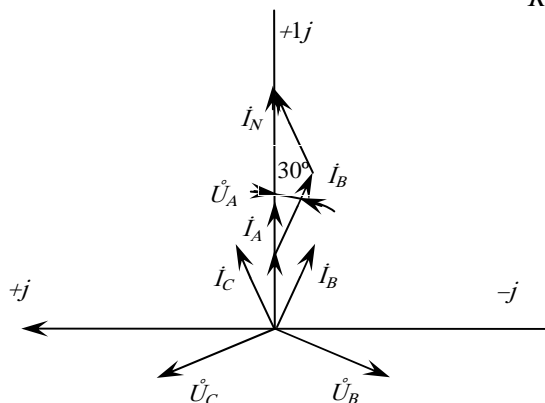


Рис. 65

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{-jX_C} = \frac{a^2 220 \sqrt{3}}{-j22} = ja^2 \sqrt{3} 10 \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{jX_L} = \frac{a 220 \sqrt{3}}{j22} = -ja \sqrt{3} 10 \text{ А}.$$

Находим ток в нулевом проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 10 + j(a^2 - a)\sqrt{3} 10 = 40 \text{ А}.$$

Строим на комплексной плоскости векторную диаграмму напряжений и токов (рис. 65).

Пример 5. В цепь трёхфазного тока включена равномерная нагрузка, соединённая в треугольник с сопротивлением каждой фазы, $Z = 12 + j5 = 13e^{j22^\circ}$, Ом.

Сопротивлением линии ввиду незначительности его можно пренебречь. Линейное напряжение $U_{\text{л}} = 190 \text{ В}$.

Определить токи в фазах и линии при обрыве фазы BC (рис. 66).

Решение. Линейные напряжения

$$\dot{U}_{AB} = 190e^{j30^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_{BC} = 190e^{-j90^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_{CA} = 190e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Тогда токи в фазах AB и CA будут равны

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{190e^{j30^\circ}}{13e^{j22^\circ}} = 14,6e^{j8^\circ} \text{ А};$$

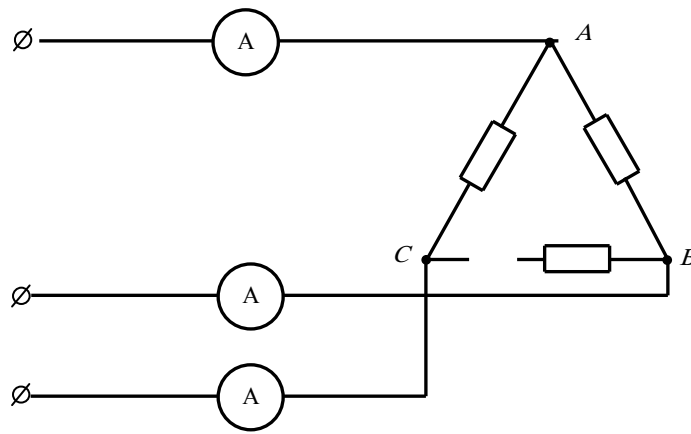


Рис. 66

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{190e^{j150^\circ}}{13e^{j22^\circ}} = 14,6e^{j128^\circ}, \text{ A.}$$

Токи в линии

$$\dot{I}_B = -\dot{I}_{AB} = -14,6e^{j8^\circ} = 14,6e^{-j172^\circ}, \text{ A;}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} &= 14,6 \cos 8^\circ + j14,6 \sin 8^\circ - 14,6 \cos 128^\circ - \\ &- j14,6 \sin 128^\circ = 14,45 + j2,03 + 8,99 - j11,5 = 23,44 - j8,97 = 25,1e^{-j21^\circ}, \text{ A.} \end{aligned}$$

Построим векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 67).

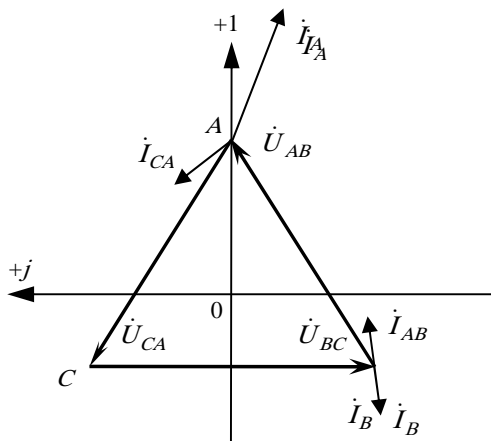


Рис. 67

Пример 6. В цепь трёхфазного тока с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 190$ В включена равномерная нагрузка, соединённая в звезду, с сопротивлением каждой фазы $Z_{\phi} = 6 + j2,5$, Ом.

Определить ток и потребляемую мощность при нормальном режиме, а также при ненормальных режимах: 1) обрыв фазы B; 2) короткое замыкание фазы A.

Решение. Расчёт нормального режима
Фазное напряжение

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{190}{\sqrt{3}} = 110 \text{ В.}$$

Сопротивление фазы нагрузки

$$Z_{\phi} = 6 + j2,5 = 6,5e^{j22^\circ 35' }, \text{ Ом.}$$

Фазный и линейный токи

$$I_{\phi} = I_{\pi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{110}{6,5} = 16,9 \text{ А.}$$

Потребляемая мощность

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 190 \cdot 16,9 \cdot \cos 22^{\circ}35' \approx 5140 \text{ Вт.}$$

Проверка

$$P = 3I^2 r = 3 \cdot 16,9^2 \cdot 6 \approx 5140 \text{ Вт.}$$

Расчёт ненормальных режимов

1) *Обрыв фазы В*. При обрыве фазы *В* фазы *А* и *С* тем самым включаются последовательно на линейное напряжение, поэтому

$$I_A = I_C = \frac{U_{\pi}}{2Z_{\phi}} = \frac{190}{2 \cdot 6,5} = \frac{190}{13} = 14,62 \text{ А.}$$

Фазное напряжение

$$U_A = U_C = \frac{U_{\pi}}{2} = \frac{190}{2} = 95 \text{ В.}$$

Потребляемая мощность в фазах *А* и *С*

$$P = 2I_{\pi}^2 r = 2 \cdot 14,62^2 \cdot 6 = 2750 \text{ Вт.}$$

2) *Короткое замыкание фазы А*. Неповреждённые фазы *В* и *С* находятся под полным линейным напряжением:

$$U_B = U_C = U_{\pi} = 190 \text{ В; } U_A = 0.$$

Токи при коротком замыкании

$$I_B = I_C = \frac{U_{\pi}}{Z_{\phi}} = \frac{190}{6,5} = 29,24 \text{ А.}$$

Согласно первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_A = -(\dot{I}_B + \dot{I}_C)$$

или при равномерной нагрузке

$$\dot{I}_A = 2\dot{I}_B \cos 30^{\circ} = \sqrt{3}I_B = 1,73 \cdot 29,24 = 50,6 \text{ А.}$$

Потребляемая мощность короткого замыкания

$$P = 2I_B^2 r = 2 \cdot 29,24^2 \cdot 6 \approx 10\,260 \text{ Вт} = 10,26 \text{ кВт.}$$

Пример 7. Напряжения симметричной трёхфазной системы приложены к нагрузке, соединённой звездой без нулевого провода (рис. 68). Линейное напряжение $U_{\pi} = 380 \text{ В}$; $R = 20 \text{ Ом}$; $X_L = 40 \text{ Ом}$; $X_C = 30 \text{ Ом}$.

Требуется:

- определить напряжение смещения нейтрали;
- определить линейные токи.

Решение. Выбираем положительные направления для токов и фазных напряжений и отмечаем их стрелкой на расчётной схеме рис. 68, а.

Определяем напряжение смещения нейтрали:

$$U_N = U_{\phi} \frac{\frac{1}{R} + a \frac{1}{-jX_C} + a^2 \frac{1}{jX_L}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{-jX_C} + \frac{1}{jX_L}} = 220 \cdot \frac{\frac{1}{20} + a \frac{1}{-j30} + a^2 \frac{1}{j40}}{\frac{1}{20} + \frac{1}{-j30} + \frac{1}{j40}},$$

НО ТАК КАК

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

ТО

$$U_N = 220 \cdot \frac{\frac{1}{2} + j\frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - j\frac{1}{4} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)}{\frac{1}{2} + j\frac{1}{12}} =$$

$$= 220 \cdot \frac{12 - 7\sqrt{3} - j}{12 + 2j} = 110 \cdot \frac{-0,11 - j}{6 + j}, \text{ В,}$$

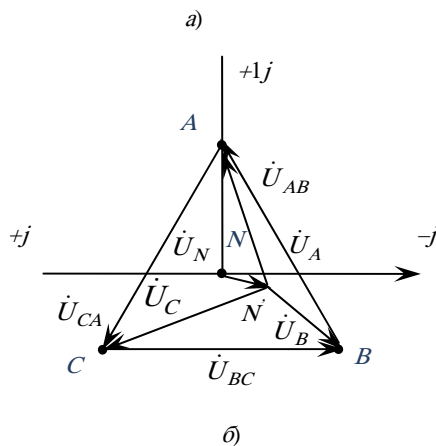
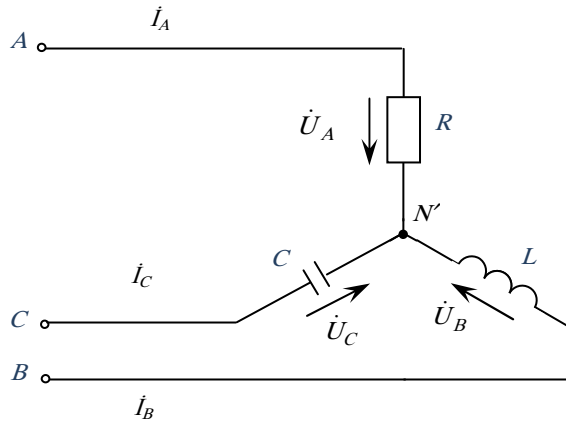


Рис. 68

и окончательно

$$U_N = (-4,9 - 17,5j), \text{ В.}$$

Находим линейные токи:

$$I_A = \frac{U_{\phi A} - U_N}{R} = \frac{220 - (-4,9 - 17,5j)}{20} = 11,2 + 0,875j, \text{ А;}$$

$$I_B = \frac{a^2 U_{\phi A} - U_N}{jX_L} = \frac{a^2 220 - (-4,9 - 17,5j)}{j40} = -4,32 + 2,62j, \text{ А;}$$

$$I_C = \frac{a U_{\phi A} - U_N}{-jX_C} = \frac{a 220 - (-4,9 - 17,5j)}{-j30} = -6,9 - 3,5j, \text{ А.}$$

Пример 8. Для заданной схемы рис. 69, а сопротивления лучей звезды равны $Z_B = Z_B e^{j\pi/6}$ и $Z_A = Z_C = -jX_C$, причём $Z_A = Z_B = Z_C$.

Определить напряжение смещения нейтрали U_0 ; доказать, что в таком случае напряжение смещения U_0 будет в точности равно фазному напряжению U_C . Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Решение. Заданные сопротивления указывают на неравномерную нагрузку.
Используется формула напряжения смещения нейтрали

$$\begin{aligned}\dot{U}_0 &= \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = \frac{\dot{U}_A Y \left(e^{j\frac{\pi}{2}} + e^{-j120^\circ} - e^{-j\frac{\pi}{2}} + e^{j120^\circ} e^{j\frac{\pi}{2}} \right)}{Y \left(e^{j\frac{\pi}{2}} + e^{-j\frac{\pi}{6}} + e^{j\frac{\pi}{2}} \right)} = \\ &= \dot{U}_A \frac{j + (-0,5 - j0,87)(0,87 - j0,5) + j(-0,5 + j0,87)}{j + 0,87 - j0,5 + j} = \\ &= \dot{U}_A (-0,5 + j0,87) = \dot{U}_A e^{j120^\circ} = \dot{U}_C,\end{aligned}$$

т.е. нейтральная точка перемещается в точку C.

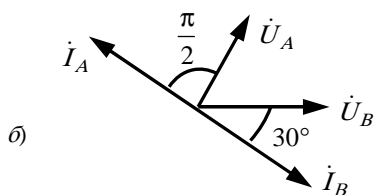
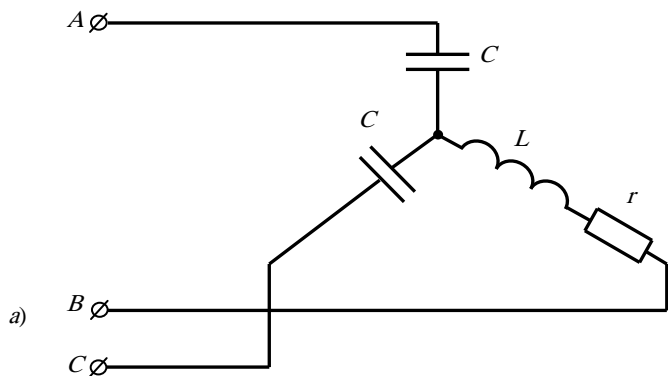


Рис. 69

Фазные напряжения

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_0 = \dot{U}_A - \dot{U}_C = \dot{U}_{CA};$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_0 = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC};$$

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_C = 0.$$

Токи в фазах и линии

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}'_A}{Z_A} = \frac{\dot{U}_{CA}}{-jX_C} = jI,$$

где $I = \frac{U_{\text{л}}}{Z}$;

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}'_B}{Z_B} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Ze^{j\frac{\pi}{6}}} = \dot{I}_B e^{-j\frac{\pi}{6}},$$

но

$$\dot{I}_B e^{-j\frac{\pi}{6}} = \frac{\dot{U}_{CA} e^{-j60^\circ}}{Ze^{j\frac{\pi}{6}}} = \dot{I} e^{-j\frac{\pi}{2}} = -jI,$$

т.е. $\dot{I}_A = -\dot{I}_B$, $\dot{I}_C = 0$ так как $U'_C = 0$.

Векторная диаграмма напряжений и токов построена на рис. 69, б.

Пример 9. В схеме (рис. 70, а) дано $R = 22 \text{ Ом}$; $X_L = 19 \text{ Ом}$; $X_C = 19 \text{ Ом}$; $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$.

Требуется:

- определить линейные токи;
- определить фазные токи;
- построить векторную диаграмму фазных токов и напряжений.

Решение. Выбираем положительные напряжения для токов и напряжений на расчётной схеме рис. 70, а.

Определяем фазные токи:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{R} = \frac{380e^{j30^\circ}}{22} = 10\sqrt{3}e^{j30^\circ}, \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{-jX_C} = \frac{380e^{-j90^\circ}}{-j19} = 20 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{jX_L} = \frac{380e^{j150^\circ}}{j19} = 20e^{j60^\circ}, \text{ А}.$$

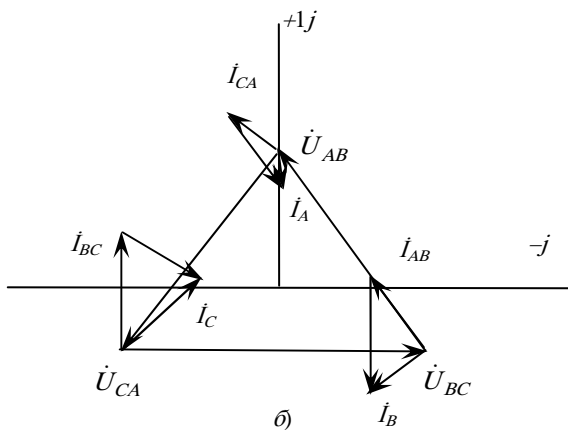
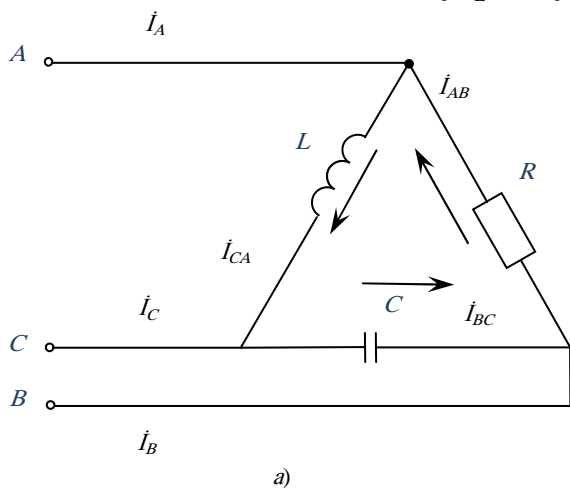


Рис. 70

Определяем линейные токи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{AB} = 20e^{j60^\circ} - 10\sqrt{3}e^{j30^\circ} = 20\cos 60^\circ + j20\sin 60^\circ - \\ &\quad - 10\sqrt{3}\cos 30^\circ - j10\sqrt{3}\sin 30^\circ = 10 - 15 + j(10\sqrt{3} - 5\sqrt{3}) = -5 + j5\sqrt{3}, \text{ А}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{BC} = 10\sqrt{3}e^{j30^\circ} - 20 = 15 - 20 + j5\sqrt{3} = -5 + j5\sqrt{3}, \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AC} = 20 + 10 + 10\sqrt{3}j = 30 + 10\sqrt{3}j, \text{ А.}$$

Строим векторную диаграмму токов и векторную диаграмму напряжений (рис. 70, б).

Пример 10. В цепь трёхфазного тока включена равномерная нагрузка, соединённая в треугольник, причём сопротивление фазы нагрузки и линии соответственно равны $Z_n = 18 + j6$, Ом и $Z_l = 1 + j3$, Ом. Параллельно с нагрузкой включены в звезду конденсаторы (рис. 71).

Определить ёмкость конденсаторов, необходимую для достижения полной компенсации сдвига фаз между линейными напряжениями и током в начале линии, если частота напряжения $f = 50$ Гц. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Решение. Преобразование треугольника нагрузки в эквивалентную звезду

$$Z'_n = \frac{1}{3} Z_n = \frac{1}{3}(18 + j6) = 6 + j2, \text{ Ом.}$$

Параллельное соединение одной фазы звезды вместе с конденсатором

$$\begin{aligned} Z'' &= \frac{Z_n(-jx_C)}{Z_n - jx_C} = \frac{(6 + j2)(-jx_C)}{6 + j(2 - x_C)} = \frac{(-j6x_C + 2x_C)[6 - j(2 - x_C)]}{6^2 + (2 - x_C)^2} = \\ &= \frac{6x_C^2 + j(2x_C^2 - 40x_C)}{6^2 + (2 - x_C)^2}, \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Эквивалентное сопротивление на фазу

$$\begin{aligned} Z_3 &= Z'' + Z_l = \frac{6x_C^2 + j(2x_C^2 - 40x_C)}{6^2 + (2 - x_C)^2} + \frac{(1 + j3)[6^2 + (2 - x_C)^2]}{6^2 + (2 - x_C)^2} = \\ &= \frac{7x_C^2 - 4x_C + 40}{6^2 + (2 - x_C)^2} + j \frac{5x_C^2 - 52x_C + 120}{6^2 + (2 - x_C)^2} = r_3 + jx_3. \end{aligned}$$

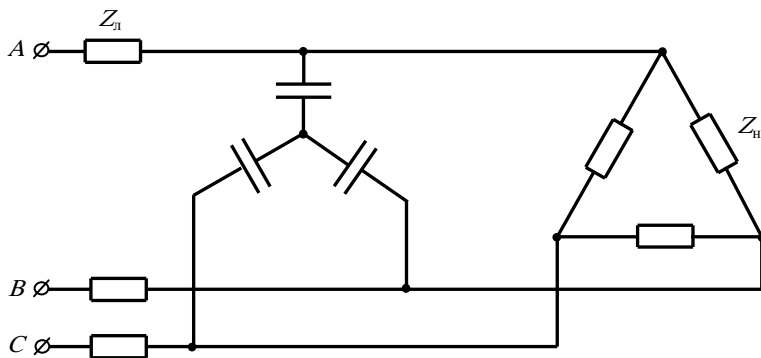


Рис. 71

Для того чтобы был бы равен единице ($\angle\phi$ был бы равен нулю), необходимо, чтобы реактивное сопротивление было равно нулю. Следовательно, мнимая часть Z_3 должна быть равна нулю, т.е.

$$5x_C^2 - 52x_C + 120 = 0.$$

Решая квадратное уравнение, находим, что наибольшее значение x_C , удовлетворяющее уравнению, равно 6,59 Ом, т.е. $x_C = 6,95$ Ом, откуда

$$C = \frac{1}{\omega x_C} = \frac{1}{3,14 \cdot 6,95} = \frac{10^6}{2182,3} \approx 460 \text{ мкФ.}$$

Пример 11. Определить показание ваттметра, включённого по схеме, представленной на рис. 72. Вычислить активную и реактивную мощность всех фаз нагрузки при $Z_n = 8 + j6$, Ом и линейном напряжении $U_n = 190$ В.

Решение. Ваттметр, включённый по данной схеме, покажет мощность, равную произведению $U_{AC}I_B \cos(90^\circ + \phi)$, а это есть реактивная мощность. Отсюда в соответствии с рис. 73 фазное напряжение

$$U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} = \frac{190}{1,73} = 110 \text{ В,}$$

ток в фазе и в линии

$$I = \frac{U_{\phi}}{Z} = \frac{110}{10} = 11 \text{ А,}$$

угол сдвига фаз

$$\varphi = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{6}{8} = 37^{\circ} .$$

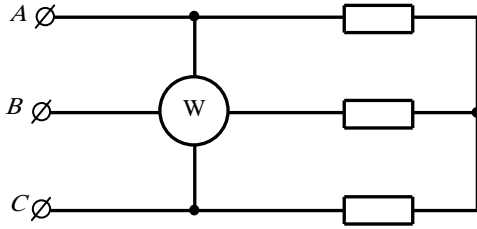


Рис. 72

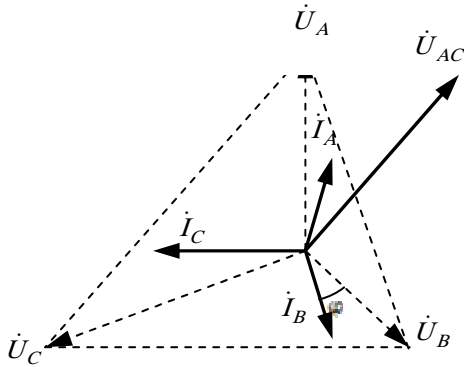


Рис. 73

Показание включённого в схему ваттметра

$$Q = U_{л} I_{л} \sin \varphi = 190 \cdot 11 \cdot \sin 37^{\circ} = 1252 \text{ вар.}$$

Потребляемая нагрузкой активная мощность

$$P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi = 1,73 \cdot 190 \cdot 11 \cdot \cos 37^{\circ} = 2905 \text{ Вт} \approx 2,9 \text{ кВт.}$$

Проверка:

$$P = 3I^2 r = 3 \cdot 11^2 \cdot 8 = 2905 \text{ Вт.}$$

Пример 12. Монтаж обмотки трёхфазного генератора был выполнен с нарушением порядка чередования фаз, как это показано на рис. 74.

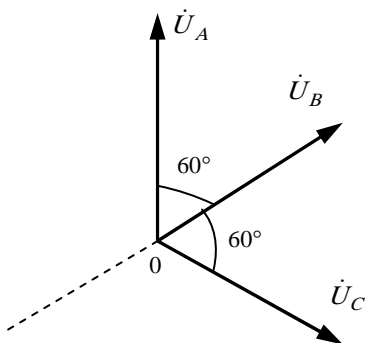


Рис. 74

Такой генератор с фазным напряжением, равным $U_{\phi} = 220$ В, питает через линию равномерную нагрузку, соединённую в звезду, причём сопротивление фазы нагрузки равно $Z_n = 7,5 + j5$, Ом, а сопротивление фазы линии $Z_l = 0,5 + j$, Ом.

Определить токи в линии при наличии и отсутствии нейтрального провода.

Решение

1. *Расчёт схемы при наличии нейтрального провода.*

Согласно условию фазные напряжения равны

$$\dot{U}_A = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A e^{-j60^\circ} = 220 \cos 60^\circ - j220 \sin 60^\circ = 110 - j190, \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_A e^{-j120^\circ} = 220 \cos 120^\circ - j220 \sin 60^\circ = -110 - j190, \text{ В}.$$

Сопротивления одной фазы

$$Z_{\phi} = Z_n + Z_l = 7,5 + j5 + 0,5 + j = 8 + j6 = 10e^{j37^\circ}, \text{ Ом}.$$

Токи в линии

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_{\phi}} = \frac{220}{10e^{j37^\circ}} = 22e^{-j37^\circ} = 17,54 - j13,2, \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_{\phi}} = \frac{220e^{-j60^\circ}}{10e^{j37^\circ}} = 22e^{-j97^\circ} = -2,68 - j21,77, \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_{\phi}} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{10e^{j37^\circ}} = 22e^{-j157^\circ} = -20,22 - j8,58, \text{ А}.$$

Ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_0 = \sum \dot{I}_n = -5,36 - j43,55, \text{ А}.$$

2. *Расчёт схемы при отсутствии нейтрального провода.*

Напряжение смещения нейтрали

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \frac{\sum \dot{U}_K Y_K}{\sum Y_K} = \frac{220 \cdot 0,1e^{-j37^\circ} (1 + e^{-j60^\circ} + e^{-j120^\circ})}{3 \cdot 0,1e^{-j37^\circ}} = \\ &= \frac{220}{3} (1 + 0,5 - j0,866 - 0,5 - j0,866) = 73,33 - j126,8, \text{ В}. \end{aligned}$$

Фактические фазные напряжения на зажимах генератора

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_0 = 220 - 73,33 + j126,8 = 146,67 + j126,8, \text{ В};$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_0 = 110 - j190 - 73,33 + j126,8 = 36,67 + j63,2, \text{ В};$$

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_0 = -110 - j190 - 73,33 + j126,8 = -183,33 - j63,2, \text{ В}.$$

Линейные токи

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}'_A}{Z_{\phi}} = \frac{146,67 + j126,8}{10e^{j37^\circ}} = (14,67 + j12,68)(0,8 - j0,6) = 19,34 + j1,33, \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}'_B}{Z_\phi} = \frac{36,67 - j63,2}{10e^{j37^\circ}} = (3,67 - j6,32)(0,8 - j0,6) = -0,85 - j7,25, \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}'_C}{Z_\phi} = \frac{-183,3 - j63,2}{10e^{j37^\circ}} = (-18,33 - j6,32)(0,8 - j0,6) = -18,46 + j5,95, \text{ A}.$$

Проверка:

$$\sum \dot{I}_\lambda = 19,34 + j1,33 - 0,85 - j7,25 - 18,46 + j5,95 = 0.$$

Пример 13. В цепь трёхфазного тока с нейтральным проводом включена осветительная нагрузка по схеме, представленной на рис. 75.

Определить фазные токи, а также ток на различных участках ($C'B'$, $B'A'$, $A'0$) нейтрального провода, если число ламп в группах составляет $n_A = 10$, $n_B = 50$ и $n_C = 25$ ламп.

Сопротивление каждой лампы можно принять равным приблизительно $r_\lambda \approx 500$ Ом, а линейное напряжение $U_\lambda = 220$ В.

Решение. Фазные напряжения

$$U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} = \frac{120}{1,73} = 127 \text{ В} = \dot{U}_A, \quad \dot{U}_B = 127e^{-j120^\circ}, \text{ В}; \quad \dot{U}_C = 127e^{j120^\circ}, \text{ В}.$$

Сопротивления каждой группы ламп

$$r_A = \frac{r_\lambda}{n_A} = \frac{500}{10} = 50 \text{ Ом};$$

$$r_B = \frac{r_\lambda}{n_B} = \frac{500}{50} = 10 \text{ Ом};$$

$$r_C = \frac{r_\lambda}{n_C} = \frac{500}{25} = 20 \text{ Ом}.$$

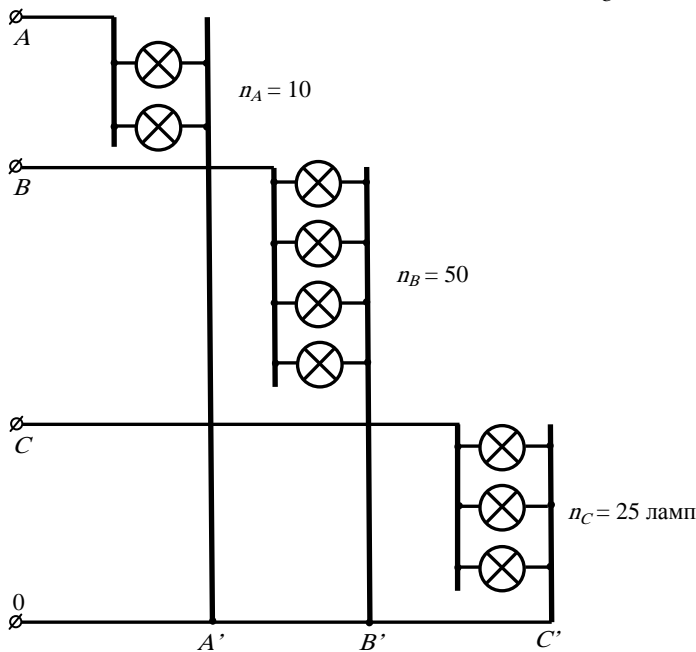


Рис. 75

Токи фазные и линейные

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{r_A} = \frac{127}{50} = 2,54 \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{r_B} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{10} = 12,7e^{-j120^\circ} = -6,35 - j11, \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{r_C} = \frac{127e^{j120^\circ}}{20} = 6,35e^{j120^\circ} = -3,18 + j5,5, \text{ А}.$$

Токи в нейтральном проводе согласно первому закону Кирхгофа:

– на участке CB'

$$I_{0CB'} = -\dot{I}_C = -6,35e^{j120^\circ} = 6,35e^{-j60^\circ} = 3,18 - j5,5, \text{ А};$$

– на участке BA'

$$\begin{aligned} I_{0BA'} &= -(\dot{I}_C + \dot{I}_B) = -\left(6,35e^{j120^\circ} + 12,7e^{-j120^\circ}\right) = 6,35e^{-j60^\circ} + 12,7e^{j60^\circ} = \\ &= 6,35 \cos 60^\circ - j6,35 \sin 60^\circ + 12,7 \cos 60^\circ + 12,7 \sin 60^\circ = \\ &= 3,175 - j5,5 + 6,35 + j11 = 9,53 + j5,5, \text{ А}; \end{aligned}$$

– на участке AO'

$$\begin{aligned} I_{0AO'} &= -(\dot{I}_C + \dot{I}_B + \dot{I}_A) = 6,35e^{-j60^\circ} + 12,7e^{j60^\circ} + 2,54e^{-j180^\circ} = \\ &= 9,53 + j5,5 - 2,54 = 6,99 + j5,5, \text{ А}. \end{aligned}$$

Проверка:

$$\sum \dot{I}_n = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 2,54 - 6,35 - j11 - 3,18 + j5,5 + 6,99 + j5,5 = 0.$$

Пример 14. В цепь трёхфазного тока с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 190$ В включена неравномерная нагрузка, соединённая в звезду: $Z_A = 6 + j8$, Ом; $Z_B = 6 - j8$, Ом; $Z_C = 8 + j8$, Ом. Определить токи, фазные напряжения и напряжение смещения, а также потребляемую мощность.

Решение. Задача решается методом определения напряжения смещения нейтрали звезды

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}.$$

Фазные напряжения

$$U_\Phi = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{190}{1,73} = 110 \text{ В} = \dot{U}_A;$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A e^{-j120^\circ} = 110e^{-j120^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_A e^{j120^\circ} = 110e^{j120^\circ}, \text{ В}.$$

Фазные проводимости

$$Y_A = \frac{1}{Z_A} = \frac{1}{10e^{j53^\circ}} = 0,1e^{-j53^\circ}, \text{ Ом}^{-1};$$

$$Y_B = \frac{1}{Z_B} = \frac{1}{10e^{-j53^\circ}} = 0,1e^{j53^\circ}, \text{ Ом}^{-1};$$

$$Y_C = \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{8\sqrt{2}e^{j45^\circ}} = \frac{1}{11,3e^{j45^\circ}} \approx 0,09e^{-j45^\circ}, \text{ Ом}^{-1}.$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_0 &= \frac{110 \cdot 0,1 e^{-j53^\circ} + 110 e^{-j120^\circ} \cdot 0,1 e^{j53^\circ} + 110 e^{j120^\circ} \cdot 0,09 e^{-j45^\circ}}{0,1 e^{-j53^\circ} + 0,1 e^{j53^\circ} + 0,09 e^{-j45^\circ}} = \\ &= \frac{13,43 - j9,54}{0,182 - j0,062} = 85,15 e^{-j63^\circ} = 81,6 - j24,3, \text{ В.}\end{aligned}$$

Фазные напряжения на зажимах нагрузки

$$U'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_0 = 110 - 81,6 + j24,3 = 28,4 + j24,3, \text{ В;}$$

$$U'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_0 = -55 - j95 - 81,6 + j24,3 = -136,6 - j70,7, \text{ В;}$$

$$U'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_0 = -55 + j95 - 81,6 + j24,3 = -136,6 + j119,3, \text{ В.}$$

Токи в фазах нагрузки и линии

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{U}'_A Y_A = (28,4 + j24,3)(0,06 - j0,08) = 3,64 - j0,81; \\ I_A &= 3,76 \text{ А;}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_B &= \dot{U}'_B Y_B = (-136,6 - j70,7)(0,06 + j0,08) = -2,53 - j15,15; \\ I_B &= 15,35 \text{ А;}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_C &= \dot{U}'_C Y_C = (-136,6 + j119,3)(0,062 + j0,062) = -1,09 + j15,97; \\ I_C &\approx 16 \text{ А.}\end{aligned}$$

Проверка:

$$\sum \dot{I}_n = 3,64 - j0,81 - 2,53 - j15,15 - 1,09 + j15,97 \approx 0$$

Потребляемая мощность

$$\begin{aligned}P &= I_A^2 r_A + I_B^2 r_B + I_C^2 r_C = 3,76^2 \cdot 6 + 15,35^2 \cdot 6 + 16^2 \cdot 8 = \\ &= 84,6 + 1416 + 2048 = 3548,6, \text{ Вт} \approx 3,55, \text{ кВт.}\end{aligned}$$

Пример 15. Определить симметричные составляющие для заданной системы фазных напряжений: $\dot{U}_A = 6600 e^{j120^\circ}$, В; $\dot{U}_B = 6000$ В; $\dot{U}_C = 5400 e^{j240^\circ}$, В.

Решение. Системы заданных фазных напряжений

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= 6600 e^{j120^\circ} = 6600(-0,5 + j0,87) = -3300 + j5715,6, \text{ В;} \\ \dot{U}_B &= 6000 \text{ В;}\end{aligned}$$

$$\dot{U}_C = 5400 e^{j240^\circ} = 5400(-0,5 - j0,87) = -2700 - j4676,4, \text{ В.}$$

Напряжение нулевой последовательности

$$\begin{aligned}\dot{U}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \\ &= \frac{1}{3}(-3300 + j5715,6 + 6000 - 2700 - j4676,4) = j346,4, \text{ В.}\end{aligned}$$

Напряжение обратной последовательности

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C) = \frac{1}{3}[-3300 + j5715,6 + (-0,5 - j0,87)6000 + \\ &+ (-0,5 + j0,87)(-2700 - j4676,4)] = -300 + j173,2, \text{ В.}\end{aligned}$$

Напряжение прямой последовательности

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) = \frac{1}{3}[-3300 + j5715,6 + (-0,5 + j0,87)6000 + \\ + (-0,5 - j0,87)(-2700 - j4676,4)] = -3000 + j5195,2, \text{ В.}\end{aligned}$$

Проверка:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = j356,4 - 3000 + j5195,6 - 300 + j173,2 = \\ = -3300 + j5715,2, \text{ В.}\end{aligned}$$

Пример 16. Рассчитать токи короткого замыкания представленной на рис. 76 трёхфазной цепи.

Решение. Симметричная система фазных ЭДС: $\dot{E}_0 = 0$; $\dot{E}_1 = \dot{E}$; $\dot{E}_2 = 0$ имеет нейтральную точку, соединённую с землёй через Z_{00} и эквивалентные сопротивления $Z_0 \neq Z_1 \neq Z_2$. Ввиду того, что реакция ротора на цепь статора питающего генератора, для прямой и обратной последовательности различна, потоки, созданные токами нулевой

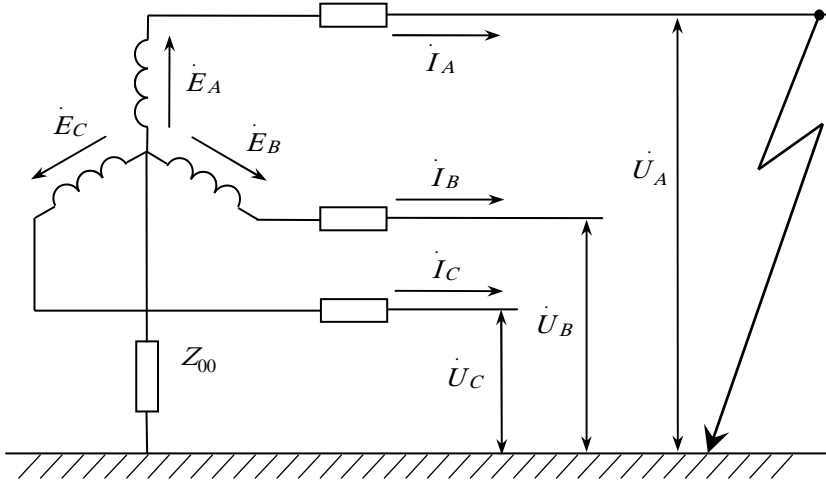


Рис. 76

последовательности, одновременно во всех трёх фазах направлены к ротору или от него и вынуждены замыкаться от ротора к статору по воздуху в торцевых частях машины, т.е. Z_0 существенно отличается от Z_1 и Z_2 (см. рис. 76).

Так как у места короткого замыкания (КЗ) \dot{U}_A ; \dot{U}_B ; \dot{U}_C ; \dot{I}_A ; \dot{I}_B ; \dot{I}_C несимметричны, то, разложив их на симметричные составляющие \dot{U}_0 ; \dot{U}_1 ; \dot{U}_2 и \dot{I}_0 ; \dot{I}_1 ; \dot{I}_2 , можно записать:

$$0 = \dot{I}_0 Z_0 + \dot{U}_0; \quad \dot{E} = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{U}_1; \quad 0 = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{U}_2. \quad (58)$$

Пренебрегая токами нормальной нагрузки по сравнению с токами короткого замыкания, имеем $\dot{U}_A = 0$; $\dot{I}_B = 0$; $\dot{I}_C = 0$, а так как $\dot{U}_A = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = 0$, то, суммируя (58), получим

$$\dot{E} = \dot{I}_0 Z_0 + \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_2.$$

Приняв во внимание, что при $\dot{I}_B = \dot{I}_C = 0$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{1}{3} \dot{I}_A, \quad (59)$$

найдем

$$\dot{E} = \frac{1}{3} \dot{I}_A (Z_0 + Z_1 + Z_2); \quad (60)$$

$$\dot{I}_A = \frac{3\dot{E}}{Z_0 + Z_1 + Z_2}; \quad (61)$$

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{I}_A Z_0}{3} = -\frac{\dot{E} Z_0}{Z_0 + Z_1 + Z_2}; \quad (62)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E} - \frac{\dot{I}_A Z_1}{3} = \frac{\dot{E}(Z_0 + Z_2)}{Z_0 + Z_1 + Z_2}; \quad (63)$$

$$\dot{U}_2 = -\frac{\dot{I}_A Z_2}{3} = -\frac{\dot{E} Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2}, \quad (64)$$

после чего легко определяются \dot{U}_B и \dot{U}_C . Векторные диаграммы в месте однофазного короткого замыкания фазы А показаны на рис. 77.

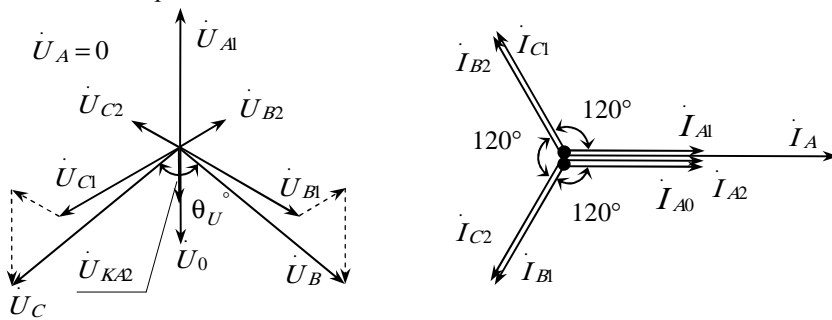


Рис. 77

Примечание. Сопротивления Z_0, Z_1, Z_2 рассчитываются по конструктивным параметрам электрической машины, которые для большинства оборудования являются справочными величинами.

Пример 17. Доказать, что для трёхфазной симметричной системы напряжений составляющие обратной и нулевой последовательностей равны нулю, а составляющая прямой последовательности равна фазному напряжению.

Решение. Для симметричной схемы напряжений (или токов) справедливы соотношения

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{U}_A; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_A e^{j120^\circ} = a \dot{U}_A.$$

Составляющая нулевой последовательности

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AO} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_A + a \dot{U}_A) = \\ &= \frac{1}{3}(1 + a^2 + a) \dot{U}_A = 0. \end{aligned}$$

Составляющая обратной последовательности

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C) = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^4 \dot{U}_A + a^2 \dot{U}_A) = \\ &= \frac{1}{3}(1 + a^2 + a) \dot{U}_A = 0. \end{aligned}$$

Составляющая прямой последовательности

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a \dot{U}_B + a^2 \dot{U}_C) = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^4 \dot{U}_A + a^3 \dot{U}_A) = \\ &= \frac{1}{3}(1 + a^2 + a^3) \dot{U}_A = \dot{U}_A. \end{aligned}$$

Пример 18. Решить задачу 17 методом симметричных составляющих, учтя при этом наличие нейтрального провода.

Решение. Из условий задачи несимметричная трёхфазная система напряжений была представлена соотношениями

$$\dot{U}_A = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = 220e^{-j60^\circ} = 110 - j190, \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190, \text{ В}.$$

Симметричные составляющие напряжений:

1) нулевая последовательность

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) &= \frac{1}{3}(220 + 110 - j190 - 110 - j190) = \\ &= 73,33 - j126,66, \text{ В}; \end{aligned}$$

2) прямая последовательность

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) &= \frac{1}{3}[220 + (-0,5 + j0,87)(0,5 - j0,87)220 + \\ &+ (-0,5 - j0,87)(-0,5 - j0,87)220] = 73,33 + j126,66, \text{ В}; \end{aligned}$$

3) обратная последовательность

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) &= \frac{1}{3}[220 + (-0,5 - j0,87)(0,5 - j0,87)220 + \\ &+ (-0,5 + j0,87)(-0,5 - j0,87)220] = 73,33 \text{ В}. \end{aligned}$$

Проверка:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} = 73,33 - j126,66 + 73,33 + j126,66 + 73,33 = 220 \text{ В}.$$

Симметричные составляющие линейных токов:

1) нулевая последовательность

$$\dot{I}_{A0} = \frac{\dot{U}_{A0}}{Z_\Phi} = \frac{73,33 - j126,66}{10e^{j37^\circ}} = (7,33 - j12,66)(0,8 - j0,6) = -1,74 - j14,52, \text{ А};$$

2) прямая последовательность

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{U}_{A1}}{Z_\Phi} = \frac{73,33 + j126,66}{10e^{j37^\circ}} = (7,33 + j12,66)(0,8 - j0,6) = 13,46 + j5,72, \text{ А}.$$

3) обратная последовательность

$$\dot{I}_{A2} = \frac{\dot{U}_{A2}}{Z_\Phi} = \frac{73,33}{10e^{j37^\circ}} = 7,33(0,8 - j0,6) = 5,86 - j4,4, \text{ А}.$$

Линейные токи

$$\begin{aligned} \dot{I}_A = \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} &= -1,74 - j14,52 + 13,46 + j5,72 + 5,86 - j4,4 = \\ &= 17,58 - j13,2, \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_A = \dot{I}_{A0} + a^2\dot{I}_{A1} + a\dot{I}_{A2} &= -1,74 - j14,52 + (-0,5 - j0,87)(13,46 + j5,72) + \\ &+ (-0,5 + j0,87)(5,86 - j4,4) = -2,21 - j21,5, \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_C = \dot{I}_{A0} + a\dot{I}_{A1} + a^2\dot{I}_{A2} &= -1,74 - j14,52 + (-0,5 + j0,87)(13,46 + j5,72) + \\ &+ (-0,5 - j0,87)(5,86 - j4,4) = -20,15 - j8,59, \text{ А}. \end{aligned}$$

Пример 19. Определить токи в месте двухфазного короткого замыкания фаз B и C (рис. 78, а). Построить векторную диаграмму токов в месте повреждения (рис. 78, б).

Решение. Двухфазное короткое замыкание между фазами B и C характеризуется следующими условиями:

$$\dot{I}_{kA}^{(2)} = 0; \quad \dot{I}_{kB}^{(2)} = -\dot{I}_{kC}^{(2)}; \quad \dot{U}_{kB}^{(2)} - \dot{U}_{kC}^{(2)} = 0. \quad (65)$$

Так как сумма фазных токов равна нулю, то система является уравновешенной и, следовательно, $\dot{I}_{kO}^{(2)} = 0$.

Произведём разложение тока фазы A на симметричные составляющие:

$$\dot{I}_{kA}^{(2)} = \dot{I}_{kA}^{(2)} + \dot{I}_{kA2}^{(2)} = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{kA}^{(2)} = -\dot{I}_{kA2}^{(2)}. \quad (66)$$

Исходя из условия $\dot{U}_{kB}^{(2)} = \dot{U}_{kC}^{(2)}$ и рассматривая его совместно с системой (11), можно убедиться в том, что

$$\dot{U}_{kA}^{(2)} = \dot{U}_{kA2}^{(2)}. \quad (67)$$

Исходя из (67), запишем равенство

$$\dot{E}_A - \dot{I}_{kA}^{(2)} jX_{1\Sigma} = -\dot{I}_{kA2}^{(2)} jX_{2\Sigma}.$$

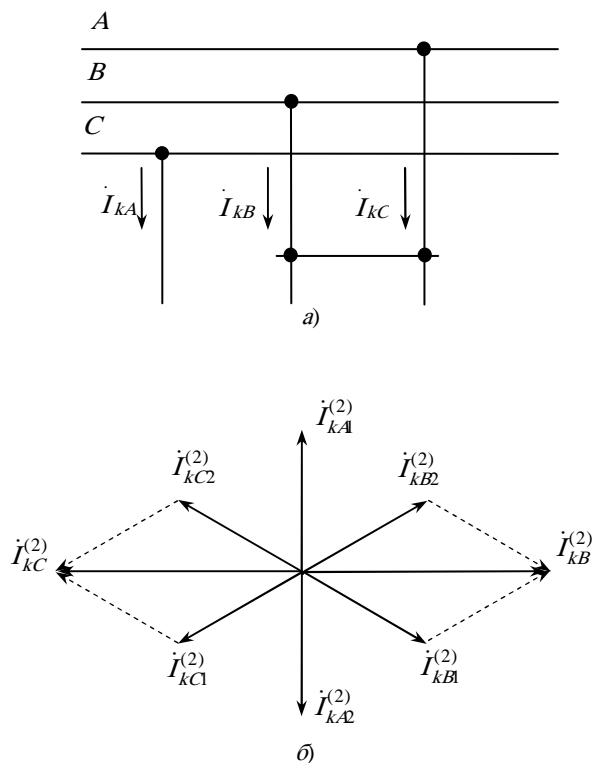


Рис. 78

Согласно (34), получим расчётное выражение для определения тока при двухфазном коротком замыкании

$$\dot{I}_{kA}^{(2)} = \frac{\dot{E}_A}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}. \quad (68)$$

Комплексная форма выражения (36) означает, что ток отстаёт от фазной ЭДС на угол 90° (деление на j) и по абсолютному значению равен

$$I_{kA}^{(2)} = \frac{E_A}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}. \quad (69)$$

Токи в повреждённых фазах B и C находим по (11) и (39):

$$\dot{I}_{kB}^{(2)} = a^2 \dot{I}_{kA}^{(2)} + a \dot{I}_{kA}^{(2)} = (a^2 - a) \dot{I}_{kA}^{(2)} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{kA}^{(2)}; \quad (70)$$

$$\dot{I}_{kC}^{(2)} = (a - a^2) \dot{I}_{kA}^{(2)} = j\sqrt{3} \dot{I}_{kA}^{(2)}. \quad (71)$$

Абсолютное значение полного тока при двухфазном коротком замыкании определится из равенств (69) – (71):

$$I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma}}. \quad (72)$$

На основании (72) для момента возникновения короткого замыкания

$$I_k^{(2)''} = \frac{\sqrt{3}E''}{\sqrt{3}(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})} = \frac{E''}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma}}, \quad (73)$$

где E'' – сверхпереходная междуфазная ЭДС.

В случае питания короткого замыкания от энергосистемы

$$I_k^{(2)''} = \frac{\sqrt{3}U_{cp}}{\sqrt{3}(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})} = \frac{U_{cp}}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma}}. \quad (74)$$

Построение симметричных составляющих и полных токов для двухфазного короткого замыкания $B - C$ показано на рис. 78, б.

Пример 20. Определить токи в месте однофазного короткого замыкания фазы A (рис. 79). Построить векторную диаграмму однофазного короткого замыкания (рис. 79, а) и векторную диаграмму токов в месте повреждения (рис. 79, б).

Решение. Однофазное короткое замыкание на землю одной из фаз, например фазы A (рис. 79), определяется условиями

$$\dot{I}_{kA}^{(1)} = 0; \quad \dot{I}_{kB}^{(1)} = 0; \quad \dot{I}_{kC}^{(1)} = 0.$$

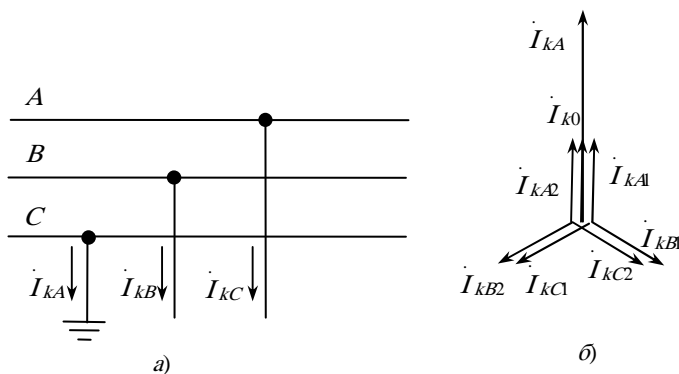


Рис. 79

Так как токи в двух фазах отсутствуют, то, очевидно, что симметричные составляющие повреждённой фазы A в соответствии с (12) равны

$$\dot{I}_{kA1}^{(1)} = \dot{I}_{kA2}^{(1)} = \dot{I}_{kA0}^{(1)} = \frac{1}{3} \dot{I}_{kA}^{(1)}.$$

Выражая напряжение $\dot{U}_{kA}^{(1)}$ через симметричные составляющие, получим

$$\dot{U}_{kA}^{(1)} = \dot{U}_{kA1}^{(1)} + \dot{U}_{kA2}^{(1)} + \dot{U}_{kA0}^{(1)} = 0$$

и далее

$$\dot{E}_A - \dot{I}_{kA1}^{(1)} j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{kA}^{(1)} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}. \quad (75)$$

Абсолютное значение полного тока короткого замыкания равно

$$I_k^{(1)} = 3I_{k1}^{(1)} = \frac{3E}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}. \quad (76)$$

Для начального момента времени

$$I^{(1)''} = \frac{3E''}{\sqrt{3}(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} = \frac{\sqrt{3}E''}{(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}. \quad (77)$$

где E'' – сверхпереходная междуфазная ЭДС.
При питании от энергосистемы

$$I^{(1)} = \frac{3U_{cp}}{\sqrt{3}(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} = \frac{\sqrt{3}U_{cp}}{(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}. \quad (78)$$

Пример 21. Исследовать двухфазное короткое замыкание в цепи трёхфазного тока методом симметричных составляющих (рис. 80). Составить комплексную схему замещения (рис. 81). Построить векторную диаграмму токов.

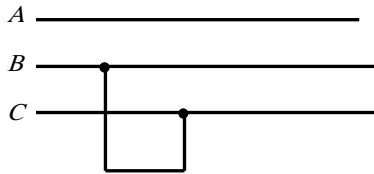


Рис. 80

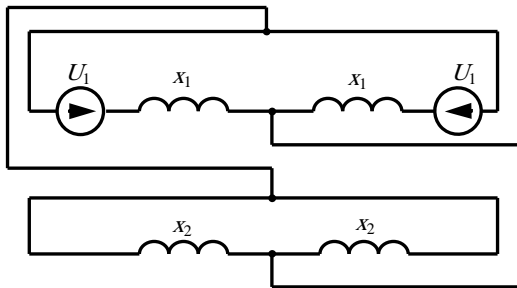


Рис. 81

Решение. Принято, что двухфазное короткое замыкание имеет место между фазами B и C . Фаза A остаётся неповреждённой. Тогда граничные условия в точке короткого замыкания для симметричных составляющих нулевой, обратной и прямой последовательностей опишутся следующими соотношениями:

$$\dot{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3}(0 + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3}(\dot{I}_B - \dot{I}_B) = 0;$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A2} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(0 + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(a^2\dot{I}_B - a\dot{I}_B) = \\ &= \frac{1}{3}(a^2 - a)\dot{I}_B = \frac{1}{3}(-j\sqrt{3})\dot{I}_B = -j\frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I}_B a; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(a\dot{I}_B - a^2\dot{I}_B) = \\ &= \frac{1}{3}(a - a^2)\dot{I}_B = \frac{1}{3}(j\sqrt{3})\dot{I}_B = j\frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I}_B a. \end{aligned}$$

Так как $\dot{I}_{A0} = 0$, то $\dot{U}_{A0} = 0$ и составляющие нулевой последовательности из рассмотрения исключаются.

Комплексная схема замещения и векторная диаграмма токов представлена на рис. 82.

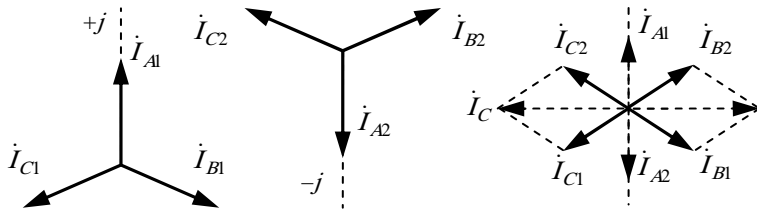


Рис. 82

Пример 22. Для заданных сопротивлений последовательностей рассчитать токи различных коротких замыканий

$$U_{\phi} = E = 110 \text{ кВ};$$

$$\dot{Z}_0 = 10,89 e^{j26^\circ} = 9,801 + j4,774, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_1 = 5,808 e^{-j53^\circ} = 3,485 - j4,638, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_2 = 6,453 e^{j27^\circ} = 5,75 + j2,93, \text{ Ом}.$$

Решение.

1. Однофазное короткое замыкание в фазе *B*. Векторная диаграмма напряжений (рис. 83) и токов (рис. 84) дана при коротком замыкании фазы *B*.

Так как у места короткого замыкания $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – несимметричны, то разложив их на симметричные составляющие $\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2$ и $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$, можно записать:

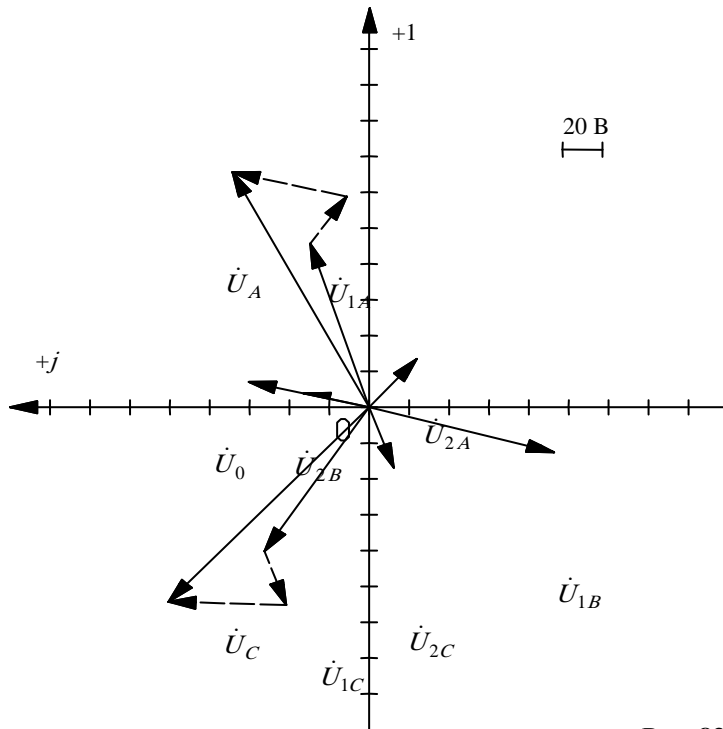


Рис. 83

$$0 = \dot{I}_0 \dot{Z}_0 + U_0;$$

$$E_1 = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 + U_1;$$

$$0 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 + U_2.$$

Имеем

$$U_B = 0; \quad I_A = I_C = 0;$$

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_B;$$

$$\dot{E}_B = \frac{1}{3} \dot{I}_B (\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2).$$

Значит,

$$\dot{I}_B = \frac{3E_B}{(\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)} = \frac{3 \cdot 110e^{-j120^\circ}}{9,801 + j4,774 + 3,485 - j4,638 + 5,75 + j2,93} =$$

$$= \frac{330e^{-j120^\circ}}{19,28e^{j9^\circ}} = -10,77 - j13,305, \text{ кА};$$

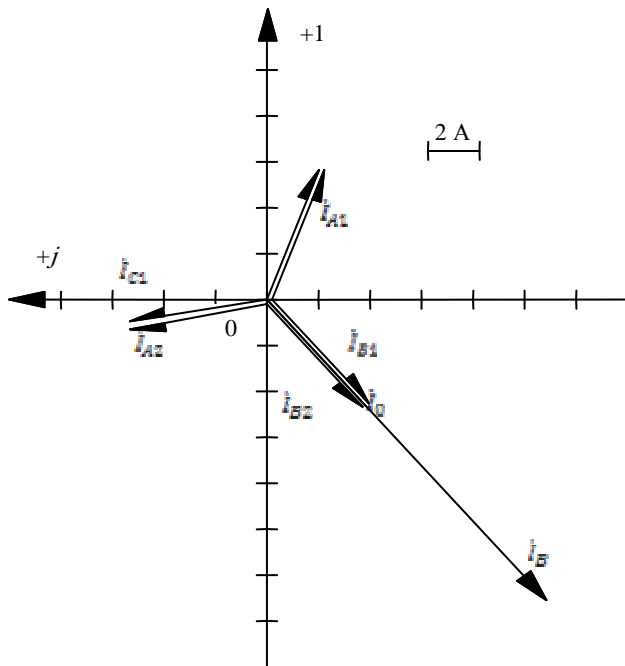


Рис. 84

$$\dot{I}_{0B} = \dot{I}_{1B} = \dot{I}_{2B} = \frac{1}{3} \dot{I}_B = 5,71e^{-j129^\circ}, \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{1B} = -\dot{I}_{B1} \dot{Z}_0 = -5,71e^{-j129^\circ} \cdot 10,89e^{j26^\circ} = -62,182e^{-j103^\circ} = 13,99 + j60,59, \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{1B} = \dot{E}_B - \dot{I}_{B1} \dot{Z}_1 = 110e^{j120^\circ} - 5,71e^{-j129^\circ} \cdot 5,808e^{-j53^\circ} = 110e^{j120^\circ} -$$

$$- 33,16e^{-j182^\circ} = -55 + 95,263 + 33,14 - j1,157 = 98,87e^{-j103^\circ}, \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{2B} = -5,71e^{-j129^\circ} \cdot 6,453e^{j27^\circ} = 7,66 + j36,04, \text{ кВ}.$$

Проверка:

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{0B} + \dot{U}_{1B} + \dot{U}_{2B} = 0.$$

$$14 + j60,6 + (-21,9 - j96,4) + (-7,66 - j36) \approx 0 - \text{верно}.$$

Фаза А:

$$\dot{U}_{0A} = \dot{U}_{0B} = 62,182e^{j77^\circ}, \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{1A} = a \dot{U}_{1B} = e^{j120^\circ} \cdot 98,87e^{-j103^\circ} = 94,55 + j28,91, \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{2A} = \frac{1}{a} \dot{U}_{2B} = e^{-j120^\circ} \cdot 36,85e^{j78^\circ} = 36,85e^{-j42^\circ} = 27,38 - j24,65, \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{0A} + \dot{U}_{1A} + \dot{U}_{2A} = 13,99 + j60,59 + 94,55 + j28,91 + 27,4 - j25 =$$

$$= 135,92 - j64,85 = 150,6e^{-j26^\circ}, \text{ кВ}.$$

Фаза С:

$$\dot{U}_{0C} = \dot{U}_{0B} = 62,182e^{j77^\circ}, \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{1C} = \frac{1}{a} \dot{U}_{1B} = e^{-j120^\circ} \cdot 98,87 e^{-j103^\circ} = 98,87 e^{-j223^\circ} = -72,3 + j67,43, \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{2C} = a \dot{U}_{2B} = e^{j120^\circ} \cdot 36,85 e^{j78^\circ} = 36,85 e^{j198^\circ} = -35,05 - j11,39, \text{ кВ};$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_C &= \dot{U}_{0C} + \dot{U}_{1C} + \dot{U}_{2C} = 13,99 + j60,59 - 42,3 + j64,43 - 35,05 - j11,39 = \\ &= -93,36 + j116,62 = 149,4 e^{j128^\circ}, \text{ кВ}. \end{aligned}$$

2. Двухфазное короткое замыкание между фазами *A* и *C*. Векторная диаграмма токов (рис. 85) и напряжений (рис. 86) дана при двухфазном коротком замыкании фаз *A* и *C*.

Построить векторные диаграммы. При коротком замыкании между фазами *A* и *C*: $\dot{I}_{kB}^{(2)} = 0$; $\dot{I}_{kA}^{(2)} = -\dot{I}_{kC}^{(2)}$;

$$\dot{U}_{kB}^{(2)} - U_{kC}^{(2)} = 0; \quad \dot{I}_{k0}^{(2)} = 0.$$

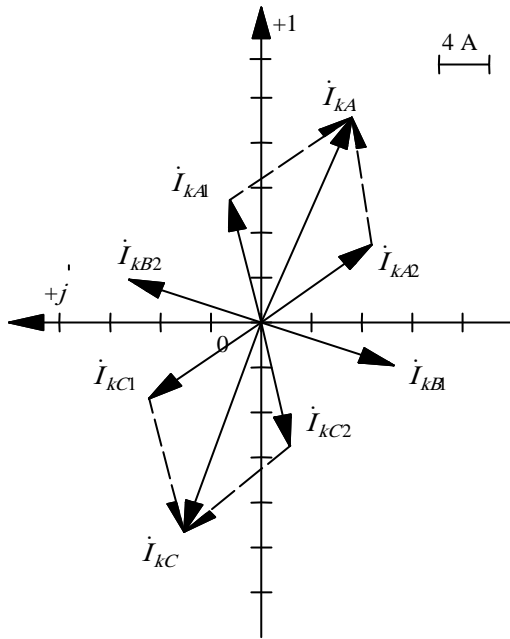


Рис. 85

Произведём разложение фазы *B* на симметричные составляющие:

$$\dot{I}_{kB}^{(2)} = \dot{I}_{kB1}^{(2)} + \dot{I}_{kB2}^{(2)} = 0 \Rightarrow \dot{I}_{kB1}^{(2)} = -\dot{I}_{kB2}^{(2)},$$

а значит,

$$\dot{U}_{kB}^{(2)} = U_{kB2}^{(2)};$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kB1}^{(2)} &= \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \frac{110 e^{-j120^\circ}}{3,485 - 4,638 + 5,75 + j2,93} = 11,71 e^{-j110^\circ} = \\ &= -4,005 - j11,004, \text{ кА}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{kB2}^{(2)} = -\dot{I}_{kB1}^{(2)} = e^{j180^\circ} \cdot 11,71 e^{-j110^\circ} = 11,71 e^{j70^\circ} = 4,005 + j11,004, \text{ кА}.$$

Токи в повреждённых фазах

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kC} &= -j\sqrt{3} \dot{I}_{kB1}^{(2)} = 1,73 e^{-j90^\circ} \cdot 11,71 e^{-j110^\circ} = 20,258 e^{-j200^\circ} = \\ &= -19,036 + j6,929, \text{ кА}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{kA} = j\sqrt{3} \dot{I}_{kB2}^{(2)} = 1,73 e^{j90^\circ} \cdot 11,71 e^{-j110^\circ} = 20,258 e^{-j20^\circ} = 19,036 - j6,929, \text{ кА};$$

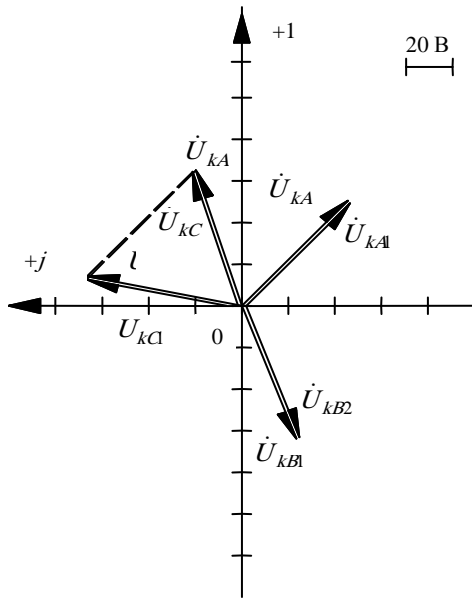


Рис. 86

$$\dot{I}_{kA} = a\dot{I}_{kB1} = e^{j120^\circ} 11,71e^{-j110^\circ} = 11,71e^{j10^\circ};$$

$$\dot{I}_{kA2} = \frac{1}{a}\dot{I}_{kB2} = e^{-j120^\circ} 11,71e^{j70^\circ} = 11,71e^{-j50^\circ};$$

$$\dot{I}_{kC1} = \frac{1}{a}\dot{I}_{kB1} = e^{-j120^\circ} 11,71e^{-j110^\circ} = 11,71e^{-j230^\circ};$$

$$\dot{I}_{kC2} = a\dot{I}_{kB2} = e^{j120^\circ} 11,71e^{j70^\circ} = 11,71e^{j150^\circ};$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{kB1} = \dot{U}_{kB2} = \dot{Z}_1 \dot{I}_{kB1} &= 5,808e^{-j53^\circ} \cdot 11,71e^{-j110^\circ} = 68,01e^{-j163^\circ} = \\ &= -65,04 + j19,88, \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Фаза А:

$$\dot{U}_{kA} = a\dot{U}_{kB1} = e^{j120^\circ} 68,01e^{-j163^\circ} = 68,01e^{-j43^\circ} = 49,74 - j31,63, \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{kA2} = \frac{1}{a}\dot{U}_{kB2} = e^{-j120^\circ} 68,01e^{-j163^\circ} = 68,01e^{-j283^\circ} = 15,3 + j66,27, \text{ кВ};$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{kA} = \dot{U}_{kA} + \dot{U}_{kA2} &= -49,74 - j31,63 + 15,3 + j66,27 = \\ &= 65,04 + j19,81 = 68,01e^{j17^\circ}, \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Фаза С:

$$\dot{U}_{kC1} = \frac{1}{a}\dot{U}_{kB1} = e^{-j120^\circ} 68,01e^{-j163^\circ} = 68,01e^{-j283^\circ} = 15,3 + j66,27, \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{kC2} = a\dot{U}_{kB2} = e^{j120^\circ} 68,01e^{-j163^\circ} = 68,01e^{-j43^\circ} = 49,74 - j31,63, \text{ кВ};$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{kC} = \dot{U}_{kC1} + \dot{U}_{kC2} &= 15,3 + j66,27 + 49,74 - j31,63 = \\ &= 65,04 + j19,89 = 68,01e^{j17^\circ}, \text{ кВ.} \end{aligned}$$

3. Двухфазное короткое замыкание между фазами А и С на землю. Векторная диаграмма токов (рис. 87) и напряжений (рис. 88) дана при двухфазном коротком замыкании фаз А и С.

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kB} &= \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_0}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0}} = \frac{110e^{-j120^\circ}}{3,485 - j4,638 + \frac{10,89e^{j26^\circ} \cdot 6,433e^{j27^\circ}}{5,75 + j2,93 + 9,801 + 4,774}} = \\ &= \frac{110e^{-j120^\circ}}{7,626e^{-j22^\circ}} = 14,424e^{-j142^\circ}, \text{ кА}; \end{aligned}$$

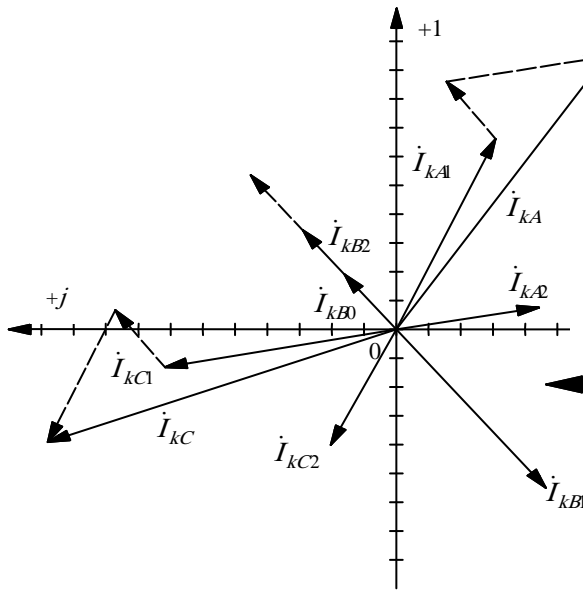


Рис. 88

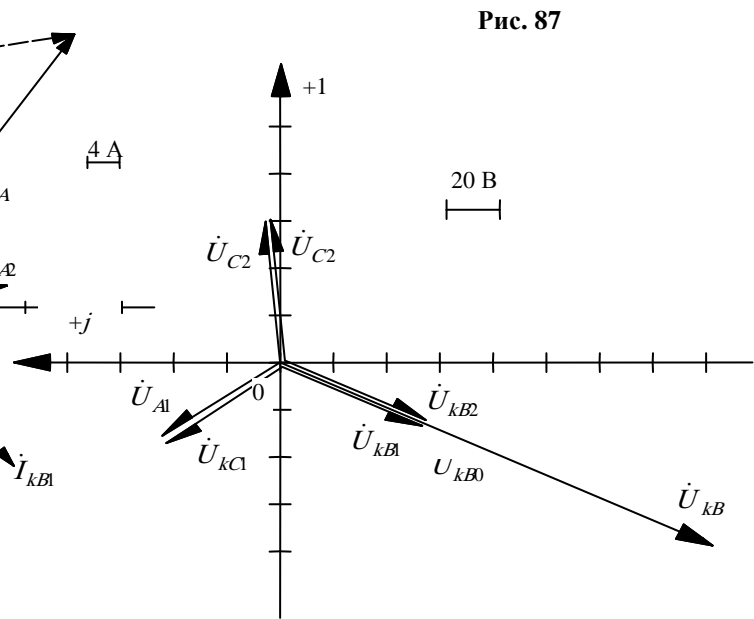


Рис. 87

$$\dot{I}_{kB2} = -\dot{I}_{kB} \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0} = -14,424e^{-j142^\circ} \cdot \frac{10,89e^{j26^\circ}}{17,353e^{j26^\circ}} = 9,044e^{j38^\circ}, \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{kB0} = -\dot{I}_{kB} \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0} = -14,424e^{-j142^\circ} \cdot \frac{6,453e^{j27^\circ}}{17,353e^{j26^\circ}} = 5,366e^{j39^\circ}, \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{kB2} = \dot{U}_{kB0} = \dot{U}_{kB1} = \dot{I}_{kB1} \frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_0}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0}; \quad \dot{U}_{kB} = 3\dot{U}_{kB1};$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{kB1} &= \frac{70,273e^{j53^\circ}}{17,355e^{j26^\circ}} \cdot 14,424e^{-j142^\circ} = 4,049e^{j27^\circ} \cdot 14,424e^{-j142^\circ} = \\ &= 58,403e^{-j115^\circ}, \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{kB} = 175,209e^{-j115^\circ}, \text{ кВ};$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{kC} &= \dot{U}_{kB0} + a^2 \dot{U}_{kB1} + a \dot{U}_{kB2} = \\ &= 58,403e^{-j115^\circ} + 58,403e^{j125^\circ} + 58,403e^{j5^\circ} = 0, \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{kA} &= \dot{U}_{kB0} + a \dot{U}_{kB1} + a^2 \dot{U}_{kB2} = \\ &= 58,403e^{-j115^\circ} + 58,403e^{j5^\circ} + 58,403e^{j125^\circ} = 0 \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{kA} = \dot{U}_{kC} = 0.$$

Пример 23. Известно, что обмотки трёхфазных генераторов и трансформаторов могут быть соединены "звездой" или "треугольником". При соединении "звездой" для получения системы симметричных линейных напряжений одноимённые выводы обмоток ("начала" или "концы") должны быть присоединены к одной точке; при соединении треугольником "начало" каждой обмотки должно быть соединено с "концом" другой. Кроме разметки одноимённых зажимов обмоток,

требуется определение порядка чередования фаз. Знание порядка чередования фаз необходимо, в частности, при включении на параллельную работу нескольких источников энергии и при подключении к трёхфазным источникам асинхронных и синхронных двигателей, у которых направление вращения зависит от порядка чередования фаз.

Обычно поступающие с завода-изготовителя генераторы и трансформаторы имеют маркировку выводов обмоток, но после ремонтных работ на этих агрегатах, как правило, требуется проверка правильности соединения обмоток и порядка чередования фаз.

Обмотки симметричного трёхфазного генератора подсоединены к выводам клеммной коробки (рис. 89).

Для разметки зажимов используется вольтметр. При соединении вольтметра к зажимам 1–2, 3–6, и 4–5 его показания равны 229 В, при соединении к другим выводам показания вольтметра равны нулю. Затем выводы 1, 3, 4 были соединены между собой, после чего вольтметр, подключённый к выводам 2–5, показал 380 В, к выводам 2–6 – 220 В – к выводам 5–6 – 220 В.

Определить "начала" и "концы" обмоток и нарисовать схему соединения выводов обмоток при соединении обмоток генератора "звездой" и "треугольником". Определить порядок чередования фаз.

Решение. Показания вольтметра отличны от нуля, когда он подсоединён к выводам одной и той же обмотки источника энергии, следовательно, фазные обмотки генератора подключены к зажимам 1–2, 3–6, 4–5 и фазное напряжение равно 220 В. Эти обмотки пронумеруем цифрами I, II, III (рис. 90). Анализ показаний вольтметра после соединения выводов 1, 3, 4 между собой показывает, что выводы 1 и 4 обмоток I и III – одноимённые, а вывод 3 обмотки II – разноимённый. Это ясно из рассмотрения двух вариантов топографических диаграмм фазных и линейных напряжений, соответствующих условию задачи (рис. 91). Следовательно, одноимёнными зажимами обмоток являются зажимы 1, 4, 6 и 2, 5, 3.

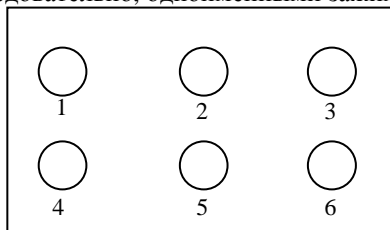


Рис. 89

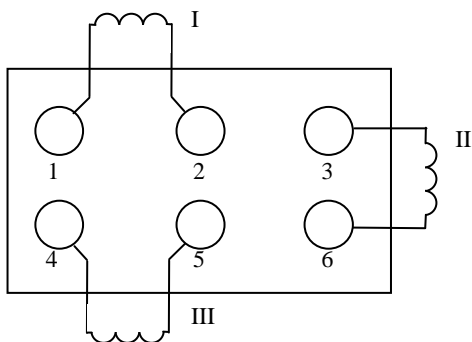


Рис. 90

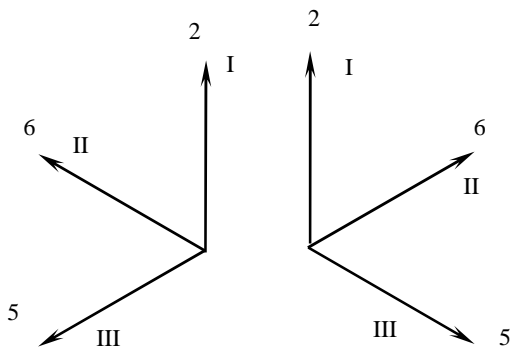


Рис. 91

При соединении обмоток "звездой" выводы клеммной коробки должны быть соединены, как показано на рис. 92, а при соединении "треугольником" – так, как показано на рис. 93.

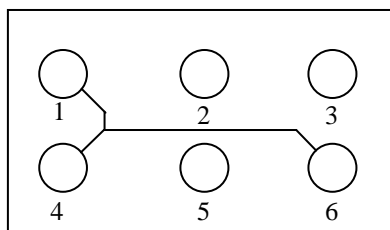


Рис. 92

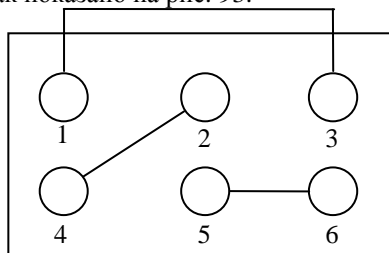


Рис. 93

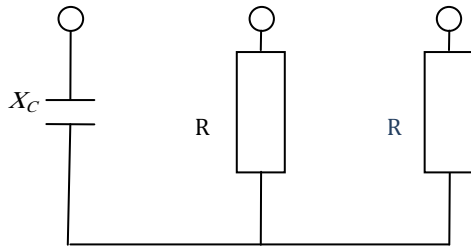


Рис. 94

Для определения последовательности фаз следует собрать схему фазоуказателя (рис. 94). Подключив эту схему к выводам генератора, соединённого, например, "звездой", вольтметром измеряют напряжения на резисторах фазоуказателя. При этом, если считать фазой A ту, к которой подсоединён конденсатор фазоуказателя, то фазой B будет та, к которой подсоединён резистор, напряжение на котором больше.

Покажем это, определив напряжения на резисторах фазоуказателя в рассматриваемом случае, при $X_C = R$.
Напряжение между нейтральными точками фазоуказателя и генератора

$$\dot{U}_{0,0} = \frac{\sum \dot{U}_\phi Y}{\sum Y} = \frac{220e^{j0^\circ} \frac{1}{-jX_C} + 220e^{-j120^\circ} \frac{1}{R} + 220e^{j120^\circ} \frac{1}{R}}{\frac{1}{-jX_C} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = 139e^{j108^\circ}.$$

Напряжение на резисторах фазоуказателя

$$\dot{U}_{B0_1} = \dot{U}_{B0} - \dot{U}_{0,0} = 220e^{-j120^\circ} - 139e^{j108^\circ} = 329e^{-j101,6^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C0_1} = \dot{U}_{C0} - \dot{U}_{0,0} = 220e^{j120^\circ} - 139e^{j108^\circ} = 87,8e^{j138,7^\circ}, \text{ В}.$$

Таким образом, напряжение на резисторе, подключённом к фазе B , составляет 329 В, а на резисторе, подключённом к фазе C – 87,8 В.

Пример 24. Важным показателем качества электроэнергии является симметрия линейных напряжений трёхфазных систем электроснабжения. Обычно несимметрия напряжений в конце ЛЭП вызывается подключением к сети мощных однофазных нагрузок, например, электрометаллургических агрегатов.

Несимметрия напряжений оказывает значительное влияние на работу некоторых видов потребителей электроэнергии. Так, питание асинхронных двигателей несимметричным напряжением вызывает повышенный нагрев их роторов и сокращение срока службы двигателей. Это вызвано тем, что магнитное поле, создаваемое статором двигателя, обмотки которого питаются несимметричными напряжениями, может быть представлено в виде двух вращающихся в противоположные стороны полей. При этом поле, которое вращается в сторону, противоположную вращению ротора, индуцирует в роторе вихревые токи значительной величины, которые и вызывают повышенный нагрев ротора.

Несимметрия напряжений оценивается величиной коэффициента несимметрии

$$K_{\text{НСМ}} = \frac{|\dot{U}_{AB} + a^2 \dot{U}_{BC} + a \dot{U}_{CA}|}{3\dot{U}_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \%,$$

где \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} – комплексы линейных напряжений; $\dot{U}_{\text{НОМ}}$ – номинальное значение линейного напряжения в симметричном режиме; $a = e^{j120^\circ} = 0,5 + 0,5\sqrt{3}j$ – фазный множитель.

Согласно ГОСТ 13109–67 "Нормы несимметрии не должен превышать 2 %.

Из-за неправильного соединения линейных напряжений имеет вид, коэффициента несимметрии линейных

Запишем комплексы линейных

$$\dot{U}_{BC} = 220e^{-j60^\circ}, \text{ В}; \quad \dot{U}_{CA} = 380e^{j150^\circ}, \text{ В};$$

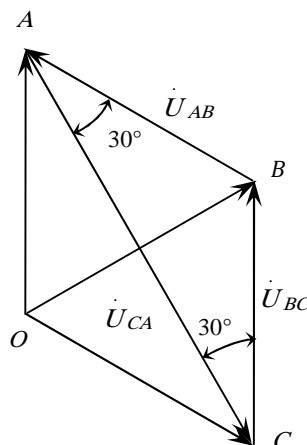


Рис. 95

качества электрической энергии", коэффициент

обмоток трёхфазного трансформатора диаграмма показанный на рис. 95. Определить величину напряжений при $U_{AB} = U_{BC} = 220 \text{ В}$; $U_{CA} = 380 \text{ В}$.

напряжений, приняв $\dot{U}_{AB} = 220e^{j0^\circ}$; тогда

$$K_{\text{НСМ}} = \frac{220e^{-j120^\circ} + 220e^{-j60^\circ} + 380e^{j150^\circ} e^{j120^\circ}}{3 \cdot 380} \cdot 100 \% = 33,3 \% .$$

Пример 25. Из-за неправильного подключения обмоток трёхфазного трансформатора с фазным напряжением $U_\phi = 220$ В, питающего асинхронный двигатель, система линейных напряжений на зажимах двигателя имеет вид, показанный на рис. 95. Определить фазные токи двигателя при соединении его обмоток звездой, если сопротивление токам прямой последовательности $Z_1 = j_3$ Ом, сопротивление токам обратной последовательности $Z_2 = j_1$ Ом. Каковы будут токи при правильном соединении обмоток трансформатора?

Решение

$$\dot{U}_{AO} = 220e^{j0^\circ}, \text{ В. При этом } \dot{U}_{BO} = 220e^{-j60^\circ}, \text{ В; } \dot{U}_{CO} = 220e^{-j120^\circ}, \text{ В.}$$

Фазные напряжения прямой последовательности

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{AO} + a\dot{U}_{BO} + a^2\dot{U}_{CO}) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot (220 + e^{j120^\circ} 220e^{-j60^\circ} + e^{j240^\circ} 220e^{-j120^\circ}) = 73,3 + j126,7, \text{ В.} \end{aligned}$$

Напряжения обратной последовательности

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{AO} + a^2\dot{U}_{BO} + a\dot{U}_{CO}) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot (220 + e^{j240^\circ} 220e^{-j60^\circ} + e^{j120^\circ} 220e^{-j120^\circ}) = 73,3 \text{ В.} \end{aligned}$$

Симметричные составляющие фазных токов

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_1}{Z_1} = \frac{73,3 + j126,7}{j3} = 42,2 - j24,4 = 48,7e^{-j30^\circ}, \text{ А;} \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_2}{Z_2} = \frac{73,3}{j1} = -j73,3, \text{ А.} \end{aligned}$$

Фазные токи

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 42,2 - j97,7 = 106,3e^{-j66,6^\circ}, \text{ А;}$$

$$\dot{I}_B = a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 = e^{j240^\circ} 48,7e^{-j30^\circ} + e^{j120^\circ} 73,3e^{-j90^\circ} = 24,6e^{j30^\circ}, \text{ А;}$$

$$\dot{I}_C = a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 = e^{j120^\circ} 48,7e^{-j30^\circ} + e^{j240^\circ} 73,3e^{-j90^\circ} = 106,3e^{j126,3^\circ}, \text{ А.}$$

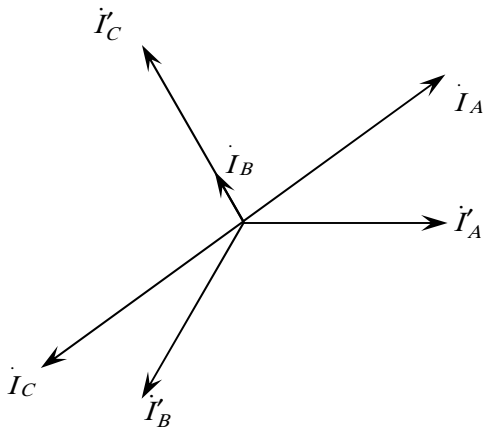


Рис. 96

При правильном соединении обмоток трансформатора фазные напряжения образуют симметричную звезду, а фазные токи равны

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AO}}{Z_1} = \frac{220}{j\beta} = 73,3e^{-j90^\circ}, \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = 73,3e^{-j210^\circ}, \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = 73,3e^{-j330^\circ} = 73,3e^{j30^\circ}, \text{ A}.$$

Векторная диаграмма токов при неправильном и правильном соединении обмоток приведена на рис. 96.

Пример 26. Определить ток трёхфазного короткого замыкания в точке K за реактором отходящей линии 6,3 кВ схемы рис. 97 (a – расчётная схема сети; b – схема замещения) для начального момента времени.

Решение. За основную ступень трансформации принимаем $U_6 = 6,3$ кВ.

По формулам

$$x_c = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3}I^{(3)}}; \quad \dot{I} = I \frac{U_{cp}}{U_{cp.6}};$$

$$x = x_{*(НОМ)} \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}I_{НОМ}} = x_{*(НОМ)} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$$

определяем сопротивления энергосистемы, трансформатора и двигателей.

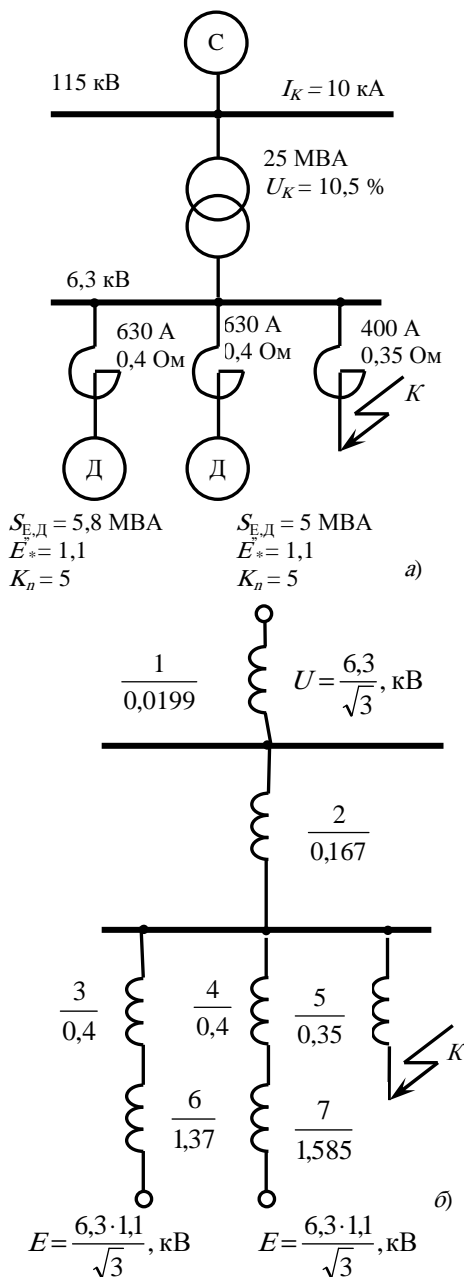


Рис. 97

Обозначив сопротивления схемы замещения порядковыми номерами, получим:

– для энергосистемы

$$x_7 = \frac{6,3^2}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 115} = 0,0199 \text{ Ом};$$

– для трансформатора 25 МВА

$$x_2 = \frac{0,105 \cdot 6,3^2}{25} = 0,167 \text{ Ом};$$

– для синхронных двигателей

$$x_6 = \frac{0,2 \cdot 6,3^2}{5,8} = 1,37 \text{ Ом};$$

$$x_7 = \frac{0,2 \cdot 6,3^2}{5} = 1,585 \text{ Ом}.$$

Сопротивление цепи короткого замыкания от энергосистемы до шин 6,3 кВ

$$x_{\Sigma c} = 0,0199 + 0,167 = 1,869 \text{ Ом}.$$

То же для синхронных двигателей:

$$x_{д\Sigma 1} = 1,37 + 0,4 = 1,77 \text{ Ом};$$

$$x_{д\Sigma 2} = 1,585 + 0,4 = 1,985 \text{ Ом};$$

$$x_{д\Sigma} = \frac{1,77}{1,985} = 0,936 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление цепи короткого замыкания

$$x_{\Sigma} = x_{\Sigma c} / x_{д\Sigma} - x_5 = \frac{0,1869}{0,936} + 0,35 = 0,1557 + 0,35 \approx 0,506 \text{ Ом}.$$

Эквивалентная ЭДС по (21)

$$E_{\text{эк}} = \frac{\frac{6300}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{0,1869} + \frac{1,1}{0,936} \right)}{\frac{1}{0,1869} + \frac{1}{0,936}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} \cdot 1,0167 \text{ Ом}.$$

Эквивалентная ЭДС система – генератор Г – 2 определяется по (21):

$$E_{\text{эк}} = \frac{\frac{115}{\sqrt{3}} \frac{1}{66,8} + \frac{124}{\sqrt{3}} \frac{1}{270}}{\frac{1}{66,8} + \frac{1}{270}} = 67,4 \text{ Ом}.$$

Ток за реактором отходящей линии 6,3 кВ по (52)

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{6300 \cdot 1,0167}{\sqrt{3} \cdot 0,506} = 7310 \text{ А}.$$

В случае уравнения ЭДС электродвигателей с ЭДС системы погрешность в расчёте в сторону уменьшения тока составляет 1,67 %.

Пример 27. Определить ток короткого замыкания в начальный момент времени для трёхфазного, двухфазного и однофазного короткого замыкания в точке K (рис. 98, а).

На шинах 115 кВ связи энергосистемой заданы токи трёхфазного короткого замыкания. $I^{(3)} = 1000$ А и однофазного короткого замыкания $I^{(1)} = 3I_0 = 8300$ А.

Решение

Решение начинаем с составления схем замещения.

Схема замещения прямой последовательности составляется аналогично схемам замещения для расчёта токов трёхфазного короткого замыкания и дополнительных пояснений не требует. Так как в данном случае для всех элементов принято, что $x_1 = x_2$, схема замещения обратной последовательности по сопротивлениям получается такой же, как и схема прямой последовательности, но только не содержит ЭДС. Обе схемы на рис. 98, б условно совмещены.

В каждом трансформаторе 16 МВА токи нулевой последовательности замыкаются в обмотке, соединённой в треугольник так, что в цепи генераторов токи нулевой последовательности не проходят и сопротивления генераторов в схему нулевой последовательности не вводятся.

Заданный ток $I^{(1)} = 3I_0$ со стороны энергосистемы свидетельствует о том, что в системе также имеются трансформаторы с заземлёнными нейтральными, которые (т.е. нейтрали) удалены от точки короткого замыкания на суммарное сопротивление системы $x_{0,1}^*$ и ВЛ $x_{0,2}$.

Таким образом, по числу заземлённых нейтралей – трансформаторов 16 МВА и энергосистемы – в схеме нулевой последовательности получим три ветви, объединённые в точке короткого замыкания (рис. 98, в).

За расчётную ступень напряжения принимаем $U_6 = 115$ кВ.

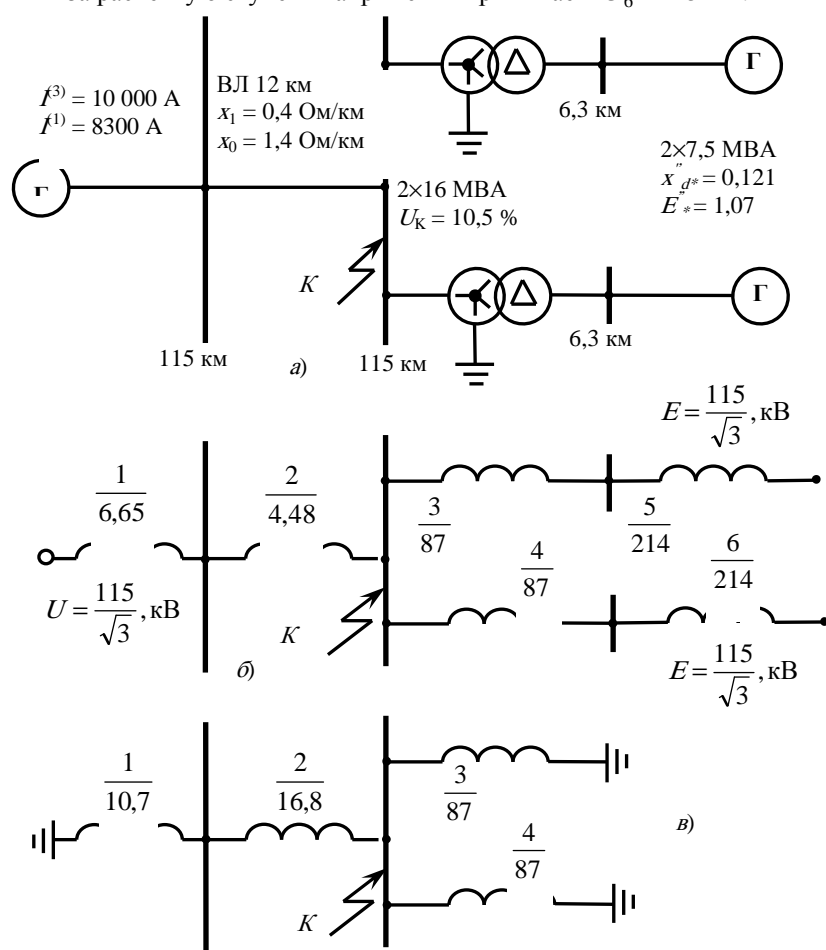


Рис. 98

Для упрощения из-за малой мощности генераторов ($E_{9к} = 1,005U$) принимаем их приведённые ЭДС равными напряжению энергосистемы.

На схемах замещения проставляем значения сопротивлений в соответствии со следующими подсчётами.

Схема замещения прямой (обратной) последовательности:

$$x_{1,1} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10\,000} = 6,65 \text{ Ом};$$

$$x_{1,2} = 0,4 \cdot 12 = 4,8 \text{ Ом};$$

$$x_{1;3} = x_{1;4} = 0,105 \frac{115^2}{16} = 87 \text{ Ом};$$

$$x_{1;5} = x_{1;6} = 0,121 \frac{115^2}{7,5} = 214 \text{ Ом}.$$

Схема замещения нулевой последовательности. Поясним, как определяется сопротивление нулевой последовательности системы:

$$\frac{I^{(1)}}{3} = \frac{\frac{U_{\text{cp}}}{\sqrt{3}}}{2x_{1;1} + x_{1;2}};$$

$$x_{0;1} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{cp}}}{I^{(1)}} - 2x_{1;1} = \frac{115 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^3}{8300} - 2 \cdot 6,65 = 10,7 \text{ Ом};$$

$$x_{0;2} = 1,4 \cdot 12 = 16,8 \text{ Ом};$$

$$x_{0;3} = x_{0;4} = 87 \text{ Ом}.$$

Трёхфазное короткое замыкание. Сопротивление цепи энергосистемы до точки короткого замыкания

$$x_{1;1} + x_{1;2} = 6,65 + 4,8 = 11,45 \text{ Ом}.$$

Сопротивление цепи генераторов до точки короткого замыкания

$$\frac{x_{1;3} + x_{1;5}}{2} = \frac{87 + 214}{2} = 150,5 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление схемы

$$x_{1\Sigma} = \frac{11,45}{150,5} = 10,64 \text{ Ом}.$$

Ток трёхфазного короткого замыкания в точке K составит

$$I^{(1)} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,64} = 6240 \text{ А}.$$

Двухфазное короткое замыкание. Ток двухфазного короткого замыкания в точке K

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 6240 = 5400 \text{ А}.$$

Однофазное короткое замыкание. Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности

$$x_{0;\Sigma} = \frac{10,7 + 16,8}{\frac{87}{2}} = 16,85 \text{ Ом}.$$

Расчётное сопротивление для определения тока I_0

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2x_{1;\Sigma} + x_{0;\Sigma} = 10,64 \cdot 2 + 16,85 = 38,13 \text{ Ом}.$$

Ток однофазного короткого замыкания в точке K составит

$$I^{(1)} = \frac{115 \cdot 3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 38,13} = 5220 \text{ A.}$$

Пример 28. На втулках 115 кВ трансформатора отпаечной подстанции в точке K (рис. 99, а) произошло однофазное короткое замыкание. Требуется определить ток короткого замыкания для начального момента времени. Схемы прямой (обратной) и нулевой последовательностей показаны на рис. 99 (штрихами помечены доли сопротивления поврежденной ВЛ и взаимоиנדукции между ВЛ).

Решение. Сопротивления схем замещения (рис. 99, б, в) таковы:

– прямой (обратной) последовательности:

$$x_{0,1} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 8900} = 7,45 \text{ Ом};$$

$$x_{1,2} = 0,4 \cdot 48 = 19,2 \text{ Ом};$$

$$x'_{1,3} = x''_{1,3} = 9,6 \text{ Ом};$$

– нулевой последовательности:

$$x_{0,1} = \frac{115\sqrt{3} \cdot 10^3}{6600} - 2 \cdot 7,45 = 15,3 \text{ Ом};$$

$$x_{0,2} = (1,4 - 0,8) \cdot 48 = 28,8 \text{ Ом};$$

$$x'_{0,3} = x''_{0,3} = 14,4 \text{ Ом};$$

$$x'_{0,2-3} = x''_{0,2-3} = 0,8 \cdot 48 \cdot 0,5 = 19,2 \text{ Ом};$$

$$x_{0,4} = x_{0,5} = 0,105 \frac{115^2}{40} = 34,8 \text{ Ом}.$$

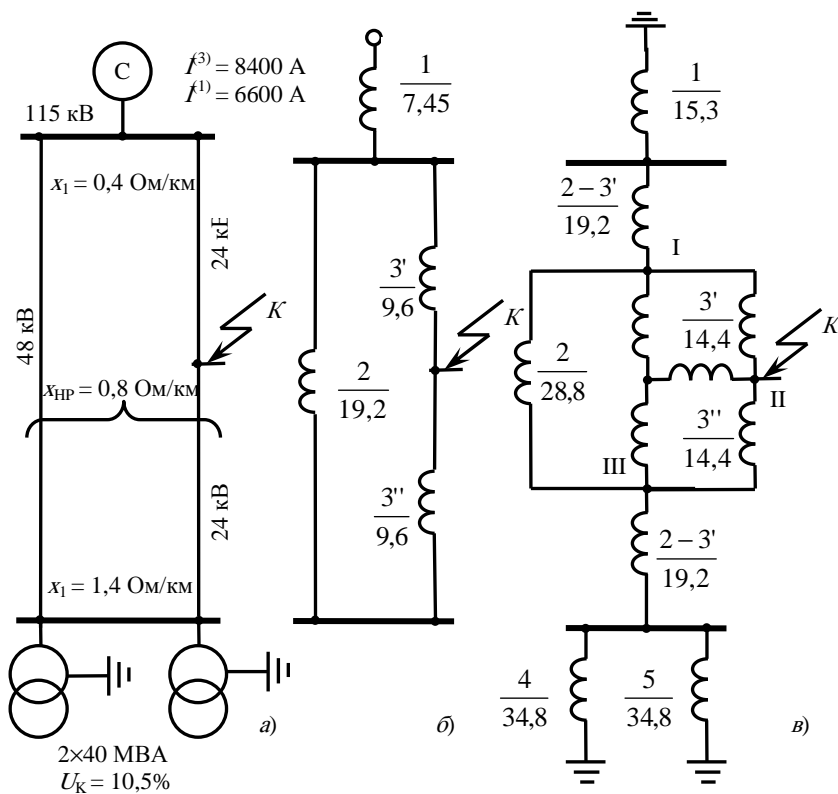


Рис. 99

В соответствии с

$$x_1 = \frac{1-n}{2} (x_0 - x_{M,0});$$

$$x_2 = \frac{n(1-n)}{2} (x_0 - x_{M,0});$$

$$x_3 = \frac{n}{2} (x_0 - x_{M,0})$$

получаем

$$x_{0,I} = 0,25 \cdot 28,8 = 7,2 \text{ Ом};$$

$$x_{0,II} = 0,25 \cdot 0,5 \cdot 28,8 = 3,6 \text{ Ом};$$

$$x_{0,III} = 0,25 \cdot 28,8 = 7,2 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление схемы прямой (обратной) последовательности

$$x_{1,\Sigma} = 7,45 + \frac{19,2 + 9,6}{9,6} = 14,65 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности

$$x_{0,\Sigma} = \frac{15,3+19,2+7,2}{17,4+19,2+7,2} + 3,6 \approx 25 \text{ Ом.}$$

Расчётное сопротивление для определения тока I_0

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2 \cdot 14,65 + 25 = 54,3 \text{ Ом.}$$

Ток в месте повреждения

$$I^{(1)} = 3I_0 = 3 \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 54,3} = 3670 \text{ А.}$$

Пример 29. По исходным данным, указанным в таблице, определить токи в ветвях для разных случаев работы трёхфазной цепи.

$U_{\text{сети}} = 220 \text{ В}$	Однофазный приёмник № 1	Однофазный приёмник № 2	Однофазный приёмник № 3
$U_{\text{ном}}, \text{ В}$	220	220	220
$P_{\text{ном}} \text{ (кВт)}$	6	4	9
$Q_{\text{ном}}, \text{ квар}$	–	–	–
$\cos\varphi_{\text{ном}}$	1	0,7	0,7
Род нагрузки	акт	инд	емк

Решение. Фазные и линейные напряжения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= 220 \text{ В;} \\ \dot{U}_b &= 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190,526 \text{ В;} \\ \dot{U}_c &= 220e^{j120^\circ} = -110 + j190,526 \text{ В;} \\ \dot{U}_{ab} &= 220e^{j30^\circ} = 190,526 + j110 \text{ В;} \\ \dot{U}_{bc} &= 220e^{-j90^\circ} = -j220 \text{ В;} \\ \dot{U}_{ca} &= 220e^{j150^\circ} = -190,526 + j110 \text{ В.} \end{aligned}$$

1. Схема соединения приёмников в треугольник с обрывом фазы C показана на рис. 100, векторная диаграмма – на рис. 101.

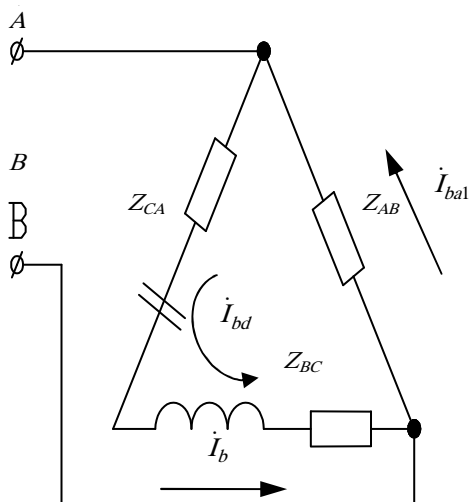


Рис. 100

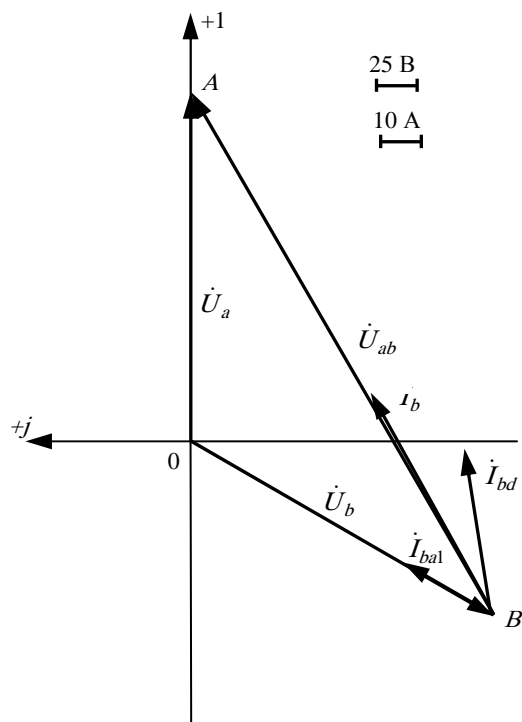


Рис. 101

Определим сопротивления элементов схемы замещения приёмников:

$$Z_{AB} = \frac{U_{1\text{НОМ}}^2 \cdot \cos \varphi_{1\text{НОМ}}}{P_{1\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 1}{6000} = 8,7 \text{ Ом};$$

$$\varphi_{AB} = \arccos(\cos \varphi_{1\text{НОМ}}) = 0^\circ;$$

$$Z_{BC} = \frac{U_{2\text{НОМ}}^2 \cdot \cos \varphi_{2\text{НОМ}}}{P_{2\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{4000} = 8,47 \text{ Ом};$$

$$\varphi_{BC} = \arccos(\cos \varphi_{2\text{НОМ}}) = 45,6^\circ;$$

$$Z_{CA} = \frac{U_{3\text{НОМ}}^2 \cdot \cos \varphi_{3\text{НОМ}}}{P_{3\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{9000} = 3,76 \text{ Ом};$$

$$\varphi_{CA} = \arccos(\cos \varphi_{3\text{НОМ}}) = -45,6^\circ.$$

В комплексной форме:

$$\dot{Z}_{AB} = 8,07 e^{j0^\circ}, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_{BC} = 8,47 e^{j45,6^\circ} = 5,93 + j6,05, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_{CA} = 3,76 e^{-j45,6^\circ} = 2,63 - j2,69, \text{ Ом}.$$

Определяем фазные токи приёмников:

$$I_{ba1} = \frac{U_{ab}}{Z_{AB}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{8,07e^{j0^\circ}} = 27,26e^{j30^\circ} = 13,63 + j23,61, \text{ A};$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{bd} &= \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}} = \frac{380e^{j30^\circ}}{5,93 + j6,05 + 2,63 - j2,69} = \frac{380e^{j30^\circ}}{9,196e^{j21^\circ}} = \\ &= 41,32e^{j9^\circ} = 40,8 + j6,46, \text{ A}. \end{aligned}$$

Определяем линейный ток приёмников:

$$\begin{aligned} \dot{I}_b &= \dot{I}_{ba1} + \dot{I}_{bd} = 13,63 + j23,61 + 40,8 + j6,46 = \\ &= 54,41 + j30,07 = 62,16e^{j29^\circ}, \text{ A}. \end{aligned}$$

2. Схема соединения приёмников в треугольник, с обрывом нагрузки AB показана на рис. 102, векторная диаграмма – на рис. 103.

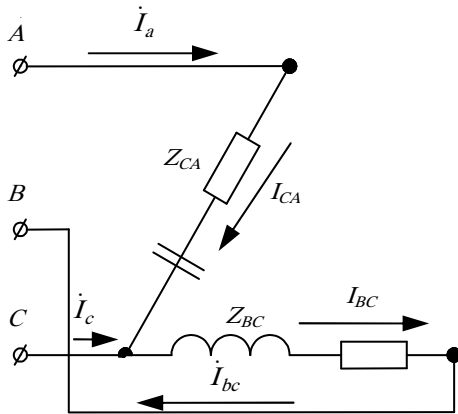


Рис. 102

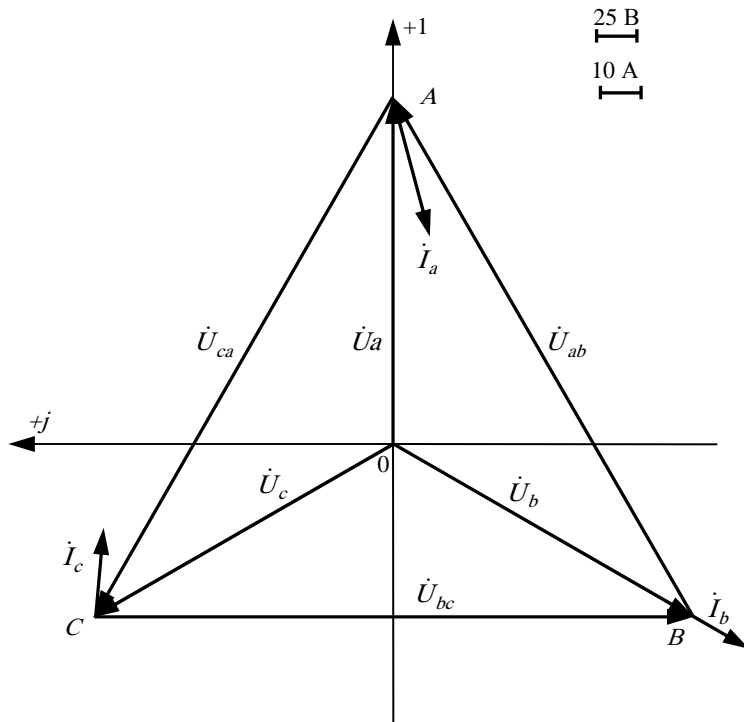


Рис. 103

Определяем фазные токи:

$$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{CA}} = \frac{380e^{j150^\circ}}{11,23e^{-j45,6^\circ}} = 34e^{j195,6^\circ} = -32,7 - j9,1, \text{ А};$$

$$I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{BC}} = \frac{380e^{-j90^\circ}}{25,27e^{j45,6^\circ}} = 15e^{-j136^\circ} = -10,7 - j10,4, \text{ А};$$

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_b = \dot{I}_{bc}.$$

Определяем линейный ток:

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} = -10,7 - j10,4 + 32,7 + j9,1 = 22 - j1,3 = 22,04e^{-j3^\circ}, \text{ А}.$$

3. Соединить приёмники в звезду с нулевым проводом (рис. 104), векторная диаграмма этого соединения представлена на рис. 105. Определить ток через человека при соприкосновении с фазой *C* и нулевым проводом. Построить векторные диаграммы. Сопротивление человека принять равным $Z_{ч} = 1000$ Ом.

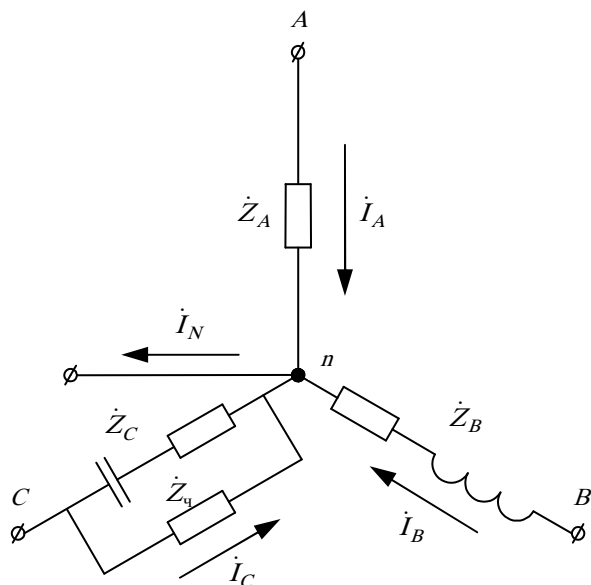


Рис. 104

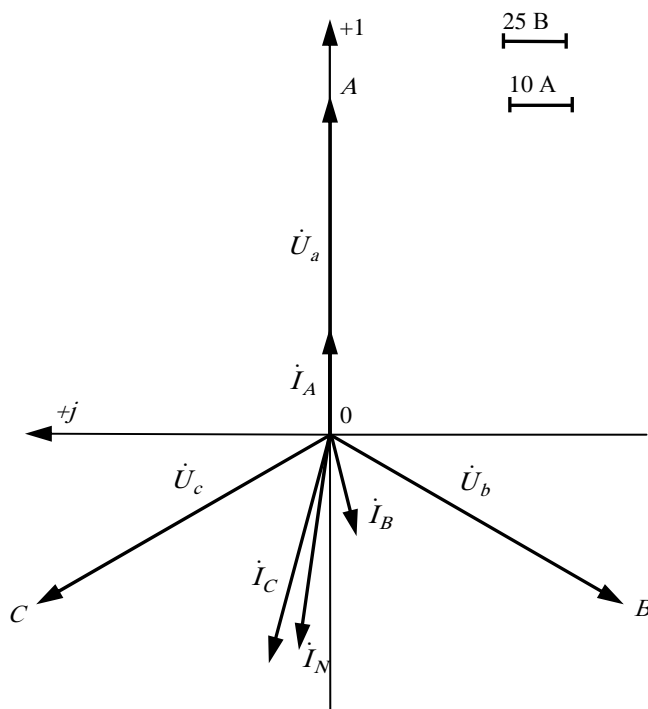


Рис. 105

Определяем сопротивление элементов схемы замещения приёмников:

$$Z_A = \frac{U_A^2 \cdot \cos \varphi_{1\text{НОМ}}}{P_{1\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 1}{6000} = 8,067 \text{ Ом};$$

$$\varphi_A = \arccos(\cos \varphi_{1\text{НОМ}}) = 0^\circ;$$

$$Z_B = \frac{U_B^2 \cdot \cos \varphi_{2\text{НОМ}}}{P_{2\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{4000} = 8,47 \text{ Ом};$$

$$\varphi_B = \arccos(\cos \varphi_{2\text{НОМ}}) = 45,6^\circ;$$

$$Z_C = \frac{U_C^2 \cdot \cos \varphi_{3\text{НОМ}}}{P_{3\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{9000} = 3,764 \text{ Ом};$$

$$\varphi_C = \arccos(\cos \varphi_{3\text{НОМ}}) = -45,6^\circ.$$

В комплексной форме:

$$Z_A = 8,067 e^{j0^\circ}, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_B = 8,47 e^{j45,6^\circ} = 5,926 + j6,052, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_C = 3,764 e^{-j45,6^\circ} = 2,634 - j2,689, \text{ Ом}.$$

Сопротивление фазы C с учётом человека

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{C1} &= \frac{\dot{Z}_C \cdot \dot{Z}_q}{\dot{Z}_C + \dot{Z}_q} = \frac{3,764e^{-j45,6} \cdot 1000}{2,634 - j2,689 + 1000} = \frac{3764e^{-j45,6}}{1002,6e^{-j0,15}} = \\ &= 3,75e^{-j45,45} = 2,62 - j2,67, \text{ Ом.}\end{aligned}$$

Определяем фазные и линейные токи приёмников:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_A} = \frac{220e^{j0}}{8,067e^{j0}} = 27,27 \text{ А;}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_B} = \frac{220e^{-j120}}{8,47e^{j45,6}} = 25,97e^{-j165,6} = -25,15 - j6,46, \text{ А;}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_{C1}} = \frac{220e^{j120}}{3,75e^{-j45,45}} = 58,67e^{j165,6} = -56,83 + j14,6, \text{ А.}$$

Определяем ток нейтрального провода:

$$\begin{aligned}I_N &= I_A + I_B + I_C = 27,27 - 25,15 - j6,46 - 56,83 + j14,6 = \\ &= -54,71 + j8,13 = 55,31e^{j172}, \text{ А;}\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{\text{чел}} = \frac{220e^{j120}}{1000} = 0,22e^{j120}, \text{ А.}$$

4. Соединить приёмники в звезду без нулевого провода (рис. 106), векторная диаграмма этого соединения показана на рис. 107. Определить ток через человека при соприкосновении с фазой *C* и нулевой точкой нагрузки. Построить векторные диаграммы. Сопротивление человека принять равным $\dot{Z}_q = 1000 \text{ Ом}$.

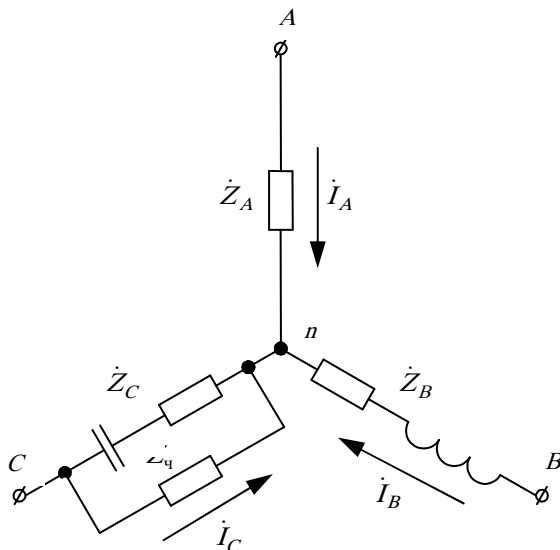


Рис. 106

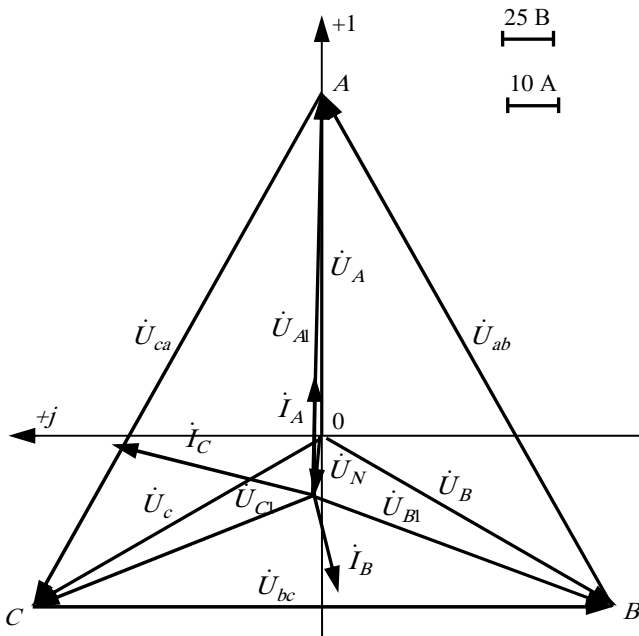


Рис. 107

$$\frac{1}{Z_B} = \frac{1}{5,926 + j6,052} = \frac{5,926 - j6,052}{8,47} = 0,7 - j0,715, \text{ См};$$

$$\frac{1}{Z_C} = \frac{1}{2,62 - j2,67} = \frac{2,62 + j2,67}{3,74} = 0,7 + j0,714, \text{ См};$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= \frac{27,27 - 25,15 - j6,46 - 56,83 + j14,6}{0,124 + 0,7 - j0,715 + 0,7 + j0,714} = \frac{-54,71 + j8,14}{1,524} = \\ &= -35,9 + j5,34 = 36,3e^{j172^\circ}, \text{ В}. \end{aligned}$$

Определяем напряжения в фазах нагрузки:

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_A - \dot{U}_N = 220 + 35,9 - j5,34 = 256 - j5,34 = 256e^{-j1,7}, \text{ В};$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{B1} &= \dot{U}_B - \dot{U}_N = -110 - j190,526 + 35,9 - j5,34 = \\ &= -74,1 - 196 = 210e^{-j110^\circ}, \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{C1} &= \dot{U}_C - \dot{U}_N = -110 + j190,526 + 35,9 - j5,34 = \\ &= -74,1 + j185,2 = 199,5e^{j112^\circ}, \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{\text{цел}} = \frac{199,5e^{j112^\circ}}{1000} = 0,1995e^{j112^\circ}, \text{ А}.$$

Определяем токи в фазах нагрузки:

$$i_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \frac{256e^{-j1,7^\circ}}{8,067e^{j0^\circ}} = 31,7e^{-j1,7^\circ} = 31,69 - j0,98, \text{ A};$$

$$i_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{210e^{-j110^\circ}}{8,47e^{j45,6^\circ}} = 24,8e^{-j155,6^\circ} = -22,6 - j10,2, \text{ A};$$

$$i_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{199,5e^{j112^\circ}}{3,75e^{-j45,45^\circ}} = 53,2e^{j66,55^\circ} = 21,17 + j48,8, \text{ A}.$$

13. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 1. При производстве работ электромонтёр повредил кабель трёхфазной электрической сети с изолированной нейтралью с линейным напряжением $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{л} = 380$ В при частоте $f = 50$ Гц и коснулся инструментом одной из фаз. Ёмкость каждой фазы кабеля относительно земли $C = 0,1$ мкФ. Определить ток, протекающий по телу электромонтёра, приняв сопротивление его тела $R = 1000$ Ом (рис. 108).

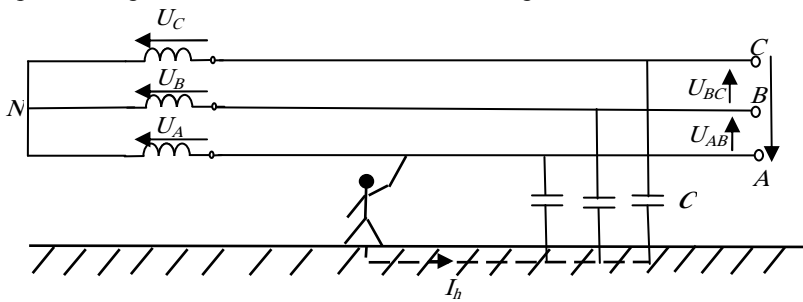


Рис. 108

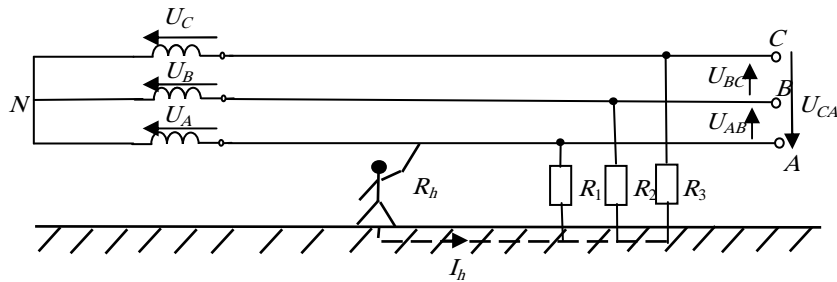


Рис. 109

Задача 2. При ревизии электрооборудования электромонтёр, находясь на земле, коснулся линейного провода с линейным напряжением $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{л\text{ ном}} = 380$ В. Сопротивление изоляции проводов $R_1 = R_2 = R_3 = 10$ кОм. Определить ток, протекающий по телу человека, сопротивление которого $R_h = 1000$ Ом. Ёмкостью проводов относительно земли пренебречь ввиду их малой напряжённости (рис. 109).

Задача 3. Определить ток I_h , протекающий по телу человека в аварийном режиме в трёхфазной симметричной трёхпроводной электрической цепи с изолированной нейтралью при замыкании фазы C на землю через небольшое активное сопротивление заземления $R_{зм} = 100$ Ом и прикосновении человека к исправной фазе A с фазным напряжением $U_{л\text{ ном}} = 220$ В. Сопротивления изоляции проводников $R_1 = R_2 = R_3 = 10$ кОм, $R_h = 1$ кОм (рис. 110).

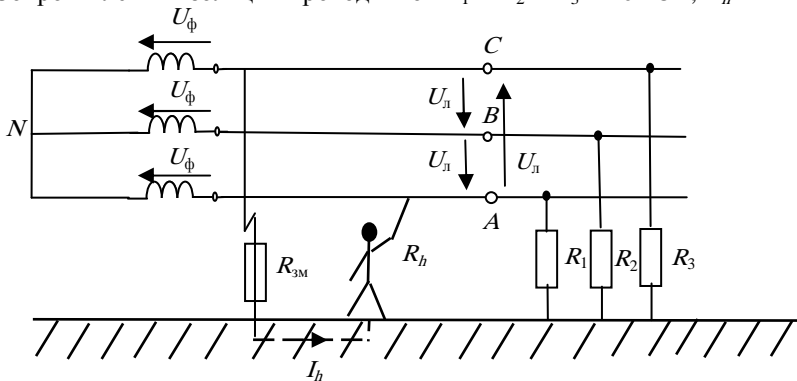


Рис. 110

Задача 4. 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 A включено параллельно $n_1 = 6$ ламп, в фазе B – $n_2 = 4$ лампы, в фазе C – $n_3 = 2$ лампы. Линейное симметричное напряжение источника питания $U_{л} = 380$ В.

Определить фазные сопротивления Z_{ϕ} и фазные токи I_{ϕ} потребителя электроэнергии. Построить векторную диаграмму токов и напряжений, определить ток I_N в нейтральном проводе (рис. 111).

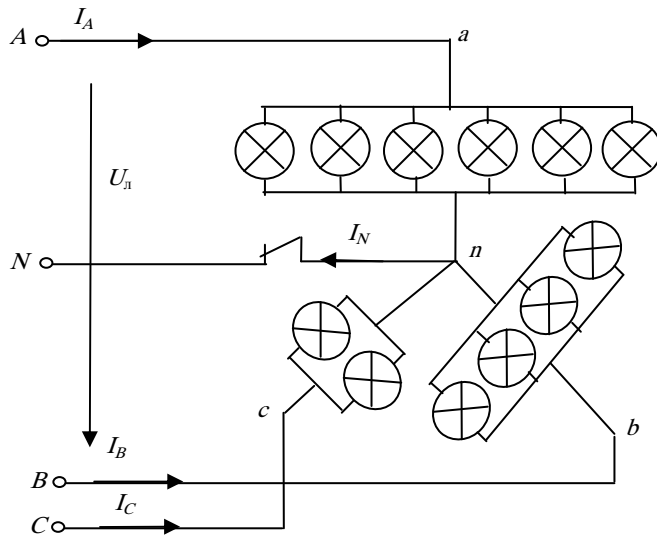


Рис. 111

Задача 5. Определить ток трёхфазного короткого замыкания на выводах генератора $S_{ном} = 15$.

Задача 6. Определить токи в линии до и после обрыва нейтрального провода с замыканием в фазе: а) *A*; б) *B*. Построить векторные диаграммы, если $\dot{Z}_A = -j11$, Ом; $\dot{Z}_B = 22$ Ом; $\dot{Z}_C = j11$, Ом; $U_{лин} = 380$ В (рис. 112).

Задача 7. $\dot{Z}_A = -j10$, Ом; $\dot{Z}_B = j10$, Ом; $\dot{Z}_C = j10$, Ом (рис. 113). Определить токи в линии до и после обрыва линейного провода *B*, построить векторные диаграммы, при $U_n = 127$ В, при $U_n = 220$ В.

Задача 8. По условию задачи 7 найти потребляемую приёмником мощность двумя способами: по показаниям двух ваттметров и по мощности каждой фазы.

Задача 9. Определить токи в линии и построить векторную диаграмму, если $\dot{Z}_A = -j22$, Ом; $\dot{Z}_B = 11 - j11$, Ом; $\dot{Z}_C = j44$, Ом; $U_n = 220$ В; $\dot{Z}_N = 8$ Ом (рис. 114).

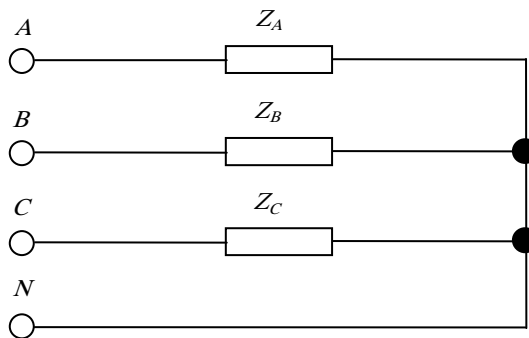


Рис. 112

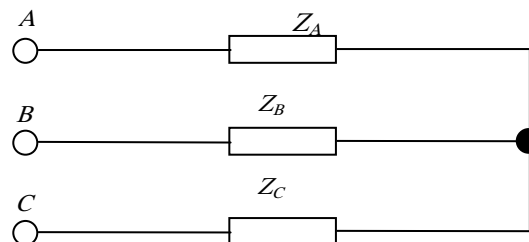


Рис. 113

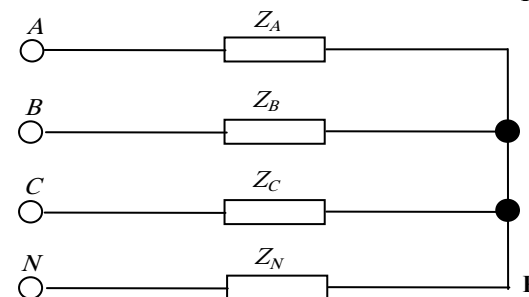


Рис. 114

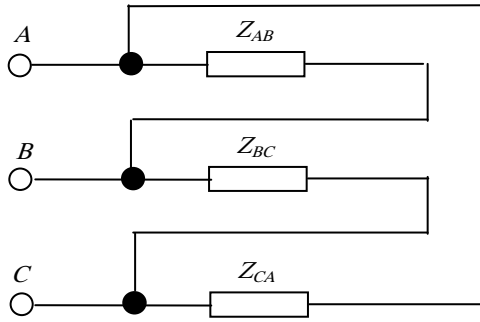


Рис. 115

Задача 10. Определить фазные и линейные токи до и после обрыва нагрузки в фазах AB , BC , CA при условии, что $\dot{Z}_{AB} = j10$, Ом; $\dot{Z}_{BC} = -j19$, Ом; $\dot{Z}_{CA} = 10 + j20$, Ом; $U_{\text{л}} = 380$ В (рис. 115).

Задача 11. По условию задачи 10 определить суммарную активную мощность нагрузки при помощи двух ваттметров.

Задача 12. Определить токи в линии, если $\dot{Z}_{AB} = 22$ Ом; $\dot{Z}_{BC} = -j11$, Ом; $\dot{Z}_{CA} = j22$, Ом; $\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C = 5$ Ом; $U_{\text{л}} = 380$ В (рис. 116).

Задача 13. Доказать, что данные схемы можно использовать в качестве фазоуказателя:

$\dot{Z}_A = j22$, Ом; $\dot{Z}_B = 22$ Ом; $\dot{Z}_C = 22$ Ом; $U_{\text{л}} = 380$ В (рис. 117).

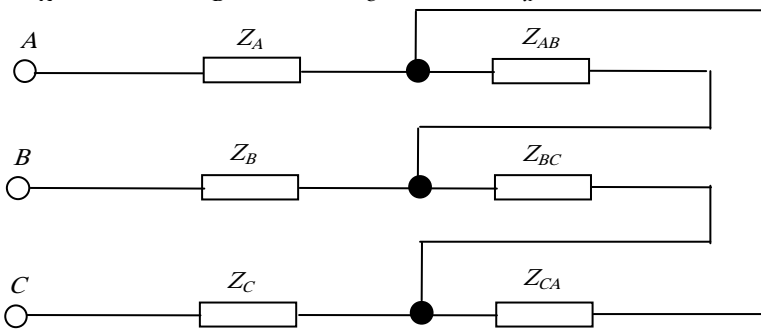


Рис. 116

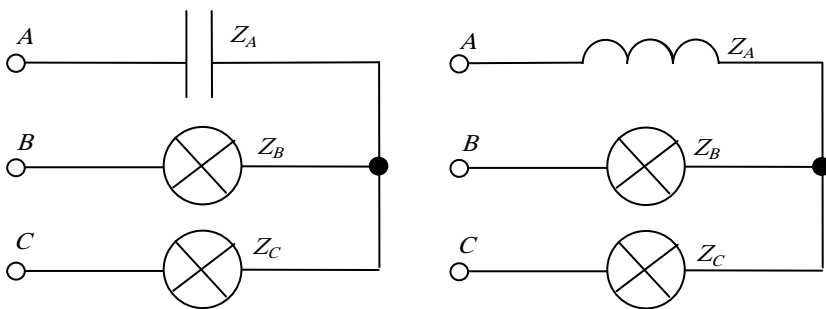


Рис. 117

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

В трёхфазную сеть большой мощности включены однофазные и трёхфазные приёмники. По указанным в табл. 1 их параметрам выполнить следующее:

1. Составить схему включения приёмников и ваттметров для измерения суммарной активной мощности всех приёмников.
2. Определить сопротивление элементов схемы замещения приёмников.
3. Определить фазные и линейные токи приёмников.
4. Построить в масштабе на комплексной плоскости совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений.
5. Определить показания ваттметров.
6. Соединить однофазные приёмники звездой без нулевого провода и рассчитать в них токи.
7. Построить в масштабе на комплексной плоскости совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений приёмников.

Таблица 1

Номер варианта	Количество проводов	Напряжение в сети, В	Однофазный приёмник № 1					Однофазный приёмник № 2					Однофазный приёмник № 3					3-фазный симметричный приёмник № 4				
			$U_{ном}$, В	$P_{ин}$, кВт	$Q_{ин}$, квар	cos φ	Род нагрузки	$U_{ном}$, В	$P_{ин}$, кВт	$Q_{ин}$, квар	cos φ	Род нагрузки	$U_{ном}$, В	$P_{ин}$, кВт	$Q_{ин}$, квар	cos φ	Род нагрузки	$U_{ном}$, В	$P_{ин}$, кВт	$Q_{ин}$, квар	cos φ	Род нагрузки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	3	380	220		0,9	0	ёмк	380	18		1		380	25		0,7	инд	380	12		0,85	ёмк
2	4	127	127	6		0,8	инд	127	14		1		127	8		0	ёмк	220	62		0,78	инд
3	3	220	127	15		0,92	ёмк	127		11	0	инд	127	16		1		220	45		0,95	инд
4	3	220	220	12		1		220	20		1		220	30		0,25	инд	127	7		0,87	инд
5	3	380	380		5	0	ёмк	380	15		1		380	20		0,7	инд	380	57		0,8	ёмк
6	4	380	380	10		1		380	11		0,7	инд	380	11		0,7	инд	220	20		0,8	ёмк
7	3	220	220	20		0,9	инд	220	15		1		220	10		0,7	ёмк	220	10		0,8	ёмк
8	4	220	127	5		0,7	ёмк	127	3		0,8	инд	127	7		1		220	11		0,8	ёмк
9	3	220	220	5		0,6	ёмк	220	7		0,8	инд	220	4		0,7	инд	127	9		1	
10	4	380	220	6		1		220	7		0,8	инд	220	9		0,7	ёмк	380	14		0,85	инд
11	3	380	380	10		0,8	ёмк	380		7	0	инд	380	15		1		220	45		0,5	инд
12	3	220	220	3		1		220	5		0,6	ёмк	220	8		0,8	ёмк	127	15		1	
13	4	380	220	15		1		220	10		0,6	ёмк	220		12	0	инд	220		36	0	инд
14	4	220	127	3		0,8	ёмк	127	2		1		127	9		0,7	инд	220	14		0,85	ёмк
15	4	380	220	10		0,8	инд	220	12		1		220	4		0,2	ёмк	220	8		1	
16	4	380	220	15		1		220	10		0,6	ёмк	220		12	0	ёмк	220		26	0	ёмк
17	3	380	380	12		1		380		4	0	инд	380	5		0,85	ёмк	220	32		0,7	инд

Продолжение табл. 1

Номер варианта	Количество проводов	Напряжение в сети, В	Однофазный приёмник № 1					Однофазный приёмник № 2					Однофазный приёмник № 3					3-фазный симметричный приёмник № 4				
			$U_{ном}$, В	$P_{ин}$, кВт	$Q_{ин}$, квар	cos φ	Род нагрузки	$U_{ном}$, В	$P_{ин}$, кВт	$Q_{ин}$, квар	cos φ	Род нагрузки	$U_{ном}$, В	$P_{ин}$, кВт	$Q_{ин}$, квар	cos φ	Род нагрузки	$U_{ном}$, В	$P_{ин}$, кВт	$Q_{ин}$, квар	cos φ	Род нагрузки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
18	3	220	220	4		1		220		4	0	ёмк	220	7		0,8	ёмк	127	15		0,75	инд
19	3	220	220	10		0,85	инд	220		12	0	ёмк	220	14		1		220	92		1	
20	4	380	380	16		0,75	ёмк	380	16		0,75	инд	380	16		1		220		20	0	инд
21	4	380	220		12	0	инд	220	2		0,8	ёмк	220	30		0,87	инд	220	42		1	
22	3	380	380	9	1	0,87	инд	380		13	0	инд	380	18		0,7	ёмк	220	12		1	
23	4	220	127	3		1		127	15		0,8	ёмк	127		4	0	ёмк	127	8		0,85	инд
24	4	220	220	10		0,6	инд	220	18		0,4	ёмк	220		15	0	ёмк	127	34		0,52	инд
25	4	220	127	1		1		127		4	0	ёмк	127	5		0,9	инд	220	16		0,8	ёмк
26	3	220	220	5		1		220	12		1		220	14		0,8	ёмк	127	2		0,7	инд
27	4	380	220	4		1		220	5		0,7	ёмк	220	6		0,7	инд	380	15		0,9	ёмк
28	3	220	220	7		1		220	12		0,9	инд	220	17		1		127	10		0,7	ёмк
29	3	380	380	10		0,8	ёмк	380	12		0,8		380	14		0,6	инд	380	10		0,9	ёмк
30	4	220	127	6		0,7	инд	127	10		1		127		10	0	ёмк	220	40		0,8	инд
31	3	220	127	14		0,6	ёмк	127		8	0	инд	127	10		1		220	20		0,9	инд
32	3	220	220	16		0,9		220	14		1		220	16		0,3	инд	127	7		0,6	инд
33	3	380	380	6		1	ёмк	380	12		1		380	8		0,9	инд	380	24		0,7	ёмк
34	4	380	380		3	0	ёмк	380	16		1	инд	380	10		0,6	инд	220	17		0,5	ёмк

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
35	3	220	220	15		0,7	инд	220	7		0,6		220	7		0,5	ёмк	220	9		0,7	ёмк
36	4	220	127	4		0,6	ёмк	127	3		0,7	инд	127	9		1		220	5		0,9	ёмк
37	3	220	220	4		0,9	инд	220	5		0,6	ёмк	220	6		0,8	инд	127	10		0,8	ёмк
38	4	380	220	6		1		220	4		0,7	инд	220	9		0,7	ёмк	380	6		0,9	инд
39	3	380	380	9		0,7	ёмк	380		5	0	инд	380	7		1		220	7		0,4	инд
40	3	220	220	4		1		220	6		0,7	ёмк	220	5		0,7	ёмк	127	12		1	
41	4	380	220	6		1		220	7		0,5	ёмк	220		10	0	инд	220		30	0	инд
42	3	380	380	12		1		380		4	0	инд	380	3		0,7	ёмк	220	10		0,7	инд
43	3	220	220	4		1		220		4	0	ёмк	220	7		0,6	ёмк	127	12		0,7	инд
44	4	380	380	16		0,8	ёмк	380	17		0,8	инд	380	19		1		220	18		0,4	ёмк

45	4	220	127	5		0,9	ёмк	127	4		1		127	8		0,7	инд	220	12		0,8	ёмк
46	4	380	220	7		0,9	инд	220	10		1		220	4		0,3	ёмк	220	6		1	
47	4	220	127	3		1		127	15		0,8	ёмк	127		3	0	ёмк	127	8		0,9	инд
48	4	380	220	12		1		220	9		0,7	ёмк	220		12	0	ёмк	220		27	0	ёмк
49	3	220	220	10		0,8	инд	220		12	0	ёмк	220	14		1		220	1	60	0,8	инд
50	4	380	220		10	0	инд	220	4		0,6	ёмк	220	30		0,7	инд	220	2	40	0,7	ёмк
51	3	380	380	6		0,8	инд	380		14	0	инд	380	12		0,6	ёмк	220	16		1	
52	4	220	220	7		0,6	инд	220	16		0,5	ёмк	220		16	0	ёмк	127	40		0,7	инд
53	4	220	127	2		1		127		4	0	ёмк	127	6		0,7	инд	220	17		0,9	ёмк
54	3	220	220	6		1		220	10		1		220	16		0,9	ёмк	127	4		0,6	инд
55	4	380	220	4		1		220	6		0,8	ёмк	220	4		0,6	инд	380	14		0,9	ёмк
56	3	220	220	7		1		220	10		0,9	инд	220	14		1		127	4		0,6	инд
57	3	380	380	14		0,7	ёмк	380	40		0,7	инд	380	7		0,7	инд	380	16		0,8	ёмк
58	4	220	127	10		0,6	инд	127	17		1		127		10	0	ёмк	220	60		0,8	инд
59	3	220	127	19		0,9	ёмк	127		13	0	инд	127	20		1		220	50		0,9	инд

Продолжение табл. 1

Номер варианта	Количество проводов	Напряжение в сети, В	Однофазный приёмник № 1					Однофазный приёмник № 2					Однофазный приёмник № 3					3-фазный симметричный приёмник № 4				
			$U_{ном}$, В	$P_{н}$, кВт	$Q_{н}$, квар	$\cos \phi$	Род нагрузки	$U_{ном}$, В	$P_{н}$, кВт	$Q_{н}$, квар	$\cos \phi$	Род нагрузки	$U_{ном}$, В	$P_{н}$, кВт	$Q_{н}$, квар	$\cos \phi$	Род нагрузки	$U_{ном}$, В	$P_{н}$, кВт	$Q_{н}$, квар	$\cos \phi$	Род нагрузки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
60	3	220	220	17		0,9	инд	220	24		1		220	36		0,3	инд	127	10		1	
61	3	380	380		7	0	инд	380	19		1		380	24		0,7	инд	380	20		0,6	ёмк
62	4	380	380	14		0,7	инд	380	12		0,6	инд	380	14		0,7	инд	220	24		0,8	ёмк
63	3	220	220	20		0,6	инд	220	16		1		220	14		0,6	ёмк	220	14		0,9	ёмк
64	4	220	127	9		0,7	ёмк	127	6		0,8	инд	127	10		1		220	15		0,6	ёмк
65	3	220	220	10		0,5	ёмк	220	10		0,7	инд	220	7		0,6	инд	127	12		1	
66	4	380	220	9		1		220	6		0,9	инд	220	12		0,7	ёмк	380	18		0,9	инд
67	3	380	380	14		0,7	ёмк	380		10	0	инд	380	16		1		220	45		0,6	инд
68	3	220	220	6		1		220	8		0,7	ёмк	220	12		0,8	ёмк	220	12		0,7	инд
69	4	380	220	16		1		220	9		0,6	ёмк	220		14	0	инд	220		38	0	инд
70	4	220	127	6		0,8	ёмк	127	6		1		127	12		0,7	инд	220	17		0,9	инд
71	4	380	220	14		0,7	инд	220	4		1		220	6		0,3	ёмк	220	14		1	
72	4	380	220	16		1		220	14		0,5	ёмк	220		12	0	ёмк	220		9	0	инд
73	3	380	380	12		1		380		6	0	инд	380	9		0,9	ёмк	220	40		0,7	инд
74	3	220	220	6		1		220		7	0	ёмк	220	7		0,6	ёмк	127	14		0,8	инд
75	3	220	220	14		0,9	инд	220		12	0	ёмк	220	16		1		220	96		1	
76	4	380	380	16		0,8	ёмк	380	19		0,6	ёмк	380	19		1		220		20	1	
77	4	380	220		14	0	инд	220	4		1		220	4		0,7	инд	220	42		1	

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
78	3	380	380	12		0,7	инд	220	5		0,6	ёмк	380	6		0,4	инд	220	41		1	
79	4	220	127	6		1		127	8		0,9	инд	127		8	0	инд	127	4		0,9	инд
80	4	220	220	7		0,6	ёмк	220	9		0,6	инд	220	6		1		127	7		0,6	ёмк
81	4	220	127	6		0,3	инд	127	6		1		127	5		0,7	инд	220	9		0,5	ёмк
82	3	220	220	10		0,9	инд	220	10		1		220	6		0,3	инд	127	14		0,3	ёмк
83	4	380	220	12		0,6	инд	220	5		0,7	ёмк	220	5		1		380		6	0	инд
84	3	220	220	6		0,5	ёмк	127		6	0,3	инд	220	10		1		220	7		0,3	инд
85	3	380	380		4	0	инд	380	10		0,7	ёмк	380	14		1		380	15		0,7	инд
86	4	220	127	6		0,3	ёмк	127	7		0,7	инд	127	12		0,4	инд	220	7		0,7	ёмк
87	3	220	127	14		0,4	инд	127	5		1		127	7		0,2	инд	220	12		0,7	инд
88	3	220	220		10	0	ёмк	220	6		1		220	12		0,9	инд	127	18		0,4	ёмк
89	3	380	380	12		0,1	ёмк	380	7		0,9	инд	380	10		0,1	инд	380		4	0	инд
90	4	380	380	17		1		380	19		0,6	ёмк	380	14		0,7	инд	220	17		1	
91	3	220	220	4		0,6	ёмк	220	15		0,4	ёмк	220	24		0,1	инд	220	42		1	
92	4	220	127	16		0,7	инд	127	24		0,9	ёмк	220	15		0,4	инд	220	41		0,7	ёмк
93	3	220	220		12	0	ёмк	220	41		0,7	инд	220	24		0,5	инд	127	42		1	
94	4	380	220	17		0,7	ёмк	220	14		0,9	ёмк	380	7		1		380	62		1	
95	3	380	380	24		0,2	ёмк	380	21		0,7	ёмк	220	12		1		220	4		0,7	инд
96	3	220	220	24		0,3	инд	220	15		0,9	инд	220	16		0,7	инд	127		9	0	ёмк
97	4	380	220	16		0,9	инд	220		21	0	инд	380	19		0,8	ёмк	220	10		0,5	инд

98	4	220	127	19		0,6	инд	127	12		0,2	инд	127		20	0	инд	220	12		1	
99	4	380	220	18		0,7	ёмк	220		4	0,4	ёмк	220	21		0,4	инд	380	24		0,2	инд
100	4	380	220	2		0,4	ёмк	220	10		0,5	ёмк	220	26		0,2	ёмк	380	41		0,9	ёмк

ПРИМЕРНЫЙ ВАРИАНТ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Рассмотрим для примера решение варианта № 2.
Исходные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сеть 4-проводная $U_{\text{сети}} = 220 \text{ В}$	Однофазный приёмник № 1	Однофазный приёмник № 2	Однофазный приёмник № 3	Трёхфазный приёмник № 4
$U_{\text{ном}}$, В	127	127	127	220
$P_{\text{ном}}$, кВт	6	14	–	62
$Q_{\text{ном}}$, квар	–	–	8	–
$\cos \varphi_{\text{ном}}$	0,8	1	0	0,78
Характер	инд	акт	ёмк	инд

Схема включения приёмников и ваттметров для измерения суммарной активной мощности всех приёмников имеет вид, представленный на рис. 118.

Определим сопротивление элементов схемы замещения приёмников:

$$Z_1 = \frac{U_{1\text{ном}}^2 \cos \varphi_{1\text{ном}}}{P_{1\text{ном}}} = 2,151 \text{ Ом}; \quad \varphi_1 = \arccos(\cos \varphi_{1\text{ном}}) = 37^\circ;$$

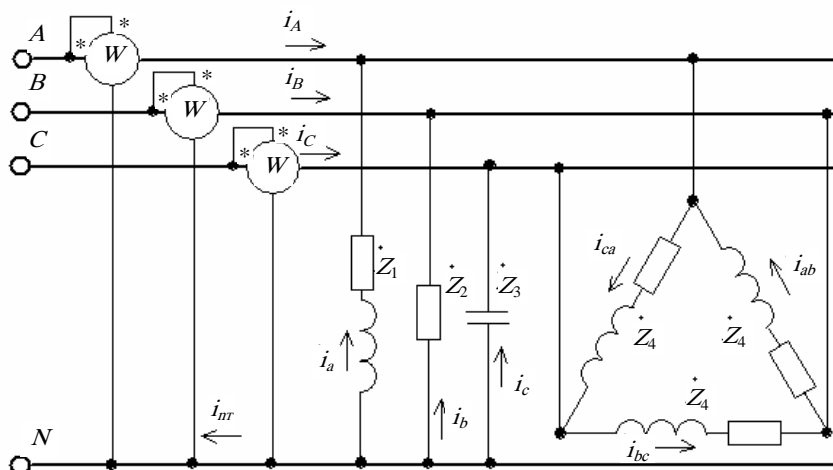


Рис. 118

$$Z_2 = \frac{U_{2\text{ном}}^2 \cos \varphi_{2\text{ном}}}{P_{2\text{ном}}} = 1,152 \text{ Ом}; \quad \varphi_2 = \arccos(\cos \varphi_{2\text{ном}}) = 0^\circ;$$

$$Z_3 = \frac{U_{3\text{ном}}^2 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{3\text{ном}}}}{Q_{3\text{ном}}} = 2,016 \text{ Ом}; \quad \varphi_3 = -\arccos(\cos \varphi_{3\text{ном}}) = -90^\circ;$$

$$Z_4 = \frac{U_{4\text{ном}}^2 \cos \varphi_{4\text{ном}}}{P_{3\text{ном}} / 3} = 1,827 \text{ Ом}; \quad \varphi_4 = \arccos(\cos \varphi_{4\text{ном}}) = 39^\circ;$$

в комплексной форме

$$\dot{Z}_1 = 2,151 e^{-j37^\circ} = 1,72 + j1,29, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_2 = 1,152 e^{j0^\circ} = 1,152 \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_3 = 2,016 e^{j90^\circ} = -j2,016, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_4 = 1,827 e^{j39^\circ} = 1,425 + j1,143, \text{ Ом}.$$

Определим фазные и линейные токи приёмников:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= 127 \text{ В}; \\ \dot{U}_b &= 127 e^{-j120^\circ} = -63,5 - j109,985, \text{ В}; \\ \dot{U}_c &= 127 e^{j120^\circ} = -63,5 + j109,985, \text{ В}; \\ \dot{U}_{ab} &= 220 e^{j30^\circ} = 190,526 + j110, \text{ В}; \\ \dot{U}_{bc} &= 220 e^{-j90^\circ} = -j220, \text{ В}; \\ \dot{U}_{ca} &= 220 e^{j150^\circ} = -190,526 + j110, \text{ В}; \\ \dot{I}_a &= \frac{\dot{U}_a}{Z_1} = 59,055 e^{-j37^\circ} = 47,244 - j35,433, \text{ А}; \\ \dot{I}_b &= \frac{\dot{U}_b}{Z_2} = 110,236 e^{-j120^\circ} = -55,118 - j95,467, \text{ А}; \\ \dot{I}_c &= \frac{\dot{U}_c}{Z_3} = 62,992 e^{-j150^\circ} = -54,553 - j31,496, \text{ А}; \\ \dot{I}_{ab} &= \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_4} = 120,435 e^{-j9^\circ} = 119,037 - j18,299, \text{ А}; \\ \dot{I}_{bc} &= \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_4} = 120,435 e^{-j127^\circ} = -68,182 - j90,909, \text{ А}; \\ \dot{I}_{ca} &= \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_4} = 120,435 e^{-j111^\circ} = -43,671 - j112,238, \text{ А}. \end{aligned}$$

Линейные токи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab} - \dot{I}_a = -209,952 + j165,971 = 267,63 e^{j142^\circ}, \text{ А}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} - \dot{I}_b = 249,521 + j171,108 = 302,553 e^{j34^\circ}, \text{ А}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} - \dot{I}_c = 22,858 - j174,682 = 176,171 e^{-j83^\circ}, \text{ А}. \end{aligned}$$

Ток нулевого провода

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = -62,427 - j162,397 = 173,982 e^{-j111^\circ}, \text{ А}.$$

Построим на комплексной плоскости в масштабе совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 119).

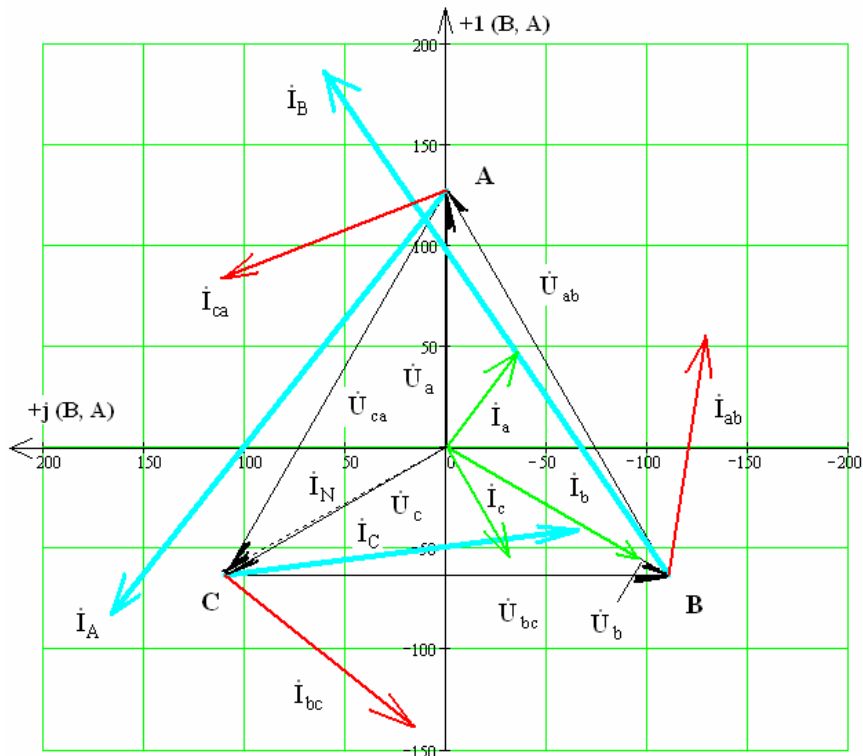


Рис. 119

Мощность, показываемая ваттметрами,

$$P_1 = \operatorname{Re}(-\dot{U}_a I_A^*) = 26\,664 \text{ Вт};$$

$$P_2 = \operatorname{Re}(-\dot{U}_b I_B^*) = 34\,664 \text{ Вт};$$

$$P_3 = \operatorname{Re}(-\dot{U}_c I_C^*) = 20\,664 \text{ Вт}.$$

Суммарная потребляемая мощность

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 81\,992 = 82 \text{ кВт}.$$

Согласно условию

$$P = 6 + 14 + 0 + 62 = 92 \text{ кВт}.$$

Соединить однофазные приёмники звездой без нулевого провода (рис. 120) и рассчитать в них токи. Построить в масштабе на комплексной плоскости совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений приёмников.

Определим напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_N = \frac{\frac{\dot{U}_a}{Z_1} + \frac{\dot{U}_b}{Z_2} + \frac{\dot{U}_c}{Z_3}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}} = 138,207 e^{-j121^\circ} = -71,086 - j118,525, \text{ В}.$$

Определим напряжение в фазах нагрузки:

$$\dot{U}_{a1} = \dot{U}_a - \dot{U}_N = 198,086 + j118,525 = 230,838 e^{j31^\circ}, \text{ В};$$

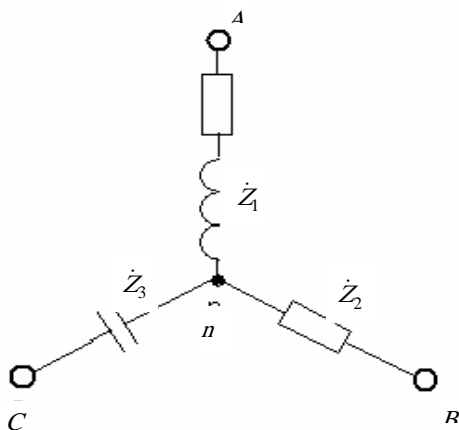


Рис. 120

$$\dot{U}_{b1} = \dot{U}_b - \dot{U}_N = 7,586 + j8,539 = 11,422 e^{j48^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{c1} = \dot{U}_c - \dot{U}_N = 7,586 + j228,51 = 228,636 e^{j88^\circ}, \text{ В}.$$

Векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рис. 121.

Определим токи в фазах нагрузки:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{U}_{a1}}{Z_1} = 107,34 e^{-j6^\circ} = 106,757 - j11,175, \text{ А};$$

$$\dot{I}_{b1} = \frac{\dot{U}_{b1}}{Z_2} = 9,915 e^{48^\circ} = 6,585 + j7,412, \text{ А};$$

$$\dot{I}_{c1} = \frac{\dot{U}_{c1}}{Z_3} = 113,404 e^{j178^\circ} = -113,341 + j3,763, \text{ А}.$$

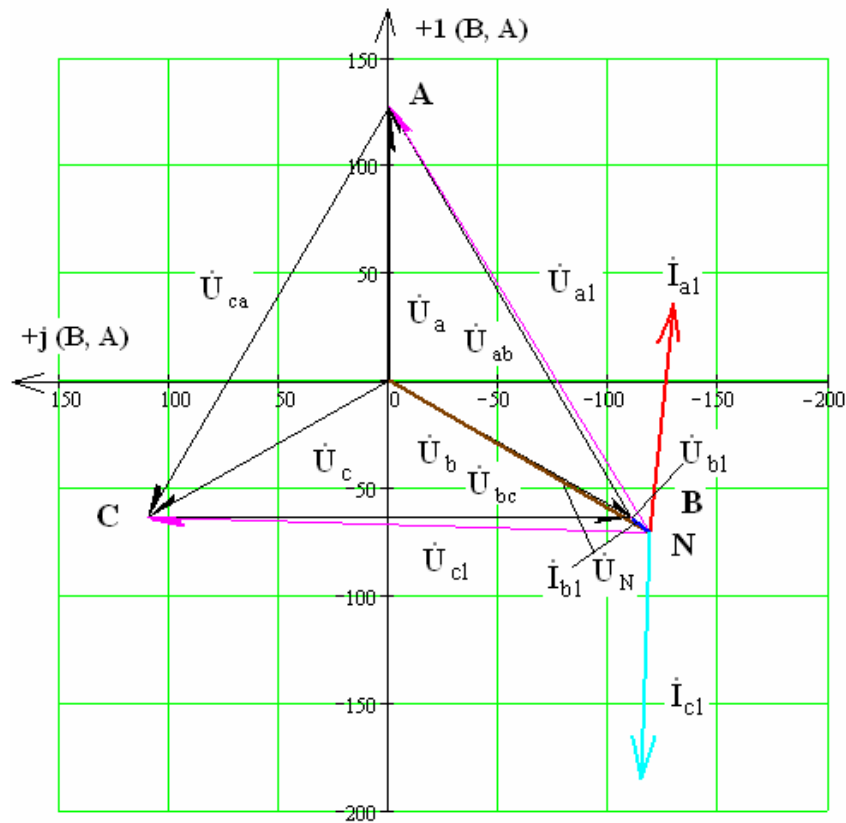


Рис. 121

Таблица 3

Сеть 3-проводная $U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}$	Однофазный приёмник № 1	Однофазный приёмник № 2	Однофазный приёмник № 3	Трёхфазный приёмник № 4
$U_{\text{ном}}, \text{ В}$	380	380	380	380
$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	–	15	20	57
$Q_{\text{ном}}, \text{ квар}$	5	–	–	–
$\cos \varphi_{\text{ном}}$	0	1	0,7	0,8
Характер	емк	акт	инд	емк

Исходные данные для варианта № 5 представлены в табл. 3.

Схема включения приёмников и ваттметров для измерения суммарной активной мощности всех приёмников имеет вид, представленный на рис. 122.

Определим сопротивление элементов схемы замещения приёмников:

$$Z_1 = \frac{U_{1\text{ном}}^2 \sqrt{1 - \cos \varphi_{1\text{ном}}}}{Q_{1\text{ном}}} = 28,88 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = \frac{U_{2\text{ном}}^2 \cos \varphi_{2\text{ном}}}{P_{2\text{ном}}} = 9,627 \text{ Ом};$$

$$Z_3 = \frac{U_{4\text{ном}}^2 \cos \varphi_{3\text{ном}}}{P_{3\text{ном}}} = 5,054 \text{ Ом};$$

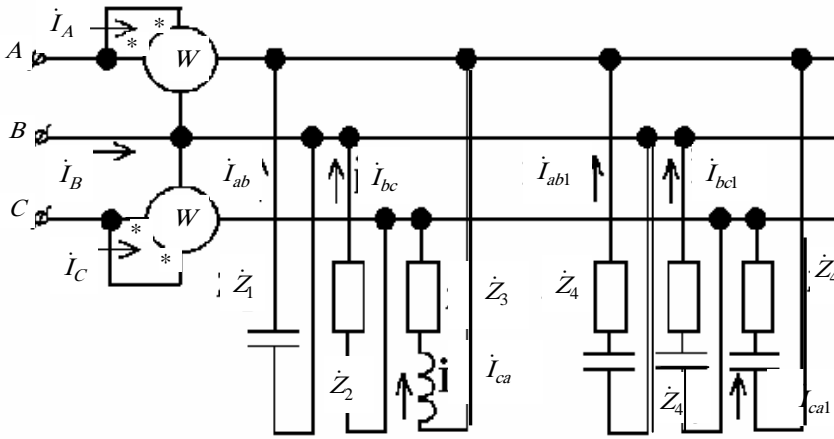


Рис. 122

$$Z_4 = \frac{3U_{4\text{НОМ}}^2 \cos \varphi_{4\text{НОМ}}}{P_{4\text{НОМ}} / 3} = 6,08 \text{ Ом};$$

$$\varphi_1 = -\arccos(\cos \varphi_{1\text{НОМ}}) = -90^\circ;$$

$$\varphi_2 = \arccos(\cos \varphi_{2\text{НОМ}}) = 0^\circ;$$

$$\varphi_3 = \arccos(\cos \varphi_{3\text{НОМ}}) = 46^\circ;$$

$$\varphi_4 = -\arccos(\cos \varphi_{4\text{НОМ}}) = -37^\circ;$$

в комплексной форме:

$$\dot{Z}_1 = 28,88e^{-j90^\circ} = -j28,88, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_2 = 9,627e^{j0^\circ} = 9,627 \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_3 = 5,054e^{j46^\circ} = 3,538 + j3,609, \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_4 = 6,08e^{-j37^\circ} = 4,864 - j3,648, \text{ Ом}.$$

Определим фазные и линейные токи приёмников:

$$\dot{U}_a = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_b = 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190,526, \text{ В};$$

$$\dot{U}_c = 220e^{j120^\circ} = -110 + j190,526, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ab} = 380e^{j30^\circ} = 329,09 + j190, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bc} = 380e^{-j90^\circ} = -j380, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ac} = 380e^{j150^\circ};$$

$$\dot{I}_{ab1} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_4} = 62,5e^{j67^\circ} = 24,551 + j57,476, \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc1} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\dot{Z}_4} = 62,5e^{-j53^\circ} = 37,5 - j50, \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ca1} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\dot{Z}_4} = 62,5e^{-j173^\circ} = -62,051 - j7,476, \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_1} = 13,158e^{j120^\circ} = -6,579 + j11,395, \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\dot{Z}_2} = 39,474e^{-j90^\circ} = -j39,474, \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\dot{Z}_3} = 75,188e^{j104^\circ} = -18,733 + j72,817, \text{ А};$$

линейные токи:

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ab1} + \dot{I}_{ca} + \dot{I}_{ca1} = -98,756 - j3,53 = 98,819e^{-j178^\circ}, \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = -\dot{I}_{bc} - \dot{I}_{bc1} + \dot{I}_{ab} + \dot{I}_{ab1} = -19,528 - j158,345 = 159,544e^{j97^\circ}, \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = -\dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ca1} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{bc1} = 118,284 - j154,815 = 194,83e^{-j53^\circ}, \text{ А}.$$

Проверка

$$\dot{I} = \dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C = 0 \text{ A.}$$

Построим на комплексной плоскости в масштабе совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 123). Мощность, показываемая ваттметрами,

$$P_1 = \operatorname{Re}(-\dot{U}_{ab} \dot{I}_A^*) = 33 \ 170 \text{ Вт};$$

$$P_2 = \operatorname{Re}(\dot{U}_{bc} \dot{I}_C^*) = 58 \ 830 \text{ Вт.}$$

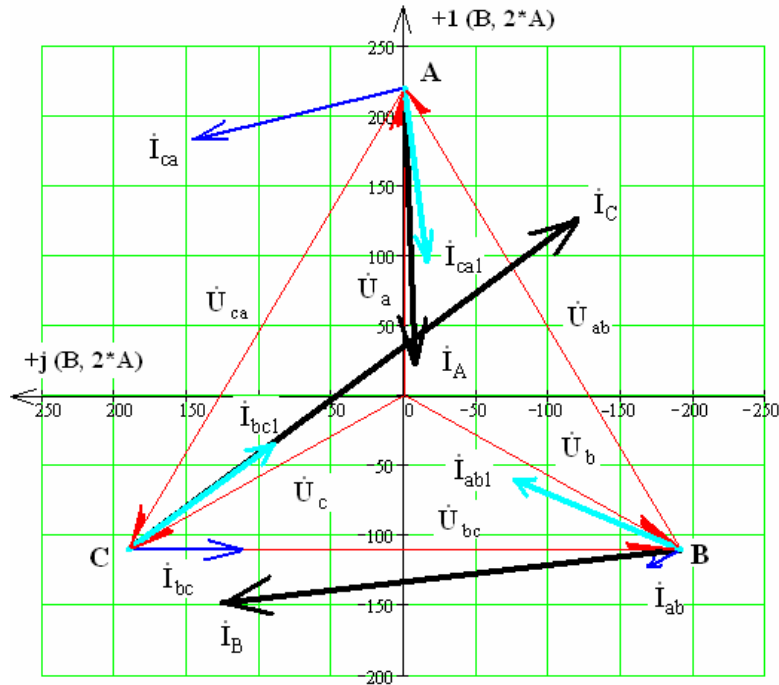


Рис. 123

Суммарная потребляемая мощность

$$P = P_1 + P_2 = 92 \ 000 \text{ Вт.}$$

Согласно условию,

$$P = 0 + 15 + 20 + 57 = 92 \text{ кВт.}$$

Соединить однофазные приёмники звездой без нулевого провода и рассчитать в них токи. Построить в масштабе на комплексной плоскости совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений приёмников (рис. 124).

Определим напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_N = \frac{\frac{\dot{U}_a}{Z_1} + \frac{\dot{U}_b}{Z_2} + \frac{\dot{U}_c}{Z_3}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}} = 112,376 e^{j113} = -44,369 + j103,246, \text{ В.}$$

Определим напряжение в фазах нагрузки:

$$\dot{U}_{a1} = \dot{U}_a - \dot{U}_N = 264,369 - j103,246 = 283,815 e^{-j21^\circ}, \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{b1} = \dot{U}_b - \dot{U}_N = -65,631 - j293,772 = 301,014 e^{-j103^\circ}, \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{c1} = \dot{U}_c - \dot{U}_N = -65,631 + j87,279 = 109,202 e^{j127^\circ}, \text{ В.}$$

Определим токи в фазах нагрузки:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{U}_{a1}}{Z_1} = 9,827 e^{j69^\circ} = 3,575 + j9,154, \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{b1} = \frac{\dot{U}_{b1}}{Z_2} = 31,269 e^{-j103^\circ} = -6,818 - j30,516, \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{cl} = \frac{\dot{U}_{cl}}{Z_3} = 21,607 e^{j81^\circ} = 3,243 + j21,362, \text{ A.}$$

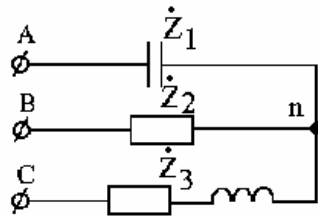


Рис. 124

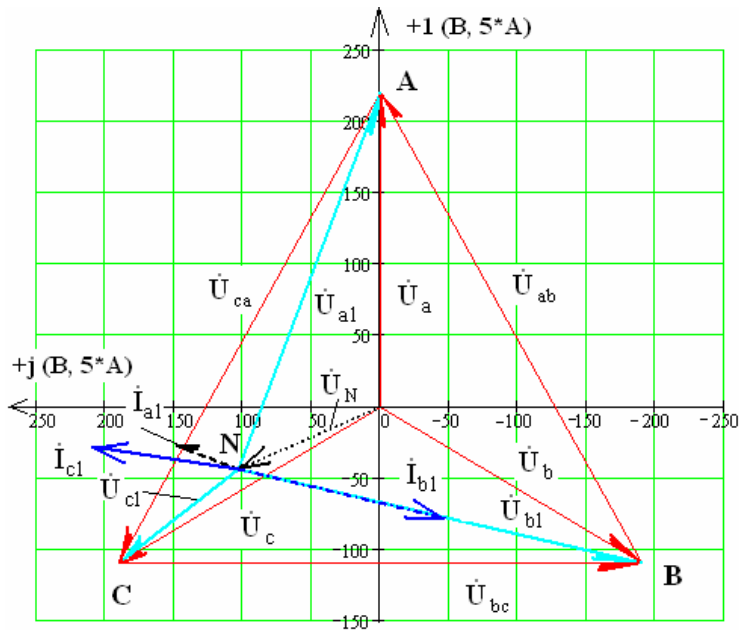


Рис. 125

Совмещённая векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рис. 125.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные электрические системы, состоящие из генераторов электростанций, трансформаторов, линий передачи электрической энергии и распределительных сетей, представляют собой в подавляющем большинстве случаев трёхфазные системы. Такое распространение трёхфазных систем объясняется тем, что они обеспечивают наиболее экономную передачу энергии и позволяют создавать надёжные в работе и простые по устройству электродвигатели, генераторы и трансформаторы.

Эти факторы определили одно из главных мест в курсе "Теоретические основы электротехники" рассматриваемых цепей трёхфазного тока. Материал данного издания разделён на три части: первая часть посвящена теории трёхфазных цепей и вопросам их применения в электрооборудовании; вторая часть – решению основных задач при анализе данных систем; третья часть имеет задания для самостоятельной работы по данной теме. Опыт показывает, что такая структура изложения материала способствует лучшему усвоению материала.

Книга является учебно-методическим комплексом по трёхфазным цепям, одному из основополагающих в формировании будущего специалиста по направлению "Электроэнергетика" разделов дисциплины "Теоретические основы электротехники". Она может также быть полезна студентам инженерных специальностей, изучающих курс электротехники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов. – В 3 т. / К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – Т. 1. – 463 с.: ил.
2. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник для электротехнических вузов / Л.А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1996. – 638 с.: ил.
3. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.Л. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В.Страхов. – 4-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1975. – 752 с.: ил.

4. Новиков, Ю.Н. Электротехника и электроника. Теория цепей и сигналов, методы анализа : учебное пособие / Ю.Н. Новиков. – СПб. : Питер, 2005. – 384 с.: ил.
5. Каминский, Е.А. Звезда и треугольник / Е.А. Каминский. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 64 с.: ил.
6. Сигорский, В.П. Математический аппарат инженера / В.П. Сигорский. – Киев : Техніка, 1977. – 766 с.
7. Филатов, А.А. Обслуживание электрических подстанций оперативным персоналом / А.А. Филатов. – М. : Энергоатомиздат. 1990. – 304 с.: ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Общие сведения о трёхфазных цепях	5
2. Симметричный режим работы трёхфазной цепи	8
3. Короткое замыкание в симметричной трёхфазной цепи	12
4. Несимметричный режим работы трёхфазной цепи	14
5. Измерение мощности в трёхфазной цепи	18
6. Трёхфазное вращающееся магнитное поле	20
7. Несинусоидальные токи в трёхфазной цепи	24
8. Метод симметричных составляющих для расчёта несимметричных трёхфазных систем	25
9. Токи и напряжения в месте короткого замыкания трёхфазной системы	37
10. Работа различного электрооборудования в трёхфазных сетях	48
11. Предотвращение аварий и отказов в работе оборудования	68
12. Примеры решения задач	72
13. Задачи для самостоятельного решения	130
14. Задание для расчётно-графической работы	134
15. Примерный вариант расчётно-графической работы	140
Заключение	150
Список литературы	150