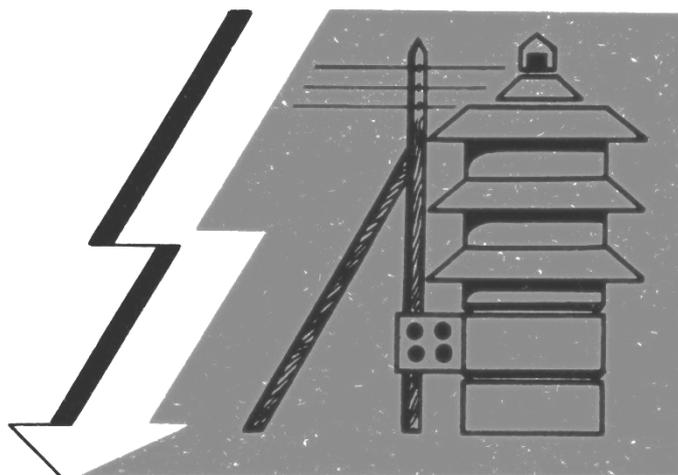


В.Ф. КАЛИНИН, В.М. ИВАНОВ, Е.А. ПЕЧАГИН

ЦЕПИ ТРЁХФАЗНОГО ТОКА В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ



◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

УДК (621.039.637:544.013)(075.8)
ББК ζ 211я73-я-5
К172

Р е ц е н з е н т ы:

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

Профессор кафедры «Биомедицинская техника» ГОУ ВПО ТГТУ,
доктор технических наук, заслуженный изобретатель РФ
Е.И. Глинкин

Калинин, В.Ф.

К172 Цепи трёхфазного тока в электрооборудовании : учебно-методический комплекс / В.Ф. Калинин, В.М. Иванов, Е.А. Печагин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 260 с. – 400 экз. – ISBN 978-5-8265-0966-1.

Обобщены сведения о свойствах и методах анализа трёхфазных электрических сетей. Представлены разнообразные задачи по данному направлению с решениями, приведены лабораторные работы по изучению трёхфазных цепей, работающих в различных режимах с применением элементов компьютерного моделирования, предложены тесты для самостоятельного изучения трёхфазных электрических цепей.

Предназначен для студентов, изучающих дисциплины «Теоретические основы электротехники», «Электропитающие системы и электрические сети», «Переходные процессы в системах электроснабжения» по направлению подготовки 140200 «Электроэнергетика».

УДК (621.039.637:544.013)(075.8)
ББК ζ 211я73-я-5

ISBN 978-5-8265-0966-1

© Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ГОУ ВПО ТГТУ), 2010

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

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

**ЦЕПИ
ТРЕХФАЗНОГО ТОКА В
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ**

Рекомендовано Государственным образовательным
учреждением высшего профессионального образования
«Московский энергетический институт (технический университет)»
в качестве учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки 140200 «Электроэнергетика»



Тамбов

◆ Издательство ГОУ ВПО ТГТУ ◆
2010

Учебное издание

КАЛИНИН Вячеслав Фёдорович,
ИВАНОВ Владимир Михайлович,
ПЕЧАГИН Евгений Александрович

ЦЕПИ ТРЁХФАЗНОГО ТОКА В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

Учебно-методический комплекс

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.С. Анурьева

Подписано в печать 22.12.2010.
Формат 60 × 84 / 16. 15,11 усл. печ. л. Тираж 400 экз. Заказ № 639

Издательско-полиграфический центр ГОУ ВПО ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

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

**ЦЕПИ
ТРЁХФАЗНОГО ТОКА В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ**

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ГОУ ВПО ТГТУ ◆

ВВЕДЕНИЕ

Жизнь современного человека и, тем более, цивилизованной страны немислима без электричества. Потоки электроэнергии, рождаясь 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.

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 трёхфазных цепей в курсах «Теоретические основы электротехники», «Электромеханика», «Электропитающие системы и электрические сети», «Переходные процессы в системах электроснабжения». 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 и лабораторных работ, отражающих основные режимы работы трёхфазных цепей в электрооборудовании; третья часть содержит задания для самостоятельной курсовой работы и тесты 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". Она может также быть полезна студентам инженерных специальностей, изучающих курс электротехники.

Авторы благодарны рецензентам доктору физико-математических наук, профессору, заслуженному деятелю науки РФ В.А. Федорову и доктору технических наук, профессору, заслуженному изобретателю РФ Е.И. Глинкину за просмотр учебного пособия и сделанные предложения и замечания по его содержанию.

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,

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

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: $i_A + i_B + i_C = 0$.

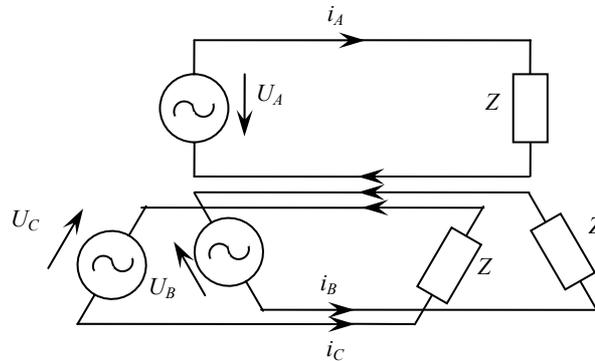


Рис. 1

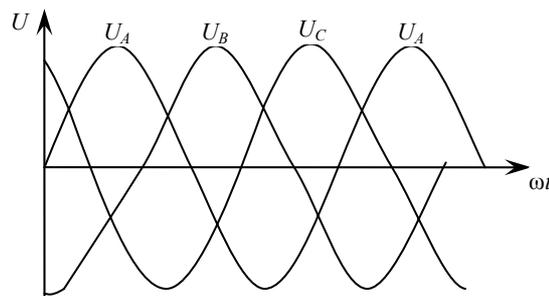


Рис. 2

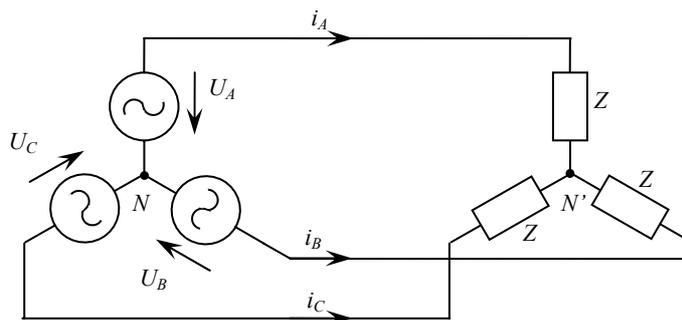


Рис. 3

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 — $x,$

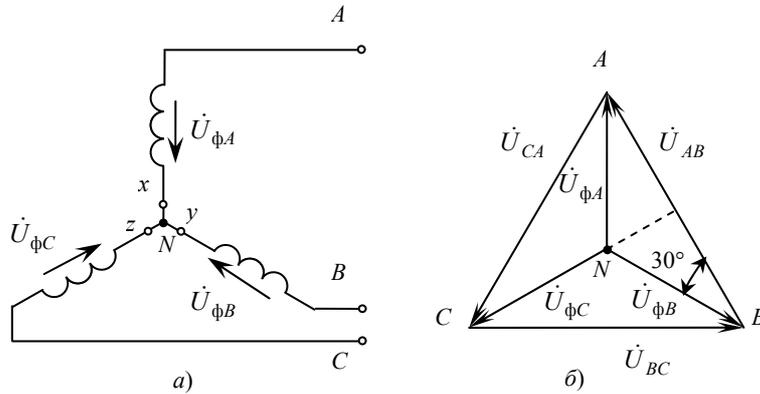


Рис. 4

y, z (рис. 4, *a*). Начала обмоток 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, *a*) $U_{\phi A}, U_{\phi B}, U_{\phi C}$ – 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:

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}.$$

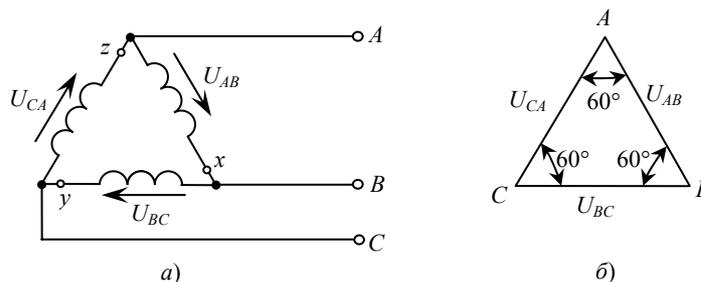


Рис. 5

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, *a*).

Топографическая диаграмма напряжений приведена на рис. 5, *a*. 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 ТРЁХФАЗНОЙ 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.

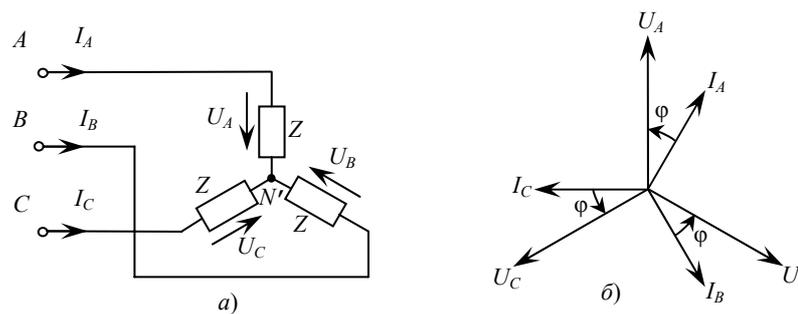


Рис. 6

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 А 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

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

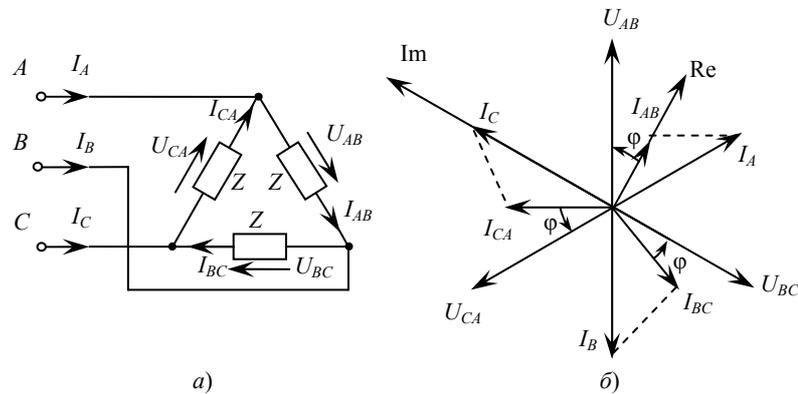


Рис. 7

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:

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

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 этом амплитуды периоди-

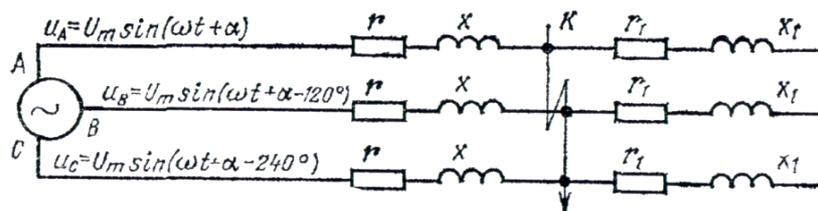


Рис. 8

ческой 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 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.

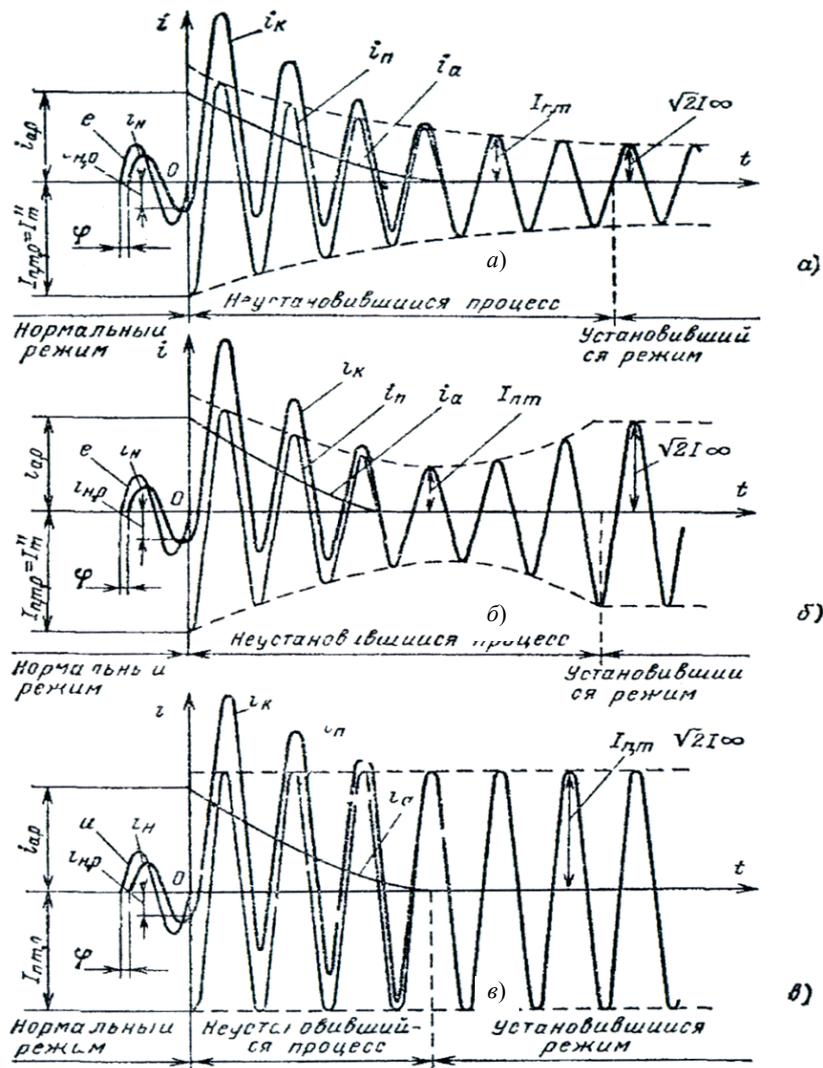


Рис. 9

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.

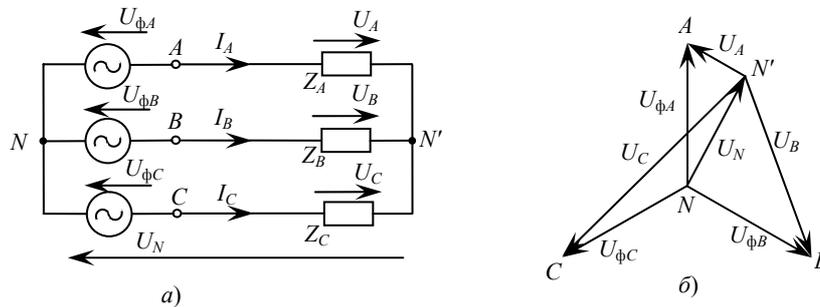


Рис. 10

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, *a* 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).

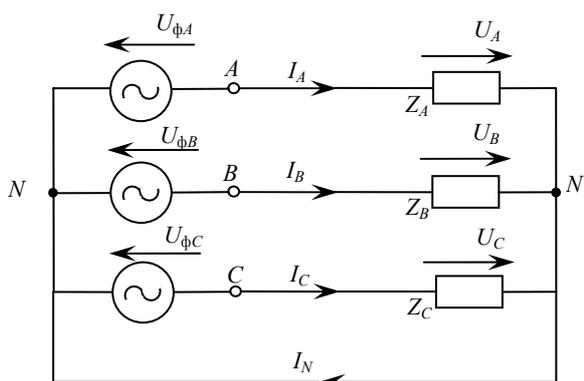


Рис. 11

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

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

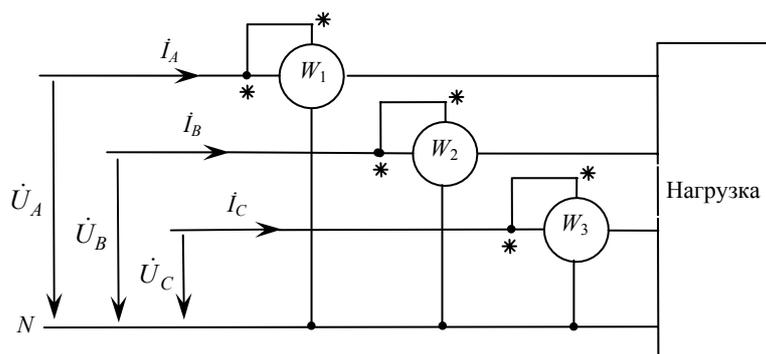


Рис. 12

При выводе формулы (6) не делалось никаких предположений о симметрии цепи; следовательно, данный метод

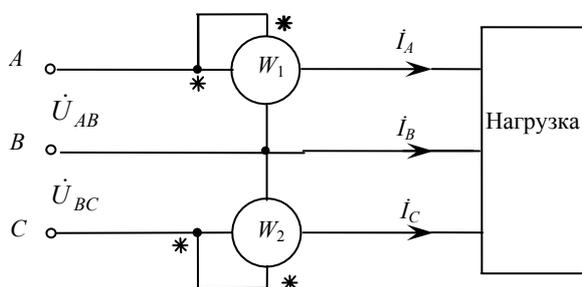


Рис. 13

измерения двумя ваттметрами применим как в случае симметричной, так и в случае несимметричной трёхфазной системы.

Показания ваттметров следующие:

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

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

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 $\sqrt{3}$:

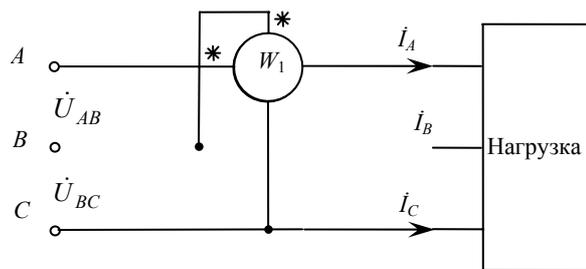


Рис. 14

$$Q = \sqrt{3}P_W = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi, \quad \text{где } \varphi = \arctg \frac{X}{R}.$$

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.

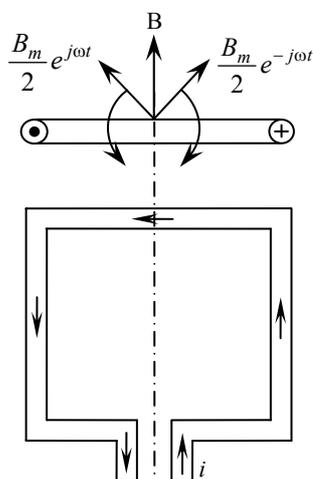


Рис. 15

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

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

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

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

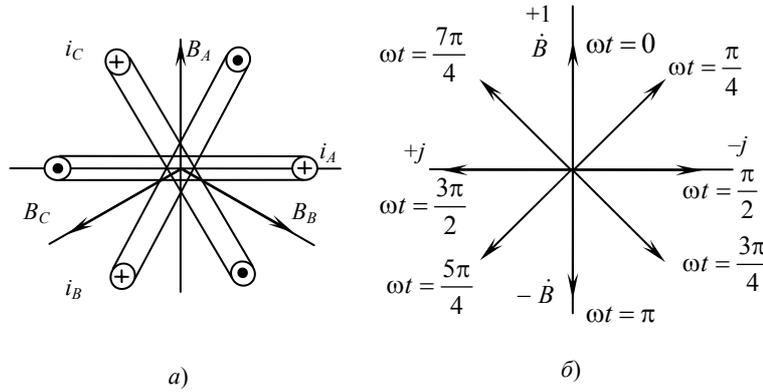


Рис. 16

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:

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

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° .

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

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

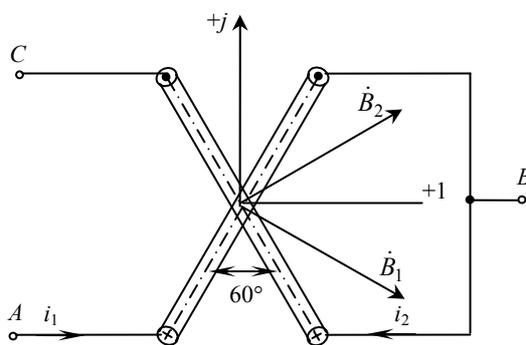


Рис. 17

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 индуцируются 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

$$u_{3A} = u_{3B} = u_{3C} = 0.$$

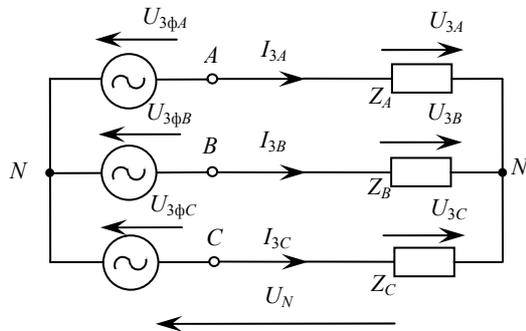


Рис. 18

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

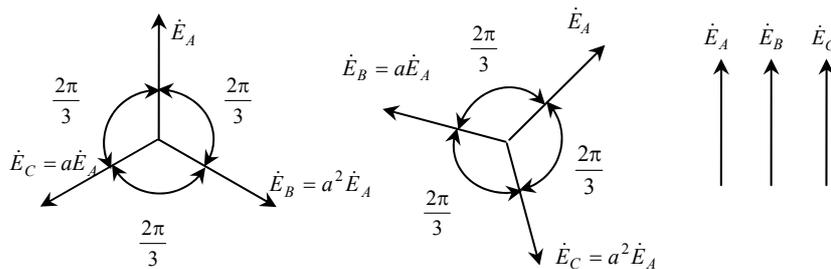


Рис. 19

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

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

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

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

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

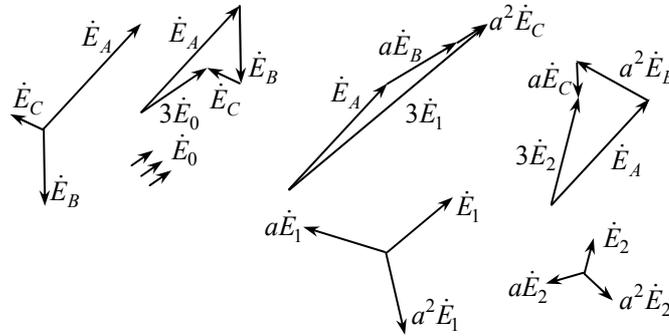


Рис. 20

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.

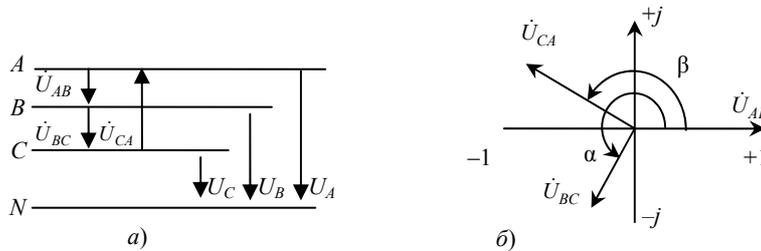


Рис. 21

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

$$U_{AB2} = \frac{1}{3}(U_{AB} + a^2U_{BC}e^{j\alpha} + aU_{CA}e^{j\beta}), \quad (13)$$

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

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

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

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

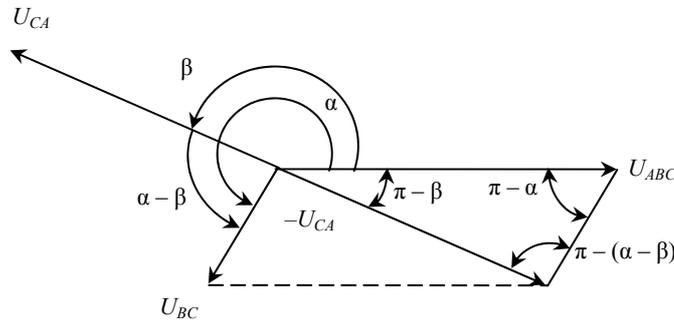


Рис. 22

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.

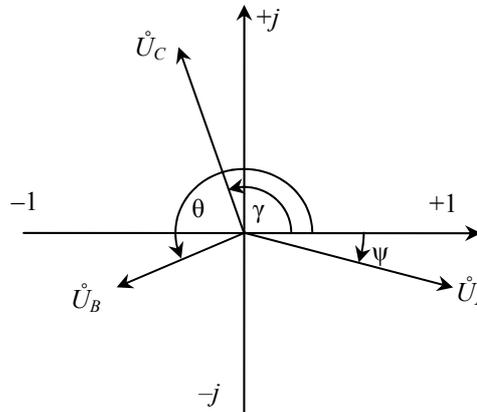


Рис. 23

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:

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

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. $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\pi$, из (28) получим

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

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

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

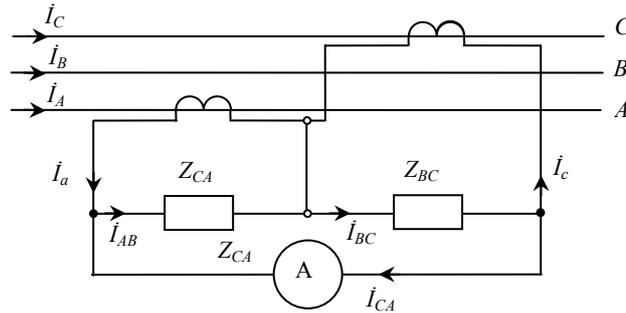


Рис. 24

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.

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

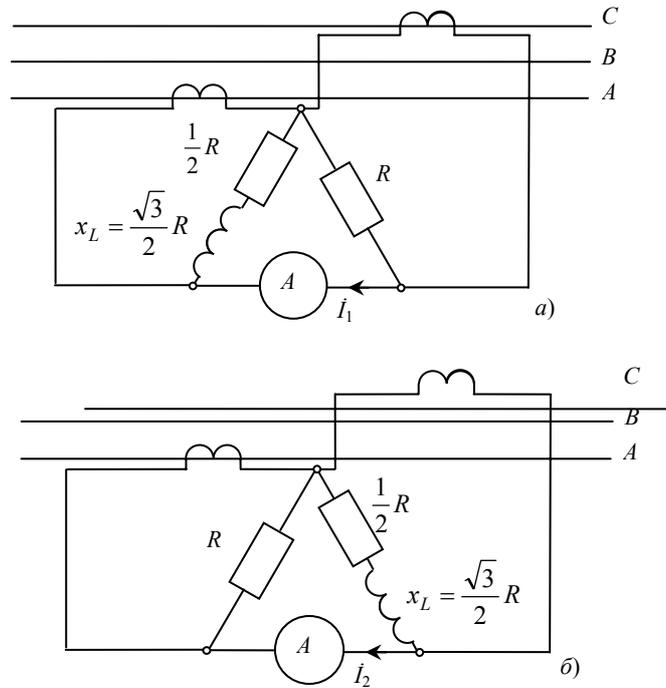


Рис. 25

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.

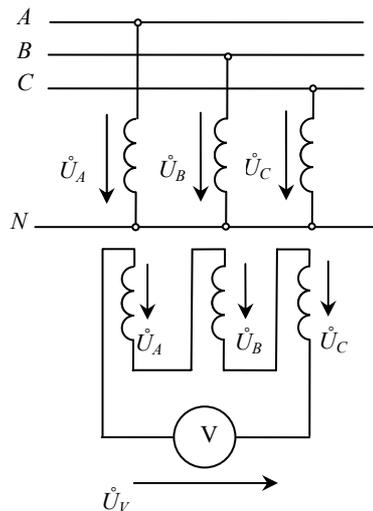


Рис. 26

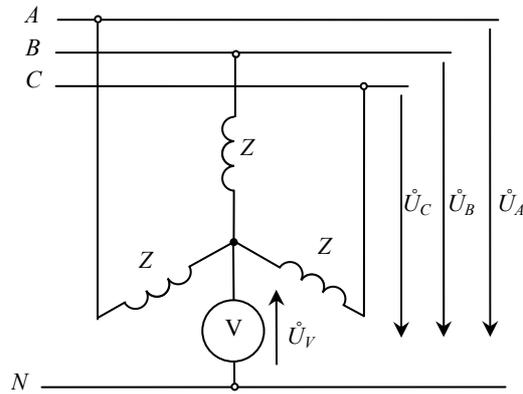


Рис. 27

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.

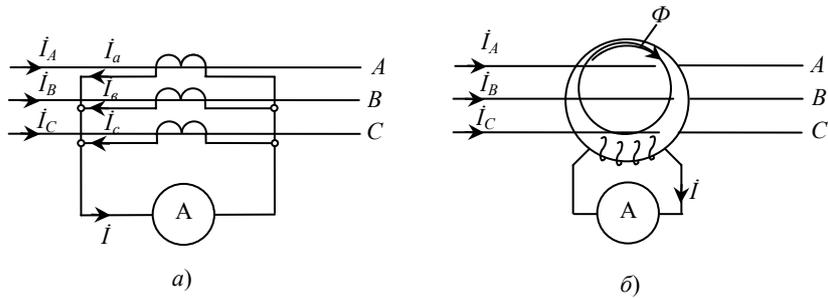


рис.28

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:

$$\dot{i}_{kA}^{(2)} = \dot{i}_{kA1}^{(2)} + \dot{i}_{kA2}^{(2)} = 0,$$

откуда

$$\dot{i}_{kA1}^{(2)} = -\dot{i}_{kA2}^{(2)}. \quad (33)$$

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

$$\dot{U}_{kA1}^{(2)} = \dot{U}_{kA2}^{(2)}. \quad (34)$$

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

$$\dot{E}_A - \dot{i}_{kA1}^{(2)} jx_{1,\Sigma} = -\dot{i}_{kA2}^{(2)} jx_{2,\Sigma},$$

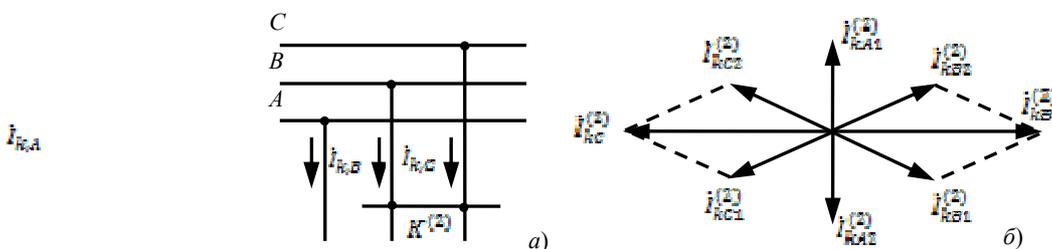


Рис. 29

заменяв в котором $-\dot{i}_{kA2}^{(2)}$ на $\dot{i}_{kA1}^{(2)}$, согласно (33) получим расчётное выражение для определения тока при двухфазном коротком замыкании:

$$\dot{i}_{kA1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma})}. \quad (35)$$

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

$$i_{kA1}^{(2)} = \frac{E_A}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}}. \quad (36)$$

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

$$i_{kB}^{(2)} = a^2 i_{kA1}^{(2)} + a i_{kA2}^{(2)} = (a^2 - a) i_{kA1}^{(2)} = -j\sqrt{3} i_{kA1}^{(2)}; \quad (37)$$

$$i_{kC}^{(2)} = (a - a^2) i_{kA1}^{(2)} = j\sqrt{3} i_{kA1}^{(2)}. \quad (38)$$

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 $i_{k0}^{(2)} = 0$ на основании $\dot{U}_{k0} = 0 - i_{k0} jx_{0,\Sigma} = 0$ 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 $\dot{U}_{kA1}^{(2)}$ и $\dot{U}_{kA2}^{(2)}$ можно определить:

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

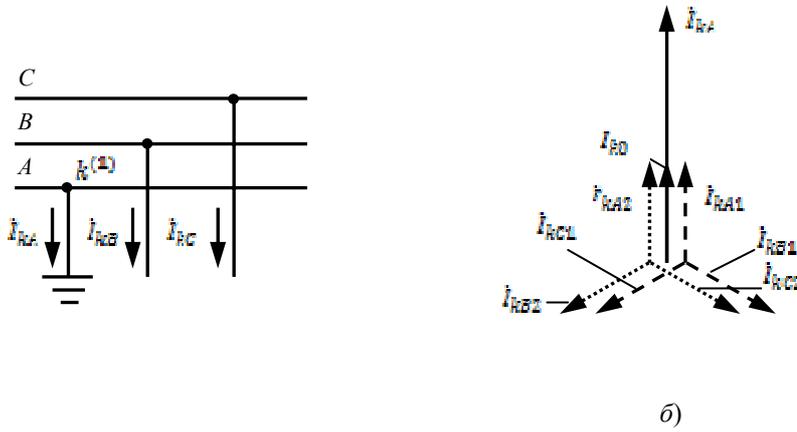


Рис. 30

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

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

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

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

и далее

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

откуда

$$\dot{i}_{kA1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma})}. \quad (45)$$

Абсолютное значение полного тока короткого замыкания равно

$$\dot{I}_k^{(1)} = 3\dot{i}_{kA1}^{(1)} = \frac{3E}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma}}, \quad (46)$$

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 изменяется 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

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

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 про изводится поворотом векторов прямой последовательности на угол $360^\circ - 30^\circ \cdot N$, векторов обратной последовательности на угол $-(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$. При трансформации от треугольника к звезде знаки углов поворота меняются на обратные соответственно: $-(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$ 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, ε), 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, δ) поворачивается на угол -30° , токов обратной последовательности (рис. 31, ε) – 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 $\omega_Y / \omega_\Delta = 1 / \sqrt{3}$.

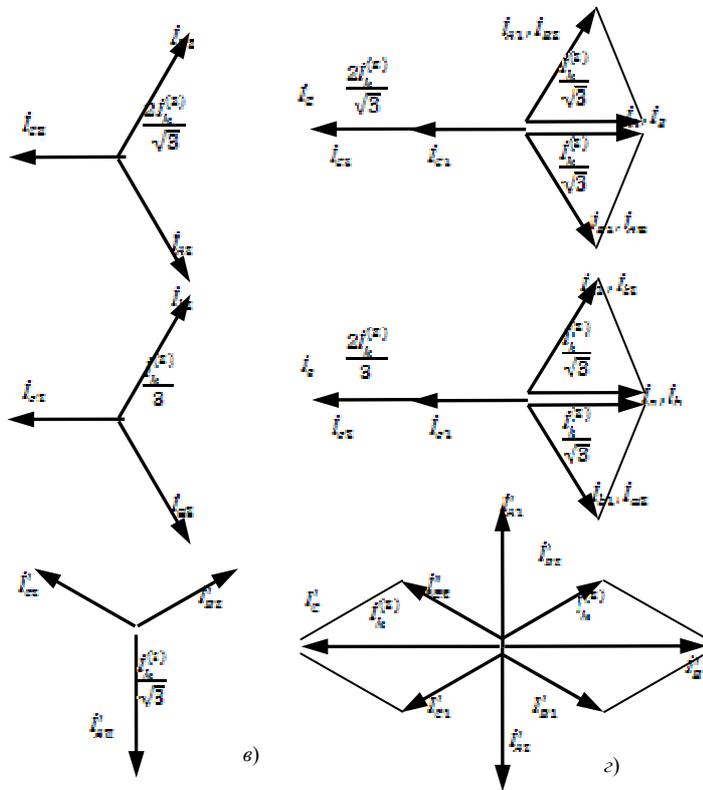
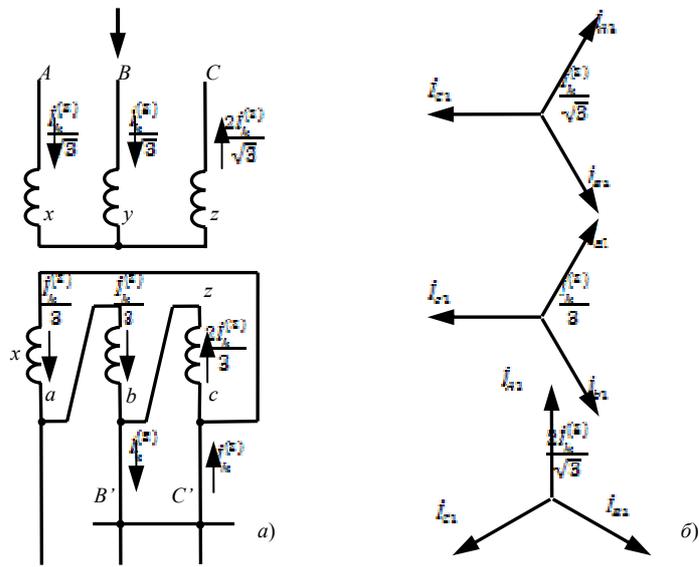


Рис. 31

В результате трансформации в фазах звезды будут протекать токи (рис. 31, з): 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

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

где $I_{n,0}^{(3)}$ $I_{n,0}^{(2)}$ – 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, з) 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 – з) трансформируются в фазы треугольника без изменения направления, уменьшаясь в $\sqrt{3}$ раз (см. предыдущий случай короткого замыкания).

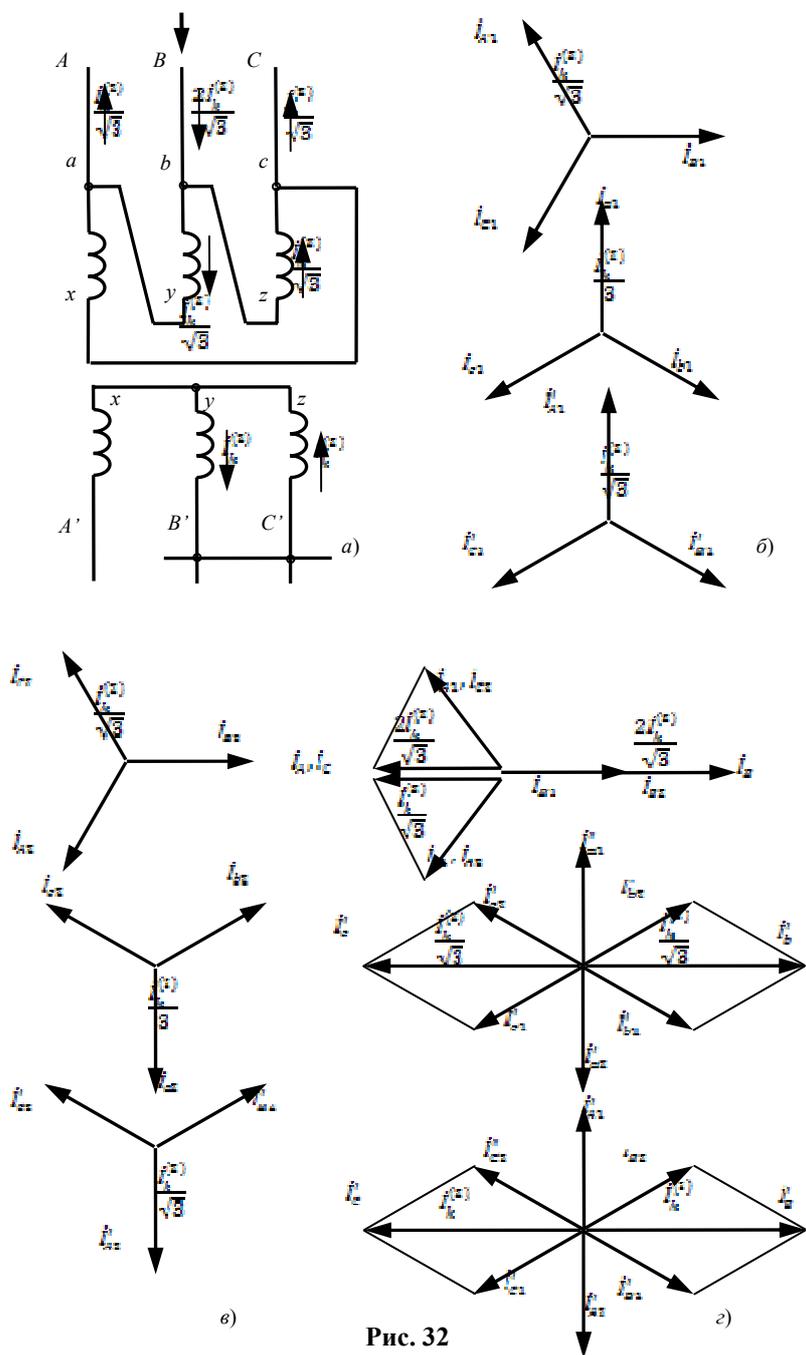


Рис. 32

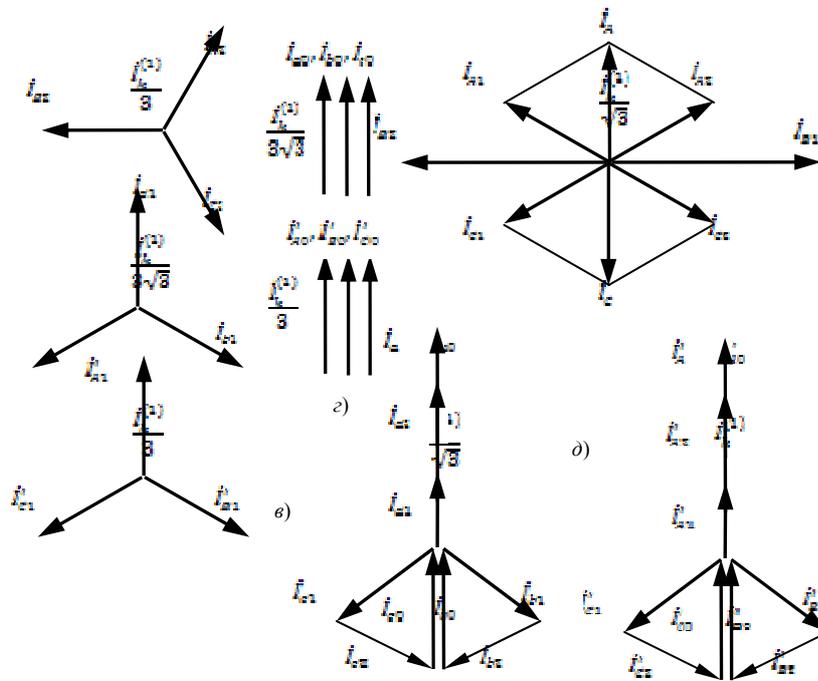


Рис. 33

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, A и C , 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).

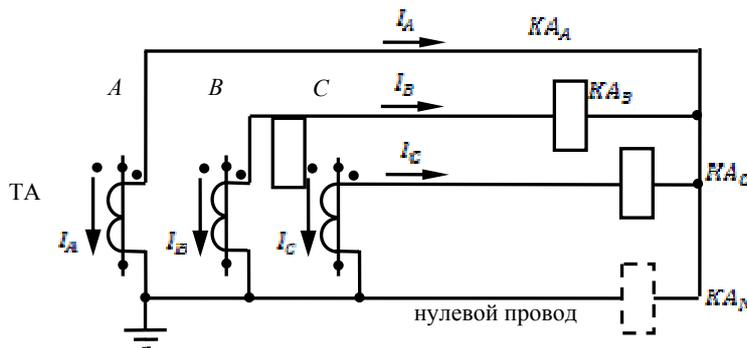


Рис. 34

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

Трёхфазное короткое замыкание

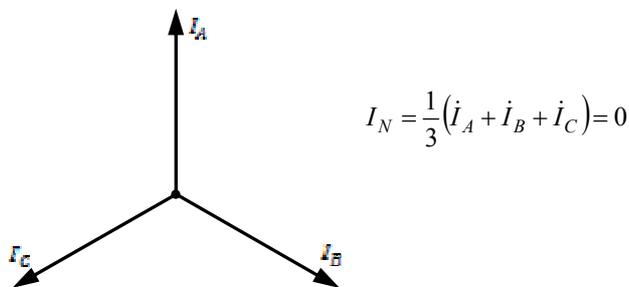


Рис. 35

Двухфазное короткое замыкание

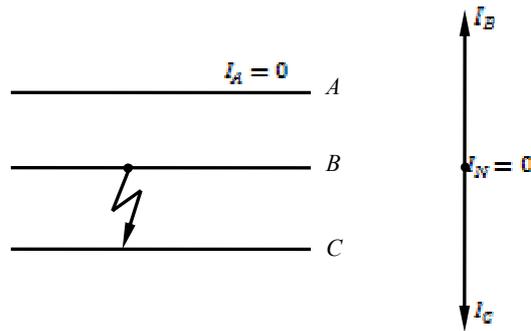


Рис. 36

Однофазное короткое замыкание

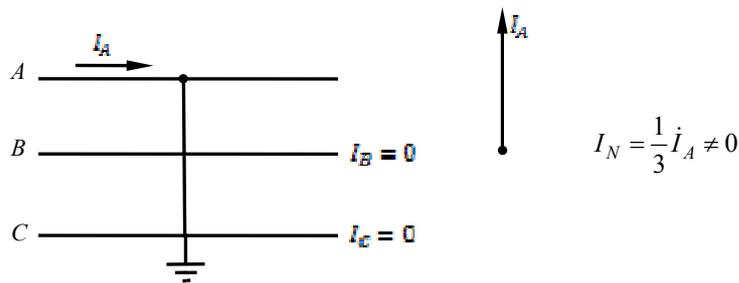


Рис. 37

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

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: $k_{cx} = 1$.

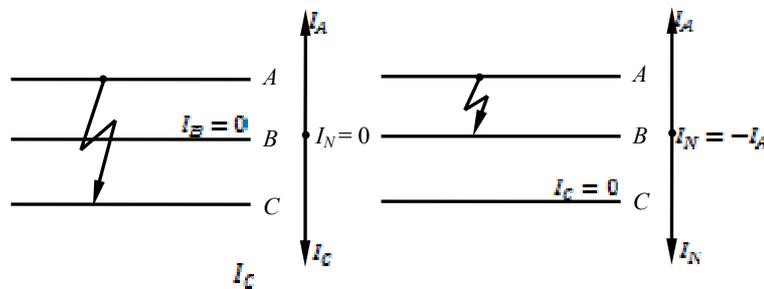


Рис. 38

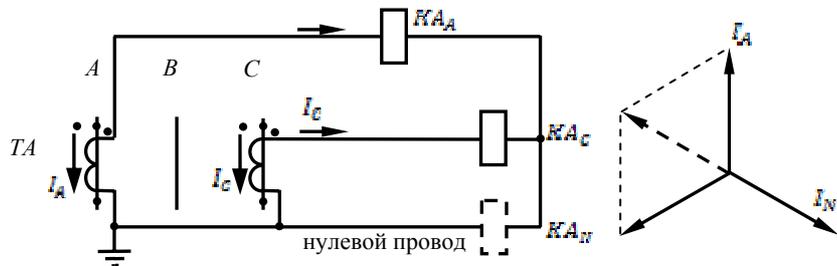


Рис. 39

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).

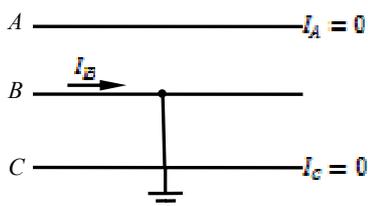


Рис. 40

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

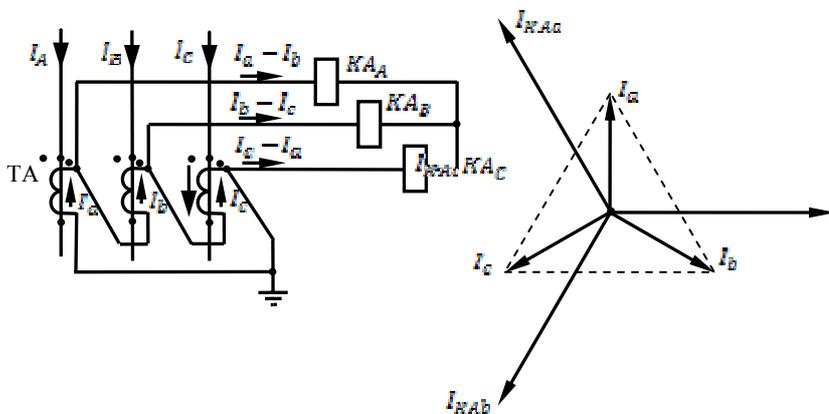


Рис. 41

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

$$k_{\text{сх}}^3 = \frac{I_{\text{р}}}{I_{\text{ф}}} = \frac{\sqrt{3}I_{\text{ф}}}{I_{\text{ф}}} = \sqrt{3}.$$

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)

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

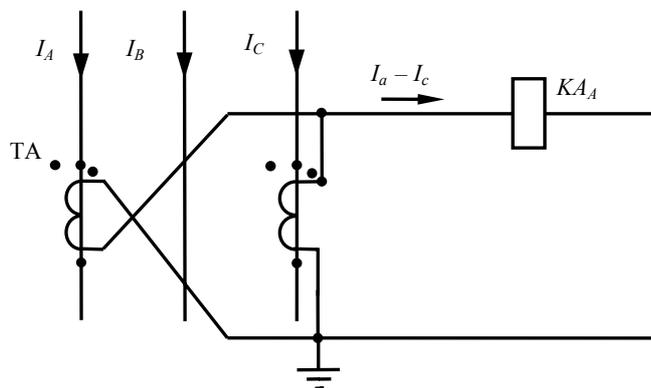


Рис. 42

Двухфазное короткое замыкание AC

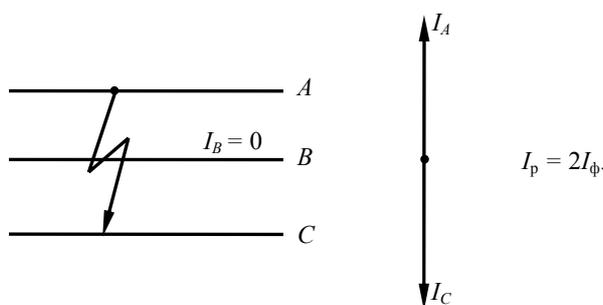


Рис. 43

Двухфазное короткое замыкание AB или BC

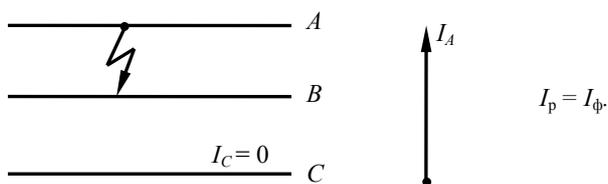


Рис. 44

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 $Y/\Delta - 11$ группа.

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

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 $I_N = 0$.

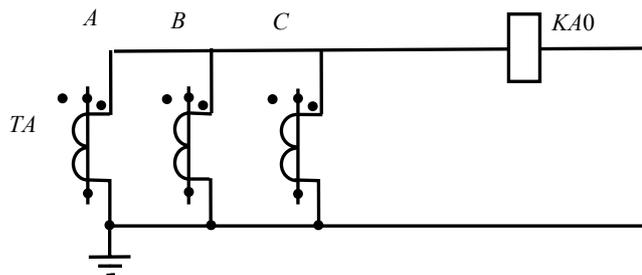


Рис. 45

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 $I_{нам}$, вызывая недопустимый нагрев трансформатора.

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

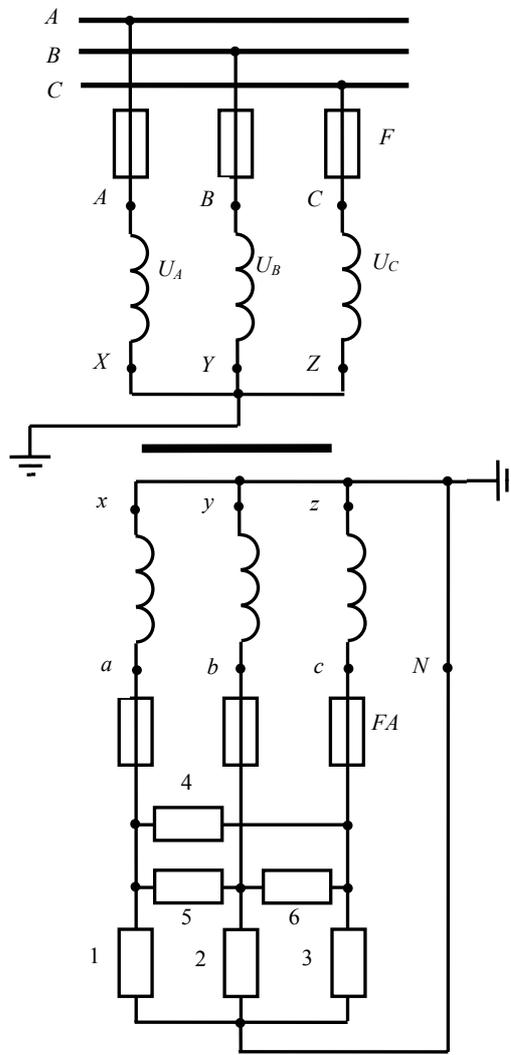


Рис. 46

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).

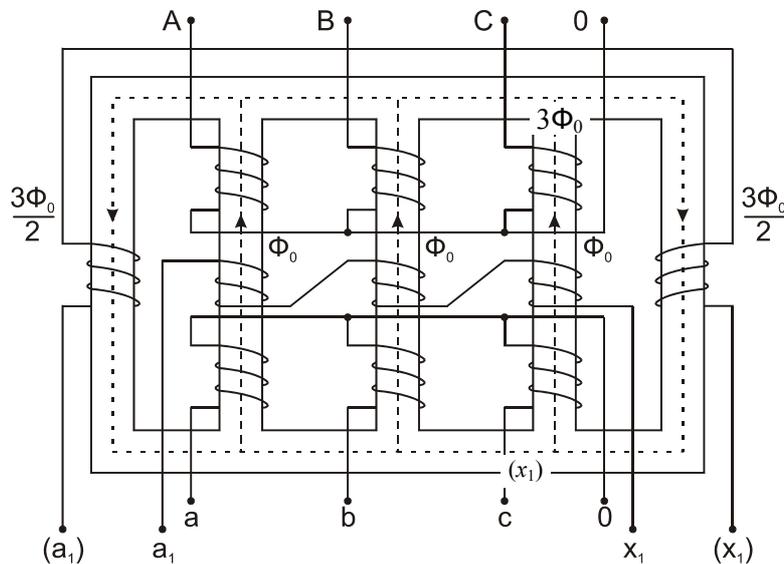


Рис. 47

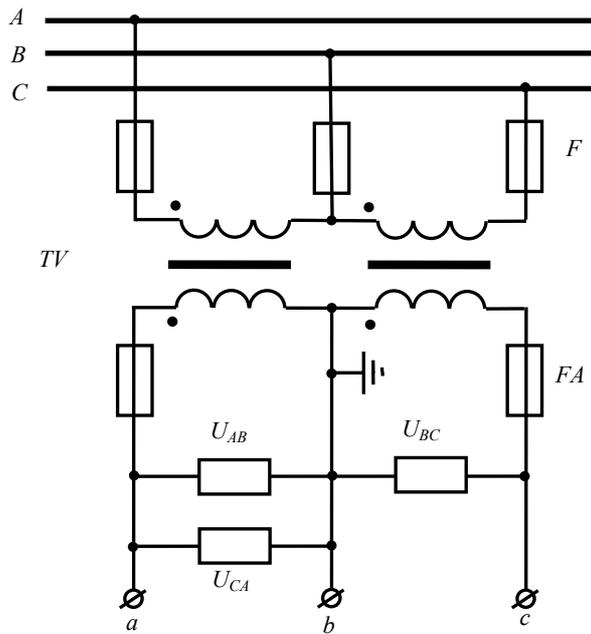


Рис. 48

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

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

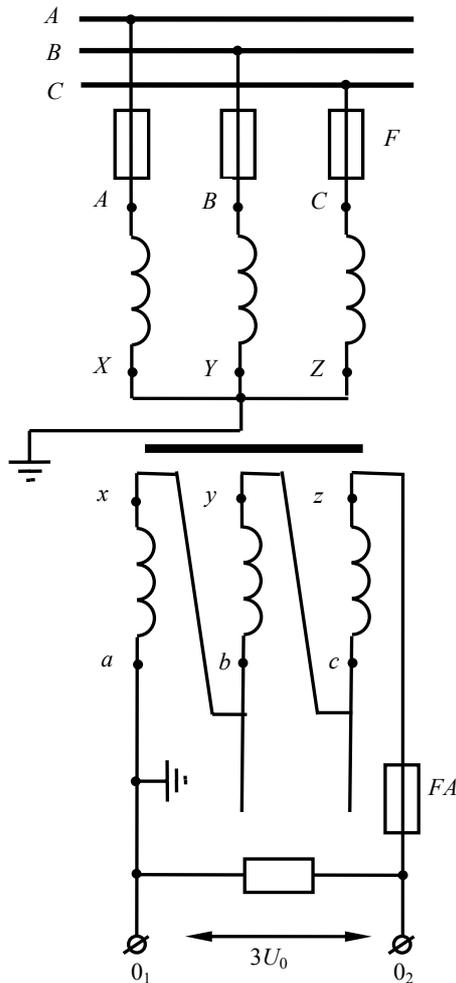


Рис. 49

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.

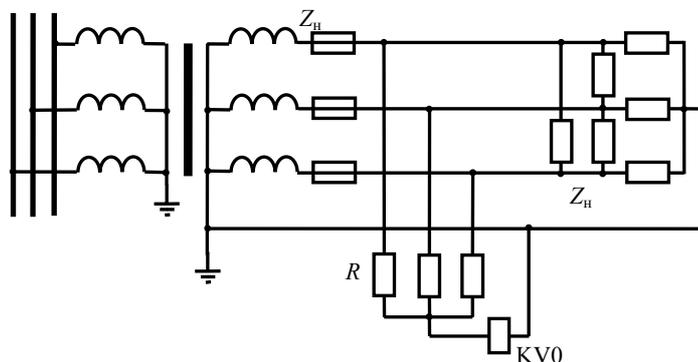


Рис. 50

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.

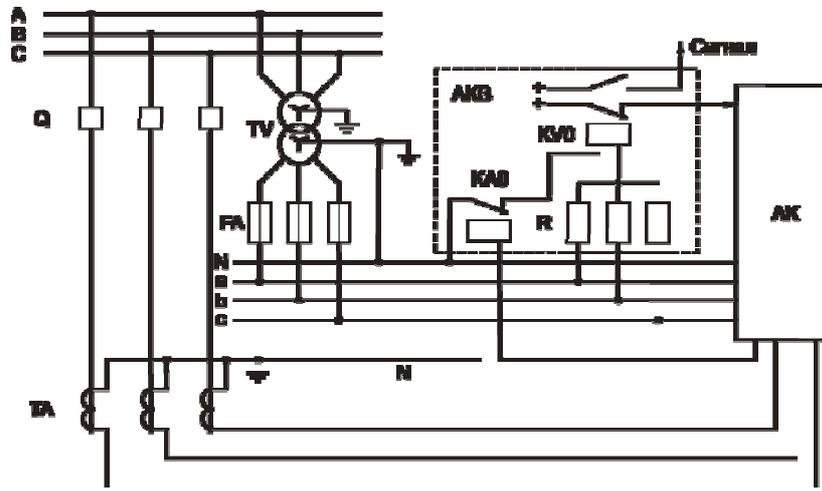


Рис. 51

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 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; v – 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; v – 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}

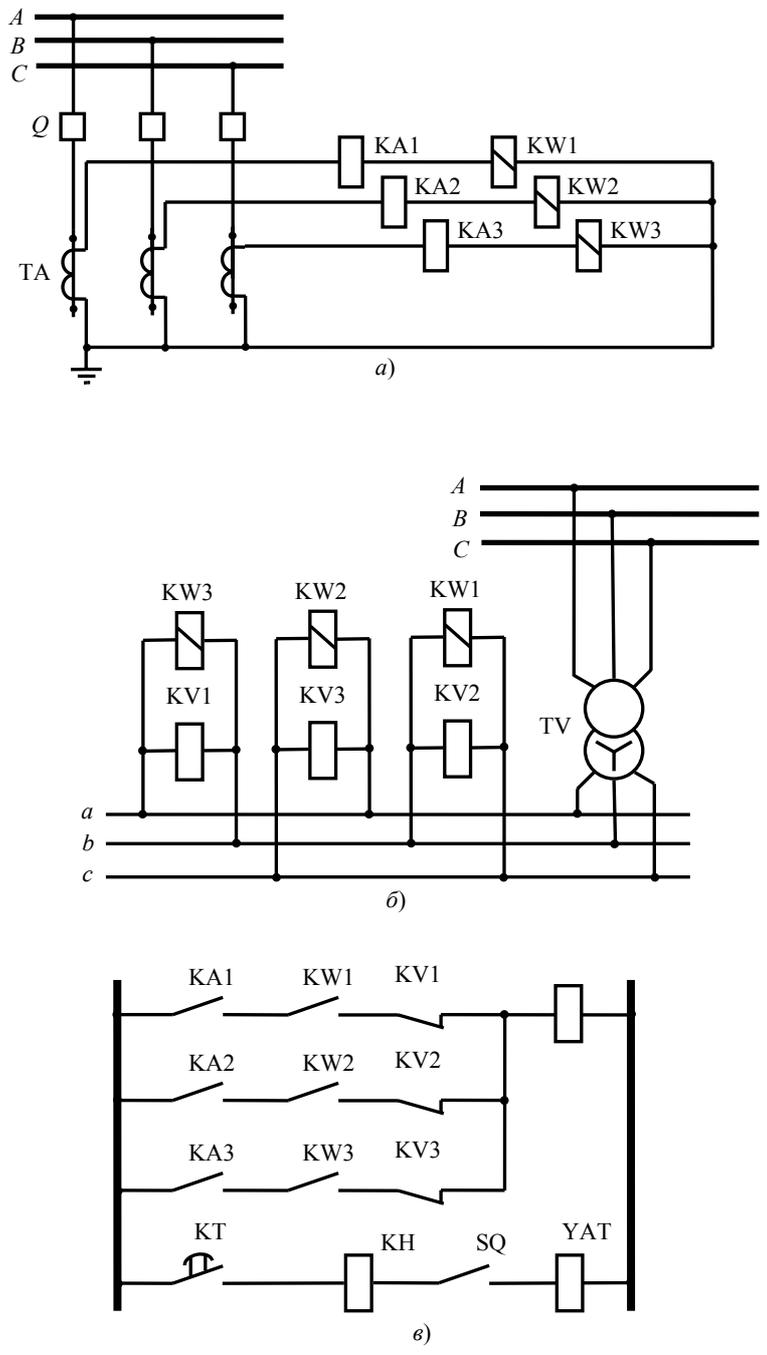


Рис. 52

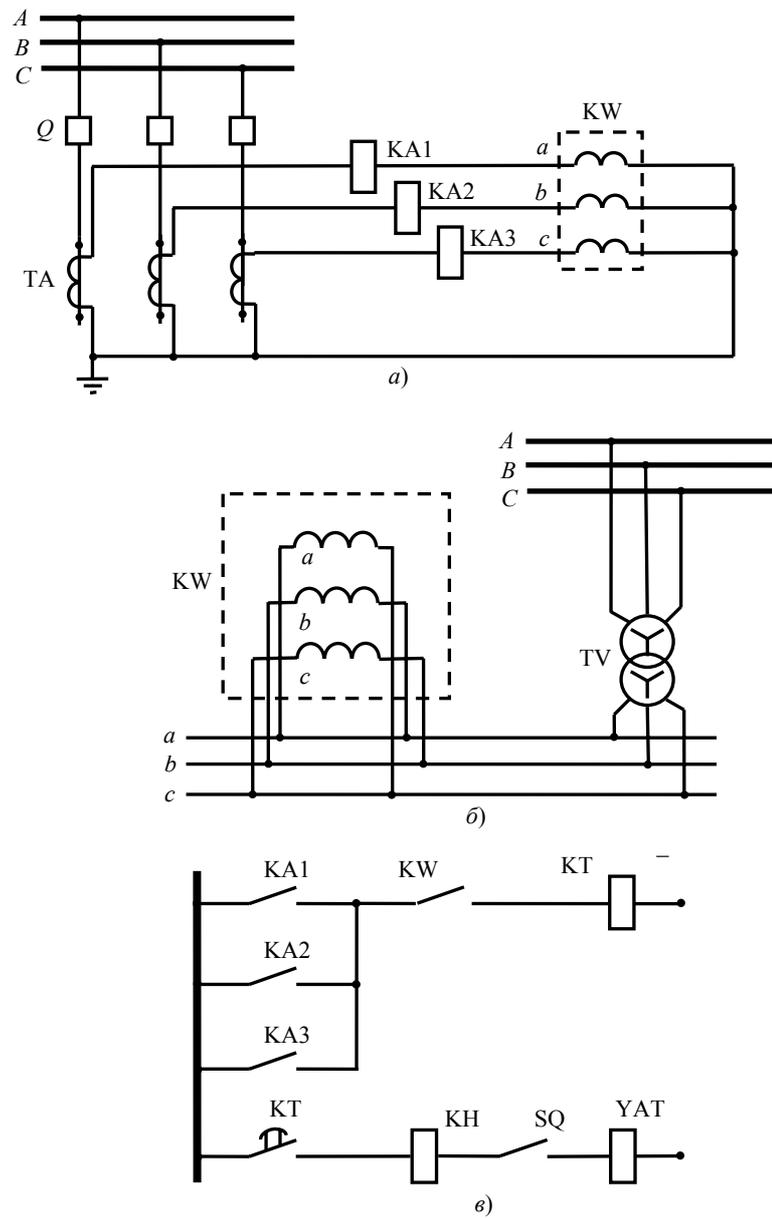


Рис. 53

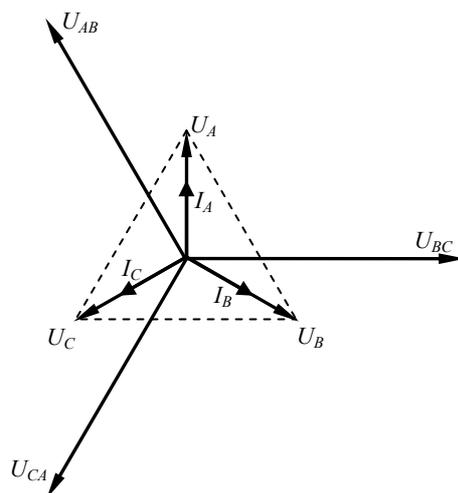


Рис. 54

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).

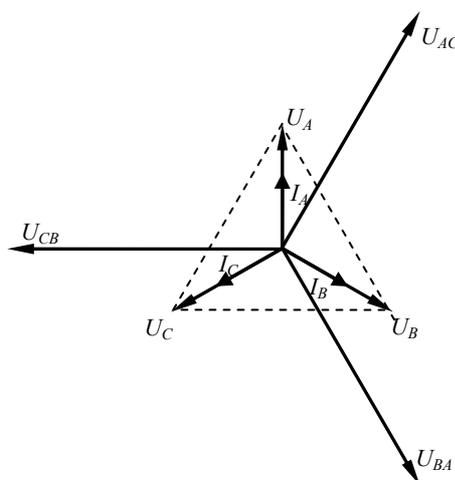


Рис. 55

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

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

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

$$M_3 = kU_p I_p \cos(\varphi_p + 30^\circ);$$

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

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

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_{ε} 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 $\alpha = 45^\circ$.

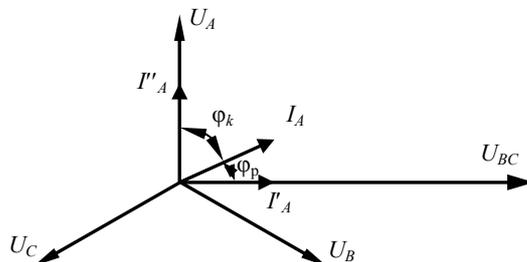


Рис. 56

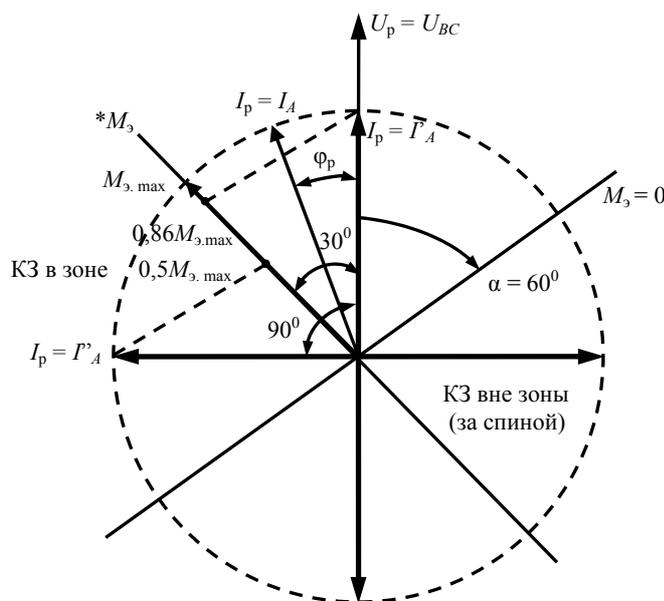


Рис. 57

Выводы по схеме:

1. Знак момента реле при всех видах короткого замыкания в зоне положителен, а вне зоны – отрицателен.
2. Величина электромагнитного момента M_{ε} 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 (а – токовые цепи; б – цепи оперативного тока).

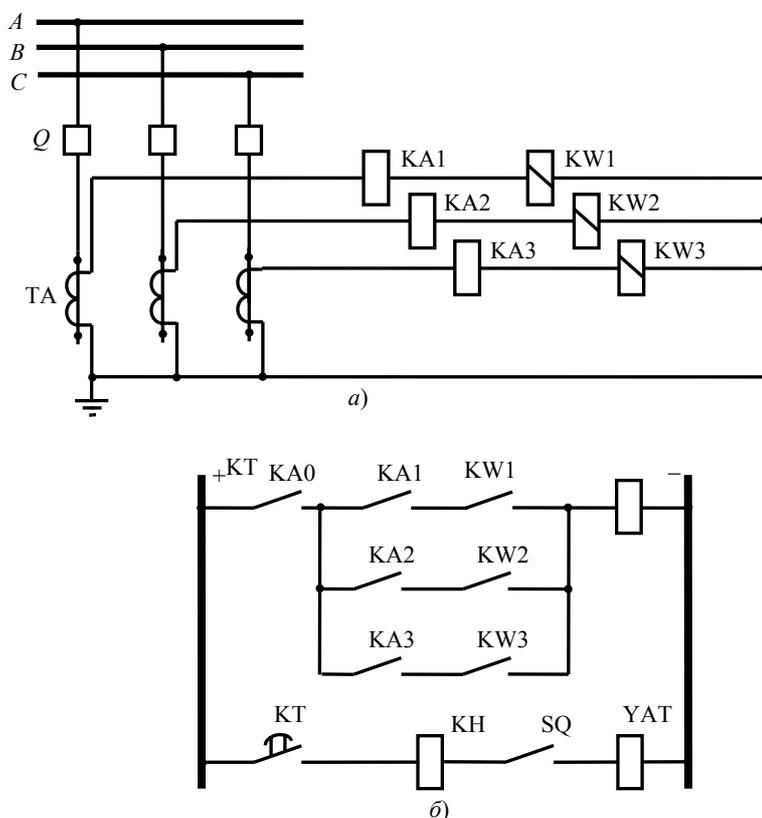


Рис. 58

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).

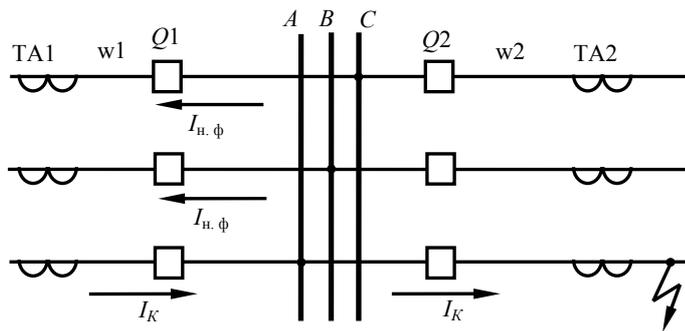


Рис. 59

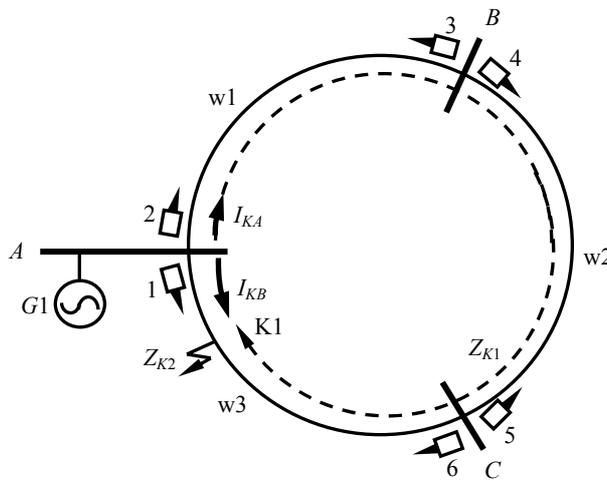


Рис. 60

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 броневой 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.

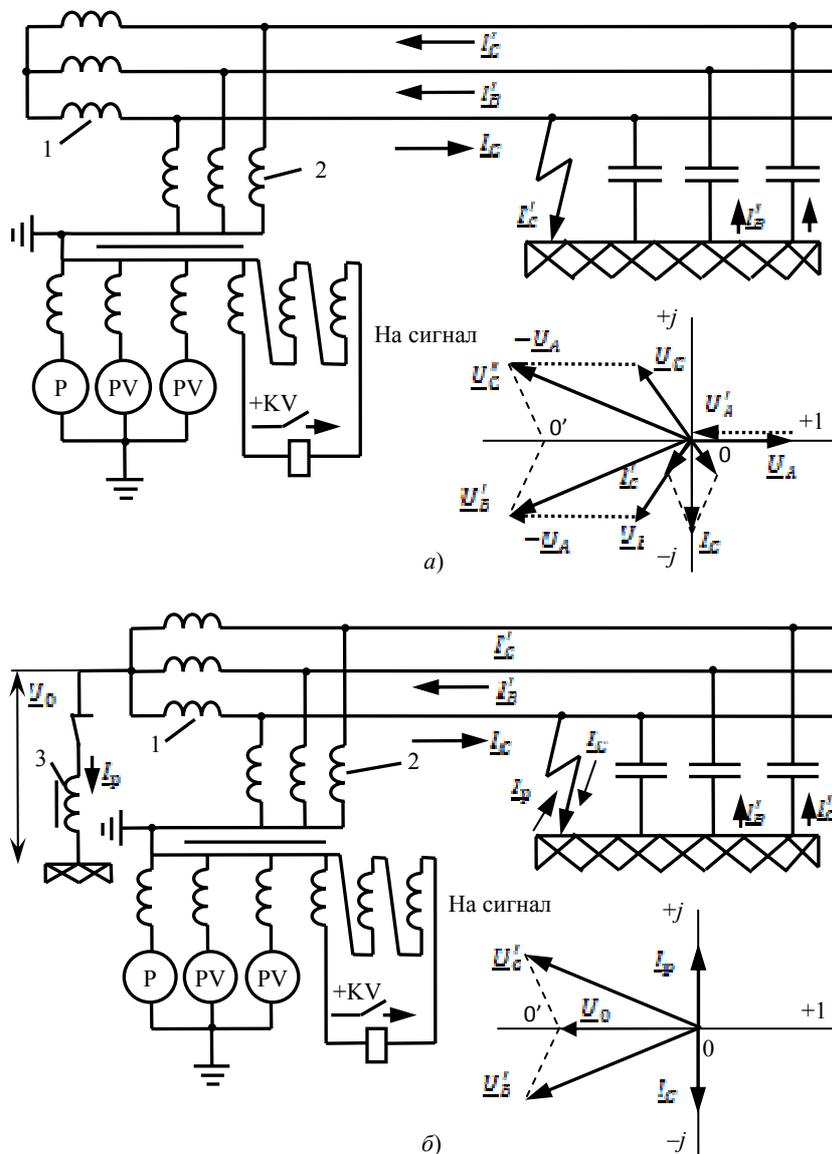


Рис. 61

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

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

где L_p и L_T – 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 $0,7U_\phi$.

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 $2,7U_\phi$.

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 $U_{нс}$.

Степень несимметрии $u_0 = (U_{нс} / U_\phi) \cdot 100$ 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 $0,15U_\phi$. 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. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТРЁХФАЗНЫМ ЦЕПЯМ

Лабораторная работа 1

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ОДНОФАЗНЫХ И ТРЁХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: изучение методов измерения мощности электрического тока и особенностей измерения мощности в трёхфазных системах.

Оборудование

1. Источник питания постоянного тока 0 ... 50 В.
2. Источник питания переменного тока трёхфазный 36 В.
3. Реостат 200 Ом.
4. Конденсатор неполярный ёмкостью 50 мкФ.
5. Лампа накаливания 36 В 3 шт.

Методические указания

Измерение мощности производят обычно с помощью ваттметра электродинамической системы, в котором имеются две катушки – неподвижная и подвижная.

Подвижная катушка, выполненная из очень тонкого провода, имеет практически чисто активное сопротивление и называется параллельной обмоткой. Её включают параллельно участку цепи, подобно стрелке (указателем), она может вращаться в неподвижной катушкой.

Неподвижная катушка, выполненная из довольно толстого провода, имеет очень малое активное сопротивление и называется последовательной обмоткой. Её включают в цепь последовательно подобно амперметру.

На электрической схеме ваттметр изображают, как показано на рис. 62. Одна пара концов (на рисунке расположена горизонтально) принадлежит последовательной обмотке, другая пара концов (на рисунке расположена вертикально) – параллельной.

На рисунке обычно принято ставить у начала обмоток вращающий момент ваттметра, а на противоположной части произведения комплексного напряжения U_{ab} на параллельной обмотке ваттметра на сопряжённый комплекс тока I^* , втекающего в конец последовательной (токовой) обмотки ваттметра и снабжённой точкой:

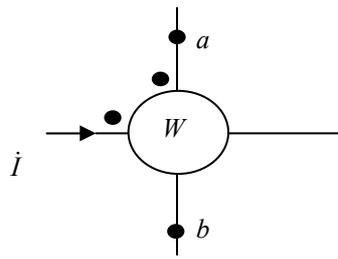


Рис. 62

$$P = U_{ab} I \cos \varphi.$$

Напряжение на параллельной обмотке берут равным разности потенциалов между её концом, имеющим точку (точка a), и её концом, не имеющим точки (точка b). Предполагается, что ток I втекает в конец последовательной обмотки, у которого поставлена точка.

Цена деления ваттметра определяется как частное от деления произведения номинального напряжения на номинальный ток (указывают на лицевой стороне прибора) на число делений шкалы. Например, номинальное напряжение ваттметра 120 В, номинальный ток 5 А, шкала имеет 150 делений. Определить цену деления ваттметра. Цена деления ваттметра равна $120 \cdot 5 / 150 = 4$ Вт/дел.

Для измерения активной мощности трёхфазной системы в общем случае (неравномерная нагрузка и наличие нулевого провода) необходимо включить три ваттметра (рис. 63). Активная мощность системы равна сумме показаний трёх ваттметров. Если нулевой провод отсутствует, то измерение мощности производят двумя ваттметрами (рис. 64). Сумма показаний двух ваттметров при этом определяет активную мощность всей системы независимо от того, звездой или треугольником соединена нагрузка (треугольник нагрузки всегда может быть преобразован в эквивалентную звезду). При равномерной нагрузке фаз достаточно измерить мощность одной фазы и результат утроить.

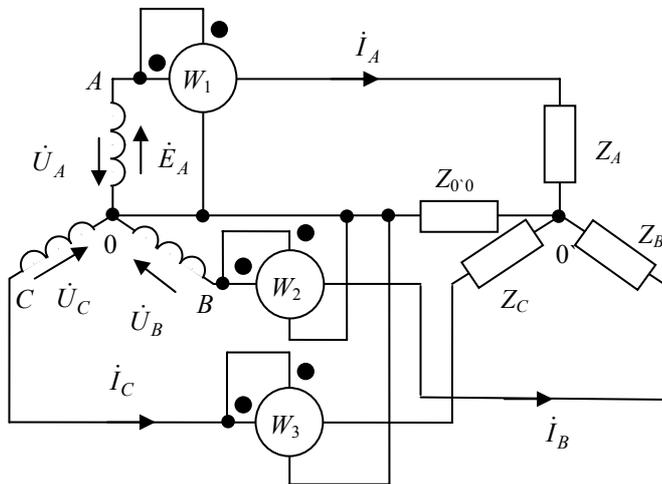


Рис. 63

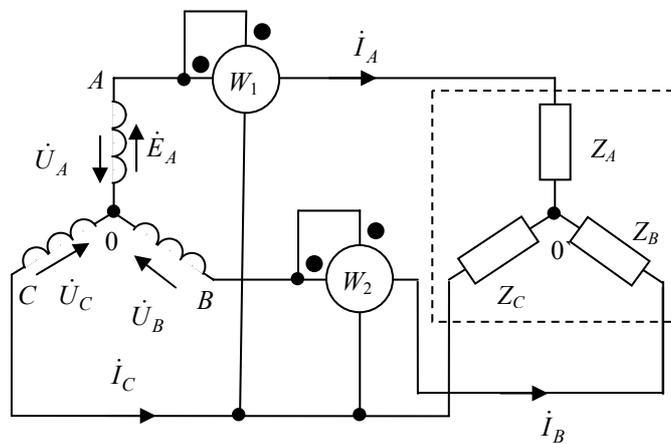


Рис. 64

Порядок выполнения работы

1. Собрать установку согласно схеме рис. 65. В качестве E использовать источник питания постоянного тока 0 ... 50 В. Сопротивление реостата R выставить равным 160 Ом, напряжение источника выставить равным 36 В. Показания вольтметра V , амперметра A и ваттметра W внести в табл. 2. Вычислить величину полной мощности $S = UI$ и внести в табл. 2.

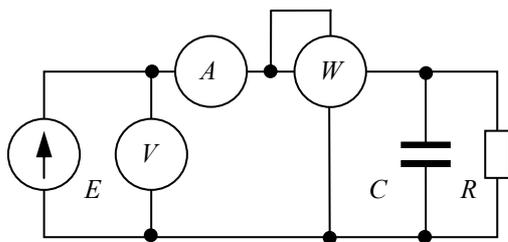


Рис. 65

2. Отключить источник постоянного тока, подключить одну фазу трехфазного источника (использовать фазный и нулевой выводы). Повторить измерения и вычисления, внести полученные данные в табл. 2.

Таблица 2

Род тока	U , В	I , А	P , Вт	S , ВА	C , мкФ	R , Ом
Постоянный						
Переменный						

3. Собрать установку согласно схеме рис. 63. Использовать трёхфазный источник питания. В качестве нагрузки Z_A, Z_B, Z_C использовать лампы накаливания, соединённые звездой (сопротивление нулевого провода $Z_{00} = 0$). Показания ваттметров W_1, W_2, W_3 внести в табл. 3. Вычислить величину суммарной потребляемой мощности $P = P_1 + P_2 + P_3$ и внести в табл. 3.

Таблица 3

P_1 , Вт	P_2 , Вт	P_3 , Вт	P , Вт

4. Собрать установку согласно схеме рис. 64. Использовать трёхфазный источник питания. В качестве нагрузки Z_A, Z_B, Z_C использовать лампы накаливания, соединённые звездой без нулевого провода. Показания ваттметров W_1, W_2 внести в табл. 4. Вычислить величину суммарной потребляемой мощности $P = P_1 + P_2$ и внести в табл. 3.

P_1 , Вт	P_2 , Вт	P , Вт

5. Сравнить значения суммарной потребляемой мощности, полученной в опытах п. 3 и п. 4.

Основные выводы по работе

1. Ваттметр – прибор, измеряющий активную мощность в электрической цепи.
2. В цепях постоянного тока активная мощность совпадает по величине с полной мощностью.
3. В цепях постоянного тока активная и полная мощности могут значительно отличаться. Отличия определяются характером нагрузки.
4. В трёхфазных четырёхпроводных цепях для измерения суммарной мощности используют три ваттметра.
5. В трёхфазных трёхпроводных цепях для измерения суммарной мощности используют два ваттметра.

Содержание отчёта

1. Название работы и её цель.
2. Краткое изложение основных теоретических положений.
3. Состав оборудования.
4. Заполненная таблица проведённых измерений.
5. Расчёт исследуемых величин.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие величины необходимо знать для определения мощности в электрической цепи?
2. Какими приборами измеряют активную мощность в цепи?
3. Какими приборами измеряют полную мощность в цепи?
4. Сколько ваттметров необходимо для измерения суммарной активной мощности в трёхфазных несимметричных четырёхпроводных цепях?
5. Сколько ваттметров необходимо для измерения суммарной активной мощности в трёхфазных симметричных четырёхпроводных цепях?
6. Сколько ваттметров необходимо для измерения суммарной активной мощности в трёхфазных трёхпроводных цепях?

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЁМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы: установить соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями в трёхфазной системе при соединении приёмников звездой при различной нагрузке фаз; определить влияние обрыва линейного провода и одной или двух фаз приёмника на его работу; построить векторные диаграммы напряжений и токов.

Оборудование

1. Трёхфазный источник с напряжением 36 В.
2. Вольтметр переменного тока 0 ... 50 В.
3. Амперметр переменного тока 0 ... 0,5 А.
4. Измерительный комплект К-505.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с измерительным комплектом К-505. Для измерений в трёхпроводных цепях трёхфазного тока схема комплекта имеет искусственный нуль. Поэтому с помощью вольтметра комплекта можно измерить только фазные напряжения.

Переносным вольтметром измерить линейные напряжения \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} , записав их как входные данные для расчётов. Со стенда списать значения r_H , r_B , r_C , L , C .

2. Собрать схему, приведённую на рис. 66, для измерения токов, напряжений, мощности, а также тока в нулевом проводе для случая симметричной активной нагрузки. Показания приборов записать в первую строчку табл. 5.

3. Отключить нулевой провод и показания приборов записать во вторую строчку табл. 5.

4. Установить несимметричную нагрузку фаз $r_A = r_B \neq r_C$ и показания приборов записать в третью строчку табл. 5.

5. Отключить нулевой провод и показания приборов записать в четвёртую строчку табл. 5.

6. Провести обрыв фазы A и показания записать в пятую строчку табл. 5.
7. Подключить амперметр A и оставить оборванной фазу A , произвести измерения. Показания приборов записать в шестую строчку табл. 5.
8. Собрать схему для неоднородной нагрузки без нулевого провода: фаза A – активная нагрузка, фаза B – индуктивная нагрузка, фаза C – ёмкостная нагрузка ($Z_{AB} = r_A + jX_L$; $Z_{BC} = -jX_C$; $Z_{CA} = r$). Произвести измерения и результаты записать в восьмую строчку табл. 5.

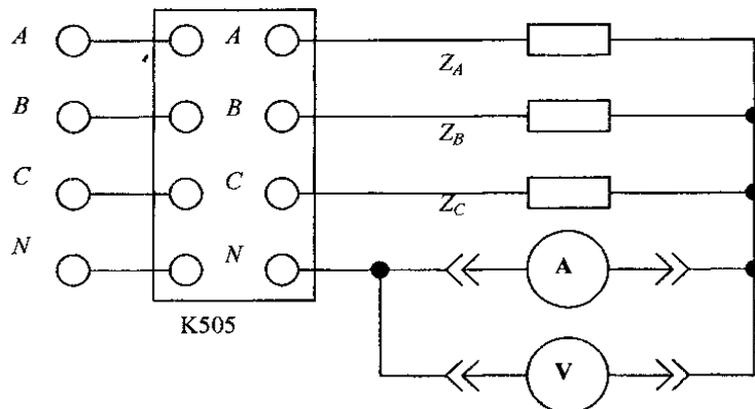
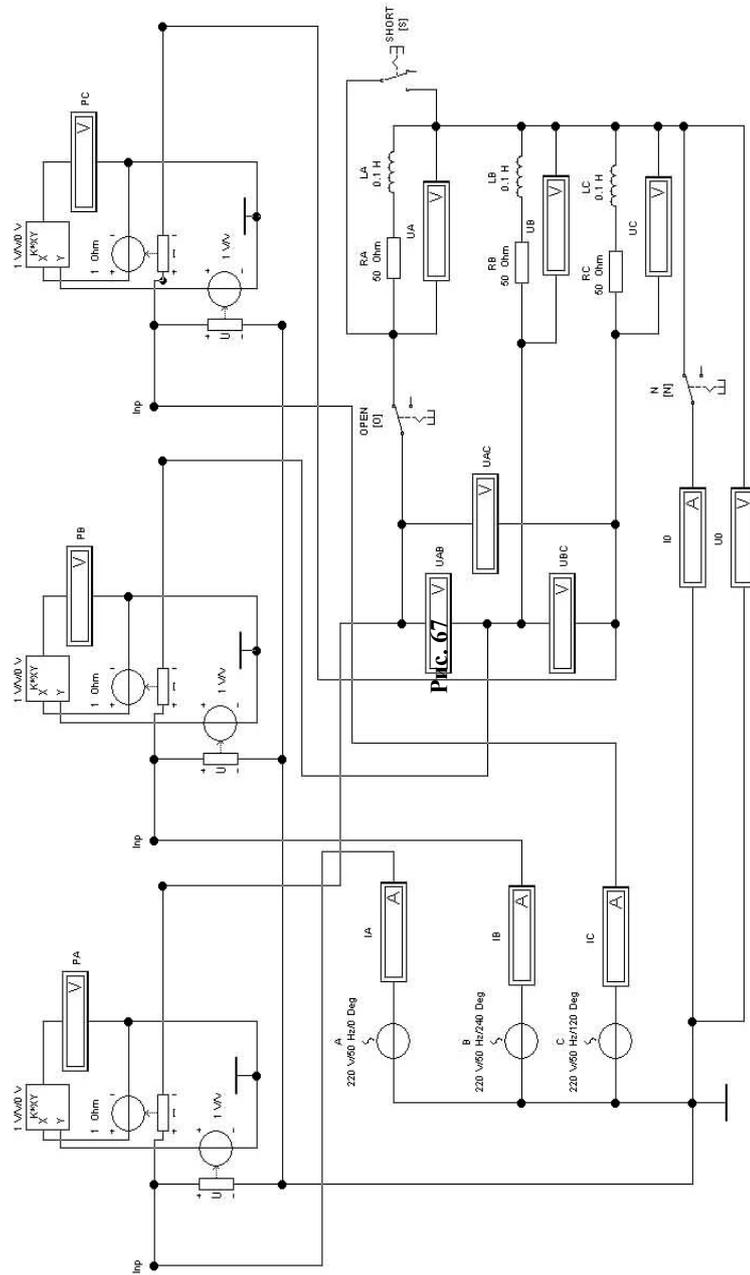


Рис. 66

9. Собрать схему для неоднородной нагрузки без нулевого провода, для этого в предыдущей схеме отключить переносной амперметр A . Произвести измерения и результаты записать в восьмую строку табл. 5.
10. По данным опыта 7 определить углы сдвига между током и напряжением в каждой фазе

$$\varphi = \arctg \frac{P}{I_{\phi} U_{\phi}} .$$

11. По данным всех опытов построить векторные диаграммы.
12. Запустить программу EWB.
13. Загрузить файл star_1.ewb для исследования трёхфазной цепи при соединении приёмников звездой. Схема цепи соответствует рис. 67. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда. Номинальные значения элементов и параметры измерительных приборов установлены заранее. Значения активной мощности в ваттах соответствуют показаниям приборов PA , PB , PC в вольтах.
14. Исследование цепи при симметричной нагрузке с нулевым проводом. Переключатели должны быть установлены в следующие положения: S_1, S_2 – «ВКЛ».
15. Включить питание. Через промежуток времени $t \geq 5$ с отключить питание. Снять показания приборов.
16. Заполнить повторно первую строку табл. 5.
17. Исследование цепи при симметричной нагрузке без нулевого провода. Переключатели должны быть установлены в следующие положения: S_1 – «ВКЛ», S_2 – «ОТКЛ». Повторить действия п. 15, заполнить вторую строку табл. 5.
18. Исследование цепи при несимметричной нагрузке с нулевым проводом. Переключатели должны быть установлены в следующие положения: S_1, S_2 – «ВКЛ». Увеличить значения сопротивления RA в два раза. Повторить действия п. 15, заполнить третью строку табл. 5.
19. Исследование цепи при несимметричной нагрузке без нулевого провода. Переключатели должны быть установлены в следующие положения: S_1 – «ВКЛ», S_2 – «ОТКЛ».



Повторить действия п. 15, заполнить четвёртую строку табл. 5.

№ опыта	Вид нагрузки	I_A	I_B	I_C	I_N	U_A	U_B	U_C	U_N	P_A	P_B	P_C
		А				В				Вт		
1	$r_A = r_B = r_C$ четырёхпроводная											
2	$r_A = r_B = r_C$ трёхпроводная											
3	$r_A = r_B \neq r_C$ четырёхпроводная											
4	$r_A = r_B \neq r_C$ трёхпроводная											
5	$r_A = \infty, r_B \neq r_C$ трёхпроводная											
6	$r_A = \infty, r_B \neq r_C$ четырёхпроводная											
7	$r_A = 0, r_B = r_C$ трёхпроводная											
8	$r_A = r, r_B = X_L,$ $r_C = X_C$ трёхпроводная											

Исследование цепи при обрыве линейного провода с нулевым проводом. Восстановить исходные значения RA . Переключатели должны быть установлены в следующие положения: S_1 – «ВКЛ», S_2 – «ОТКЛ».

Повторить действия п. 15, заполнить пятую строку табл. 5.

20. Исследование цепи при обрыве линейного провода без нулевого провода. Переключатели должны быть установлены в следующие положения: S_1, S_2 – «ОТКЛ».

Повторить действия п. 15, заполнить шестую строку табл. 5.

21. Исследование цепи при неоднородной нагрузке с нулевым проводом: фаза A – активная нагрузка, фаза B – индуктивная нагрузка, фаза C – ёмкостная нагрузка. Заменить элемент RB на катушку индуктивности, а элемент RC – на конденсатор. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда. Переключатели должны быть установлены в следующие положения: S_1, S_2 – «ВКЛ».

Произвести измерения и результаты записать в седьмую строчку табл. 5.

22. Исследование цепи при неоднородной нагрузке без нулевого провода: фаза A – активная нагрузка, фаза B – индуктивная нагрузка, фаза C – ёмкостная нагрузка. Переключатели должны быть установлены в следующие положения: S_1 – «ВКЛ», S_2 – «ОТКЛ».

Произвести измерения и результаты записать в восьмую строчку табл. 5.

24. По данным опыта 7 определить углы сдвига между током и напряжением в каждой фазе $\left(\varphi = \arctg \frac{P}{I_\phi U_\phi} \right)$.

25. Построить векторные диаграммы для опытов 1 – 8 табл. 5.

Содержание отчёта

1. Заполненная таблица результатов измерений и расчётов для реальной смоделированной на компьютере трёхфазной сети.
2. Рассчитанные значения мощности, угла сдвига фаз между напряжением и током, напряжений и токов.
3. Векторные диаграммы напряжений для опытов № 1, № 2, № 3.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение трёхфазной симметричной системы ЭДС.

- Перечислите способы соединения нагрузки в трёхфазных цепях.
- Объясните назначение нейтрального провода.
- Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении нагрузки звездой?
- Укажите способы включения ваттметров для измерения: активной мощности в четырёхпроводных и трёхпроводных трёхфазных цепях.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЁМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы: установить соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении приёмников треугольником при различной нагрузке фаз; определить влияние обрыва линейного провода и фазы нагрузки на работу цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов.

Оборудование

- Трёхфазный источник с напряжением 36 В.
- Вольтметр переменного тока 0 ... 50 В.
- Амперметр переменного тока 0 ... 1 А.
- Измерительный комплект К-505.

Порядок выполнения работы

- Собрать установку для измерения токов и напряжений для случая симметричной нагрузки согласно схеме рис. 68. Установить одинаковые сопротивления в каждой фазе: $r_{AB} = r_{BC} = r_{CA}$. Для измерения линейных токов использовать прибор К-505. Фазные токи I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} измерить тремя переносными амперметрами A_1 , A_2 , A_3 или одним, поочередно включая его в цепь каждой фазы треугольника. Фазные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} измерить переносным вольтметром. Со стенда снять и записать значения r_A , r_B , r_C , L , C . Показания приборов записать в первую строку табл. 6.
- Установить неодинаковые сопротивления двух фаз ($r_{AB} = r_{BC} \neq r_{CA}$). Показания приборов записать во вторую строчку табл. 6.

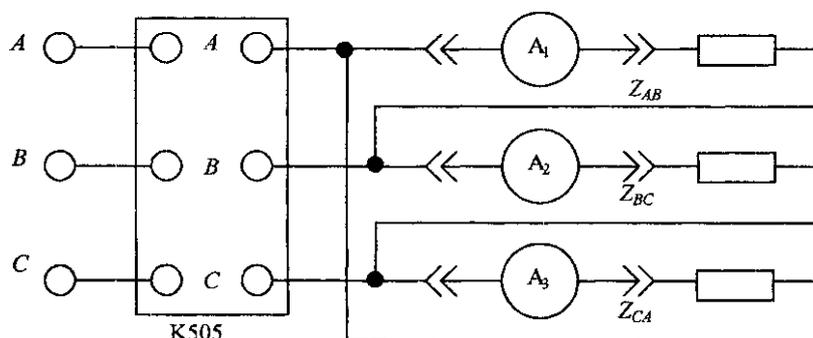


Рис. 68

- Произвести обрыв линейного провода A . Показания приборов записать в третью строчку табл. 6.
- Подключить провод A . Сопротивление r_{AB} отключить, результаты измерений записать в четвёртую строчку табл. 7.
- Собрать схему для неоднородной нагрузки $Z_{AB} = r_A + jX_L$; $Z_{BC} = -jX_C$; $Z_{CA} = r$.
- Произвести измерение токов и напряжений. Результаты измерений записать в пятую строчку табл. 6.
- По данным опыта 5 определить параметры нагрузки по формулам $Z_{AB} = \frac{U_{\Delta}}{I_{AB}}$; $X_{AB} = \sqrt{Z_{AB}^2 - r_{AB}^2}$; $X_{BC} = \frac{U_{\Delta}}{I_{BC}}$;
 $\cos \varphi_{AB} = \frac{r_{AB}}{Z_{AB}}$; $\sum P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$.
- По данным опытов 1 – 5 построить векторные диаграммы.
- Запустить программу EWB.
- Загрузить файл triangle_1.ewb для исследования трёхфазной цепи при соединении приёмников треугольником. Схема цепи соответствует рис. 69. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда.
- Исследование цепи при симметричной нагрузке. Переключатели должны быть установлены в положения: S_A, S_{AB} – «ВКЛ».
- Включить питание. Через промежуток времени $t \geq 5$ с отключить питание. Снять показания приборов.
- Заполнить первую строку табл. 6.

14. Исследование цепи при несимметричной нагрузке. Увеличить значения сопротивления R_{AB} в два раза. Повторить действия п. 12, заполнить вторую строку табл. 6. Восстановить исходные значения R_{AB} .

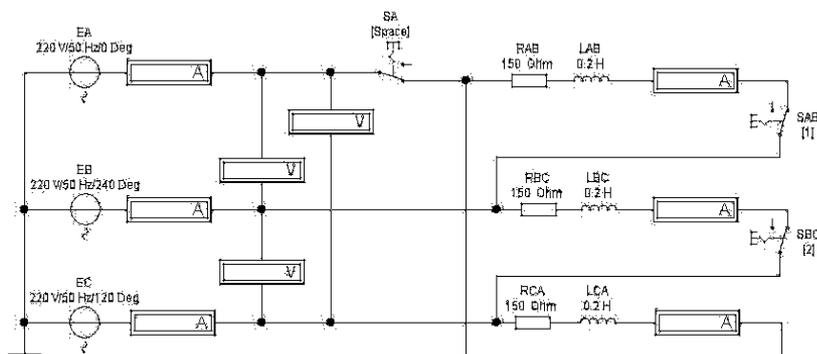


Рис. 69

Таблица 6

№ п/п	Нагрузка	Измерения, А						Вычисления, Вт		
		I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	I_A	I_B	I_C	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}
1	$r_{AB} = r_{BC} = r_{CA}$									
2	$r_{AB} = r_{BC} \neq r_{CA}$									
3	$r_{AB} = r_{BC}$ обрыв линейного провода A									
4	$r_{AB} = \infty$, $r_{BC} \neq r_{CA}$									
5	$Z_{AB} = r_A + jX_L$ $Z_{BC} = -jX_C$ $Z_{CA} = r$									

15. Исследование цепи при обрыве линейного провода A .

Создать обрыв линейного провода A , установив переключатель S_A в положение «ВЫКЛ» с помощью клавиши «ПРОБЕЛ». Повторить действия п. 12, заполнить третью строку табл. 6. Восстановить исходное положение переключателя S_A с помощью клавиши «ПРОБЕЛ».

16. Исследование цепи при обрыве одной фазы нагрузки AB .

Установить переключатель S_{AB} в положение «ВЫКЛ» с помощью клавиши 1. Повторить действия п. 12, заполнить четвёртую строку табл. 6.

17. Исследование цепи при неоднородной нагрузке: $Z_{AB} = r_A + jX_L$; $Z_{BC} = -jX_C$; $Z_{CA} = r$. Индуктивности L и ёмкости C установить согласно п. 5. Повторить действия п. 12, заполнить пятую строку табл. 6.

18. Вычислить параметры нагрузки и значения коэффициента мощности для каждой из фаз нагрузки по формулам п. 6.

19. Вычислить значения активной мощности для каждой из фаз нагрузки и всей цепи по формулам п. 7.

20. Построить векторные диаграммы для каждого из опытов.

Содержание отчёта

1. Заполненная таблица результатов измерений и расчётов.
2. Рассчитанные значения коэффициента мощности и активной мощности в фазах нагрузки AB , BC и CA .
3. Векторные диаграммы напряжений и токов.

Контрольные вопросы

1. Начертите схему соединения приёмников в треугольник, указав положительные направления линейных и фазных токов.
2. Каковы соотношения между значениями линейных и фазных токов при симметричной нагрузке?
3. Начертите векторную диаграмму напряжений и токов для симметричной нагрузки, соединённой в треугольник.
4. Как изменятся ток и мощность, если включённые по схеме «звезда» одинаковые нагрузки переключить на схему «треугольник» (линейные напряжения в обоих случаях одинаковы)?
5. Как рассчитать мощность приёмника при несимметричной нагрузке?
6. Как рассчитать мощность приёмника при симметричной нагрузке?
7. Доказать, что при помощи двух однофазных ваттметров можно измерить мощность всей трёхфазной цепи.

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ В ТРЁХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Цель работы: изучить влияние гармоник, кратных трём, на величину и форму фазных и линейных токов и напряжений, а также на ток в нейтральном проводе и величину напряжения на нейтрали при холостом ходе трансформатора.

Методические указания

В лабораторной работе исследуются несинусоидальные токи и напряжения в группе однофазных трансформаторов, магнитные системы которых имеют значительное насыщение. ЭДС в обмотках симметричны, что исключает наложение токов несимметрии на токи высших гармоник.

При соединении обмоток трансформатора звездой (рис. 70) и при несинусоидальных ЭДС в фазах линейные напряжения также несинусоидальны. Эти напряжения не содержат гармоник, кратных трём, так как при вычитании гармоники нулевой последовательности в сумме дают нуль; поэтому отношение $U_{\text{л}} / U_{\text{ф}} > \sqrt{3}$.

Если к несинусоидальной системе ЭДС подключить симметричную нагрузку, соединённую в звезду без нейтрального провода

(рис. 71), то ни линейные, ни фазные напряжения потребителя не будут содержать гармоник, кратных трём, так как линейные напряжения не содержат третьих гармоник. Поэтому и линейные, и фазные токи потребителя также не содержат этих гармоник

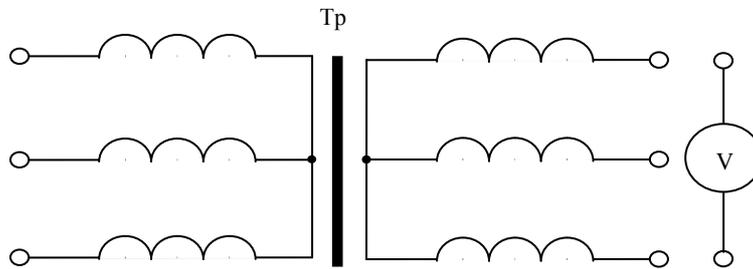


Рис. 70

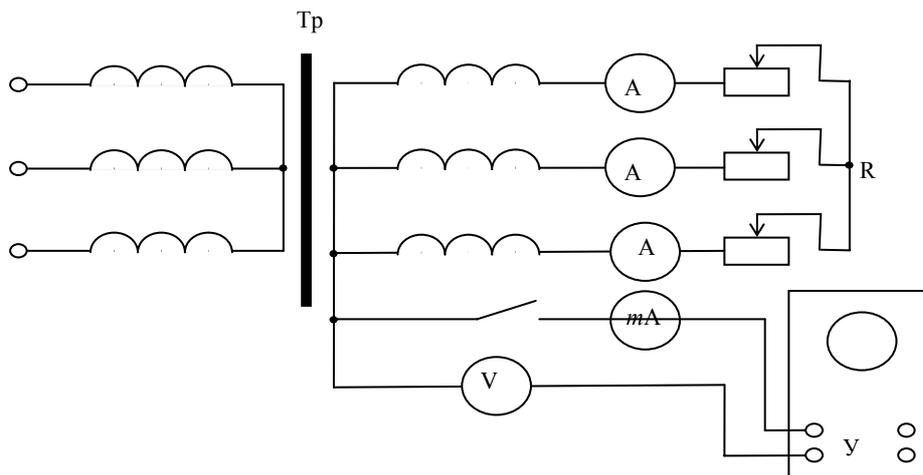


Рис. 71

Напряжение на нейтрали отличается от нуля и равно сумме гармоник, кратных трём,

$$U_N = \sqrt{U_3^2 + U_9^2 + U_{15}^2 + \dots} \approx U_3 = E_3.$$

Если к несинусоидальной системе ЭДС подключить симметричную нагрузку с нейтральным проводом, то в нём возникнет ток, содержащий гармоник, кратные трём,

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} \approx 3I_3.$$

Других гармоник этот ток содержать не может, так как симметричные токи прямой последовательности, так же как и симметричные токи обратной последовательности, в сумме равны нулю. Линейные токи содержат все нечётные гармоники, которые создадут в потребителе падения напряжения этих же гармоник. При соединении обмоток генератора или вторичных обмоток трансформатора треугольником сумма всех фазных ЭДС прямой и обратной последовательности равна нулю. Сумма гармоник ЭДС, кратных трём, не равна нулю, и вольтметр, включённый в открытый треугольник (рис. 72), покажет напряжение

$$U = 3\sqrt{U_3^2 + U_9^2 + U_{15}^2 + \dots} \approx 3E_3.$$

Сопротивления фаз трансформатора обычно невелики, поэтому даже при холостом ходе в его обмотках возникает уравнительный ток, состоящий из этих гармоник,

$$I_y = \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} \approx I_3.$$

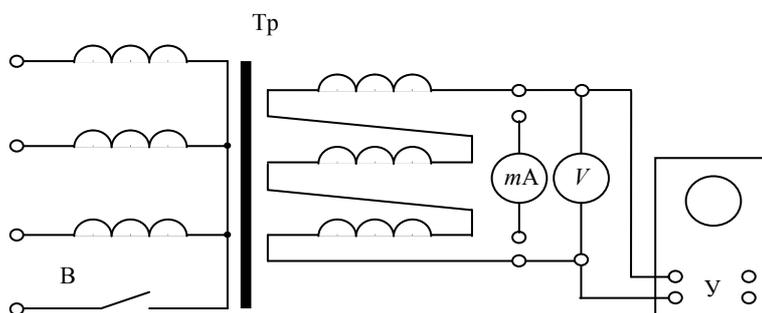


Рис. 72

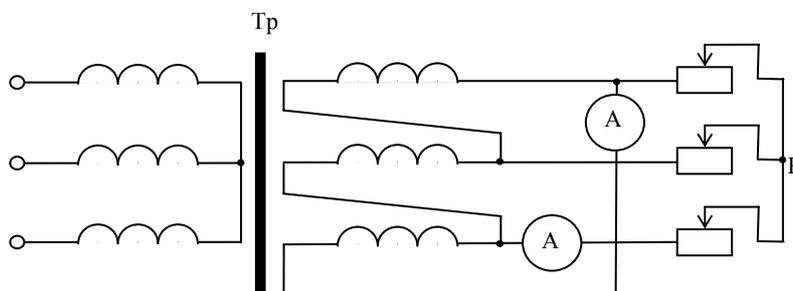


Рис. 73

Уравнительный ток во вторичной обмотке трансформатора, соединенной в треугольник (рис. 73), создаёт падения напряжения, которые уравновешивают ЭДС гармоник, кратных трём. Поэтому линейные вторичные напряжения трансформатора, а также линейные и фазные токи потребителя не будут содержать этих гармоник. Фазные токи вторичной обмотки трансформатора будут содержать все нечётные гармоники, поэтому

$$I_n / I_\phi < \sqrt{3}.$$

Порядок выполнения работы

1. Выбрать вольтметр, собрать цепь (см. рис. 70) и показать её преподавателю для проверки.
2. Включить цепь. Измерить фазные напряжения на вторичных обмотках и убедиться, что они составляют симметричную систему. Убедиться, что линейные напряжения вторичной обмотки тоже составляют симметричную систему. Результаты записать в табл. 7.
3. Выбрать приборы, собрать цепь (см. рис. 71). Подготовить осциллограф к работе. Показать преподавателю цепь для проверки.
4. На вход осциллографа подать контрольный сигнал с частотой 50 Гц и скопировать изображение синусоиды основной частоты на кальку.
5. При разомкнутом рубильнике, изменяя положение движков реостатов, установить симметричную нагрузку. Внимание! В последующих опытах положение движков не изменять. Измерить силу линейных токов, содержащих только

первую гармонику I_1 и напряжение на нейтрали $U_N = E_3$. Результаты записать в табл. 7. На вход осциллографа подать напряжение на нейтрали и скопировать изображение третьей гармоники на кальку.

6. Замкнуть нейтральный провод и измерить силу тока в нём I_N и I – в линейном проводе, содержащем первую и третью гармоники. Результаты записать в таблицу.

7. Собрать цепь (см. рис. 72). При разомкнутом нейтральном проводе первичной обмотки измерить напряжение в открытом треугольнике вторичных обмоток U_{Δ} . Скопировать на кальку изображение третьей гармоники напряжения,

8. Замкнуть нейтральный провод в первичной обмотке. Убедиться, что сумма ЭДС во вторичных обмотках равна нулю.

9. Вместо вольтметра включить амперметр. Измерить уравнивающий ток при замкнутом и разомкнутом нейтральном проводе первичной обмотки. Результаты записать в табл. 7.

10. Собрать цепь (см. рис. 73) и показать её преподавателю для проверки.

11. Включить цепь. При симметричной нагрузке измерить линейный и фазный токи в обмотках трансформатора.

12. По результатам опытов пп. 2 убедиться, что $U_{л} / U_{\phi} < \sqrt{3}$.

13. Пренебрегая гармониками выше третьей, рассчитать по результатам опытов п. 5 и 6 третью гармонику линейного тока по формуле $I_3 = I_N / 3$. Результаты записать в табл. 7.

14. По результатам опытов п. 7 рассчитать третью гармонику ЭДС вторичной обмотки: $E_3 = U_N / 3$.

15. По результатам опытов п. 11 убедиться, что $I_{л} / I_{\phi} < \sqrt{3}$.

Таблица 7

$U_{л}, В$	$U_{\phi}, В$	$U_{л} / U_{\phi}$	Нейтральный провод				I_y		$I_{л}, А$	$I_{\phi}, А$	$I_{л} / I_{\phi}$			
			разомкнут		замкнут		разомкнут	замкнут						
			$I, А$	$I_N, А$	$I, А$	$I_N, А$						$I_3, А$	$U_{\Delta}, В$	$E_3, В$
п. 2			п. 5		п. 6		п. 7		п. 8		п. 9		п. 11	

Содержание отчёта

По лабораторной работе сделать заключение относительно существования третьих гармоник: а) в линейных и фазных напряжениях вторичных обмоток, соединённых в треугольник; б) в токе нейтрального провода; в) в напряжении на нейтрали при разомкнутом нейтральном проводе; г) в ЭДС во вторичных обмотках при замкнутом и разомкнутом нейтральном проводе первичных обмоток; д) в линейных и фазных токах вторичных обмоток, соединённых в треугольник. Записать выводы.

Контрольные вопросы

- Какова цель лабораторной работы?
- Чему равна сумма симметричных векторов последовательностей: а) прямой, б) обратной, в) нулевой?
- Какие гармоники содержатся в фазных и линейных напряжениях генератора при соединении его обмоток в звезду и треугольник?
- Чему равно напряжение на нейтрали при симметричной нагрузке без нулевого провода, если ЭДС фаз генератора: а) синусоидальны, б) несинусоидальны?
- Чему равна сила тока в нейтральном проводе при симметричной нагрузке, если ЭДС фаз генератора: а) синусоидальны, б) несинусоидальны?
- Какие гармоники содержатся в линейных и фазных токах симметричного потребителя, соединённого в звезду: а) с нейтральным проводом, б) без нейтрального провода, если потребитель подключён к источнику с несинусоидальной ЭДС?
- Чему равна сумма фазных ЭДС генератора, соединённого в треугольник? Будет ли возникать ток в обмотках генератора, работающего вхолостую?
- Какие гармоники содержатся в линейных и фазных токах симметричного потребителя, соединённого в треугольник?
- Почему при соединении первичных обмоток трансформаторов в звезду с нейтральным проводом ЭДС во вторичных обмотках не содержат гармоник, кратных трём?
- Почему при изучении несинусоидальных токов первичные и вторичные ЭДС трансформаторов и сопротивления потребителя должны обязательно составлять симметричную систему?

РЕЖИМ НЕЙТРАЛИ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЁМНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Цель работы: на лабораторной установке-модели сети познакомиться с режимом нейтрали электроустановок напряжением выше 1000 В при однофазном замыкании на землю, изучить вопросы выбора способа заземления нейтрали, влияние его на надёжность работы сети, бесперебойность электроснабжения потребителей.

Методические указания

Надёжность систем электроснабжения зависит в значительной мере от режима нейтрали источников и приёмников трёхфазного тока.

В зависимости от способа заземления нейтрали системы по-разному реагируют на полнофазное замыкание на землю.

Система с изолированной нейтралью. Рассмотрим режим однофазного замыкания на землю в трёхфазной системе напряжением 1000 В с изолированной нейтралью (рис. 74, а).

В большинстве случаев ёмкостные проводимости фаз относительно земли можно считать равными, т.е.

$$g_{CA} = g_{CB} = g_{CC} = j\omega c_i,$$

где $c_i = c_A = c_B = c_C$ – ёмкость фазы относительно земли.

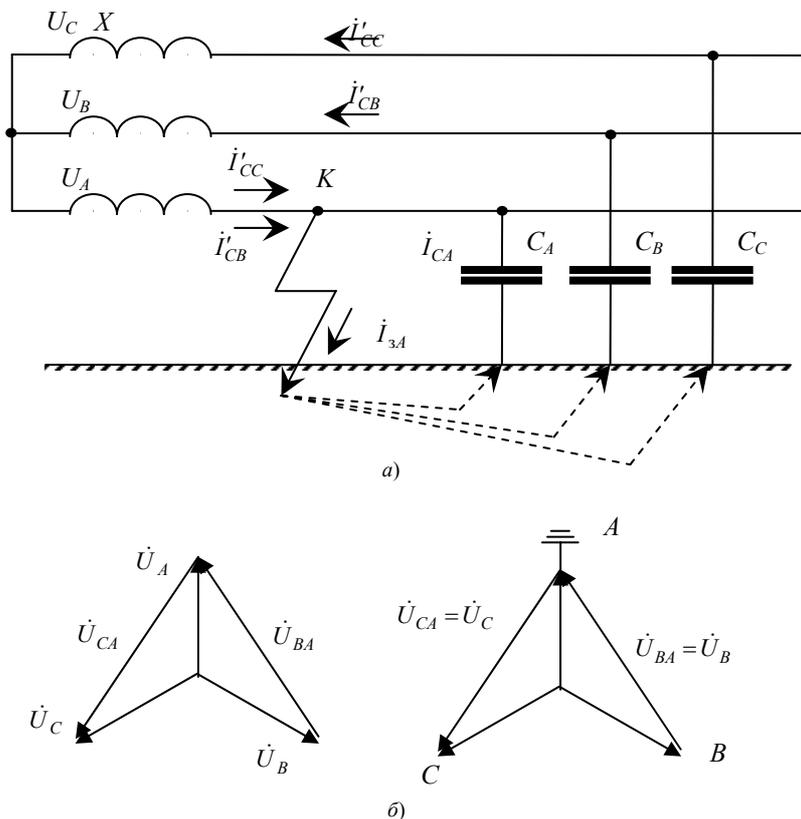


Рис. 74

Расчётная схема замещения системы в нормальном режиме дана на рис. 74, а.

$$|U_A| = |U_B| = |U_C| = U_\Phi; \quad U_0 = 0;$$

$$|I_{CA}| = |I_{CB}| = |I_{CC}| = I_C;$$

$$\dot{I}_{CA} + \dot{I}_{CB} + \dot{I}_{CC} = 0.$$

Напряжение всех фаз относительно земли $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ при замыкании на землю фазы А определяется геометрической суммой напряжений фаз относительно земли в нормальном режиме работы $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ и напряжения смещения нейтрали $\dot{U}_0 = -\dot{U}'_A$, т.е.

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + (-\dot{U}_A) = 0; \dot{U}'_B = \dot{U}_B + (-\dot{U}_A); \dot{U}'_C = \dot{U}_C + (-\dot{U}_A).$$

Согласно векторной диаграмме (рис. 74, б) $\dot{U}'_B = \sqrt{3} \dot{U}_B$, $\dot{U}'_C = \sqrt{3} \dot{U}_C$ и $|\dot{U}'_B| = |\dot{U}'_C| = \sqrt{3} \dot{U}_\phi$, а угол между векторами \dot{U}'_B и \dot{U}'_C равен 60° . Следовательно, напряжения неповреждённых фаз B и C относительно земли увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз и становятся равными междуфазному напряжению установки, и напряжение повреждённой фазы A относительно земли равно нулю.

Ёмкостные токи фаз I'_{CA} , I'_{CB} , I'_{CC} при замыкании на землю фазы также определяются геометрической суммой ёмкостных токов фаз в нормальном режиме I'_{CA} , I'_{CB} , I'_{CC} и током нулевой последовательности $I_{CB} = -I_{CA}$.

Из векторной диаграммы ясно, что $I'_{CB} = \sqrt{3} I_{CB}$; $I'_{CC} = \sqrt{3} I_{CC}$; $I'_{CC} = I'_{CB} = \sqrt{3} I_{CC}$, а угол между векторами I'_{CB} и I'_{CC} равен 60° . Ёмкостный ток замыкания на землю I_{3A} равен геометрической сумме ёмкостных токов неповреждённых фаз I'_{CB} и I'_{CC} в аварийном режиме, т.е. согласно векторной диаграмме

$$I_{3A} = -(I'_{CB} + I'_{CC}) = (Y_B \dot{U}'_B + Y_C \dot{U}'_C) = j 3 \omega c \dot{U}_A.$$

Таким образом, ёмкостный ток однофазного замыкания на землю в системе с изолированной нейтралью равен тройному ёмкостному току на землю «здоровой» фазы при нормальном режиме

$$I_{3A} = 3 I_C = j 3 \omega c \dot{U}_A$$

и зависит от напряжения установки, частоты и ёмкости фаз относительно земли. Для трёхфазной системы с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В всё сказанное справедливо.

Системы с компенсацией ёмкостных токов замыкания на землю (рис. 75). Для уменьшения ёмкостных токов однофазного замыкания на землю между нейтралью источников или приёмников электроэнергии и землёй включаются компенсирующие устройства (заземляющие катушки с настроенной индуктивностью).

Рассмотрим аварийный режим в системе с напряжением более 1000 В с компенсацией ёмкостных токов однофазного замыкания на землю при помощи дугогасящей катушки. Расчётная схема замыкания системы в аварийном режиме приведена соответственно на рис. 75, а. Условия нормального режима аналогичны приведённым выше для изолированной нейтрали, ток в катушке равен нулю ($I_K = 0$).

При полном замыкании на землю фазы (например, A) напряжения повреждённой и «здоровых» (B и C) фаз относительно земли и ёмкостные токи в фазах изменяются так же, как в системе с изолированной нейтралью:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= 0; \dot{U}'_B = \dot{U}'_C = \sqrt{3} U_\phi; \\ I'_{CA} &= 0; I'_{CB} = I'_{CC} = \sqrt{3} I_\phi, \end{aligned}$$

а углы между векторами U'_B и U'_C , I'_{CB} и I'_{CC} равны 60° (см. векторную диаграмму – рис. 75, б).

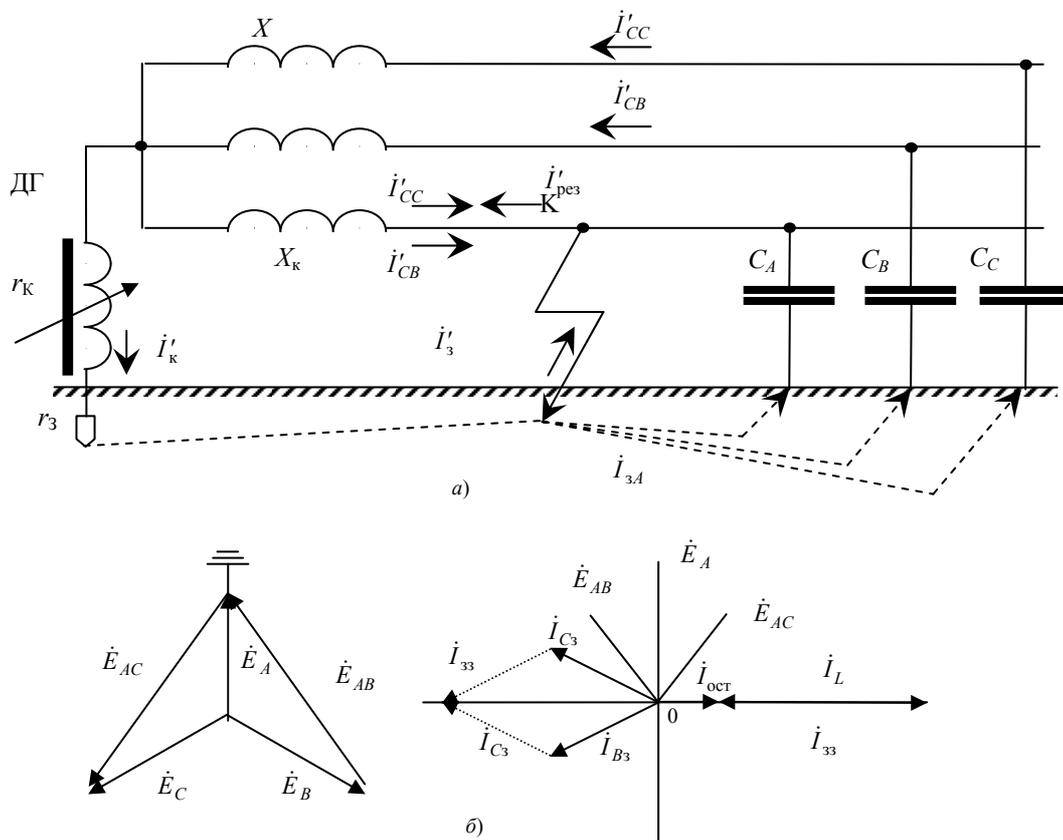


Рис. 75

При этом дугогасящая катушка оказывается под фазным напряжением ($\dot{U}_0 = \dot{U}_A$) и через место замыкания на землю протекают токи: преимущественно индуктивный ток катушки $I_K \approx I_L$ и ёмкостный ток замыкания на землю I_{3A} , которые смещены по фазе приблизительно на 180° , и следовательно, компенсируют друг друга. Поэтому при резонансной настройке катушки $\left(j\omega L_K = \frac{1}{j3\omega C} \right)$ результирующий ток в месте замыкания $I_{рез}$ должен быть равен 0:

$$\dot{I}_{рез} = \dot{I}_K - \dot{I}_{3A} = \dot{I}_L - \dot{I}_{3A} = \left(\frac{1}{j3L_K} - j3\omega C \right) = 0.$$

Однако выполнить условие $I_{рез} = 0$ практически очень сложно.

Одним из факторов, нарушающих это условие, являются периодические включения и отключения отдельных линий системы, приводящие к постоянным изменениям величины ёмкостного тока сети I_C , что требует постоянной регулировки индуктивности катушек для выполнения условия полной компенсации. Кроме того, катушка имеет активное сопротивление R_K , т.е. $I_K = I_a + jI_K$.

Результирующий ток замыкания на землю фазы в системе с нейтралью, заземлённой через дугогасящую катушку (см. векторную диаграмму – рис. 75, б) может быть определён из уравнения

$$\begin{aligned} \dot{I}_{рез} &= \dot{U}_A (Y_C - Y_K) = \dot{U}_\Phi \left(3j\omega C + \frac{1}{R_K + j\omega L_K} - j3\omega C \right) = \\ &= \dot{U}_\Phi \left(\frac{\tau_k}{R_K^2 + \omega^2 L_K^2} + j \left(3\omega C - \frac{\omega L_K}{R_K^2 + \omega^2 L_K^2} \right) \right) \end{aligned}$$

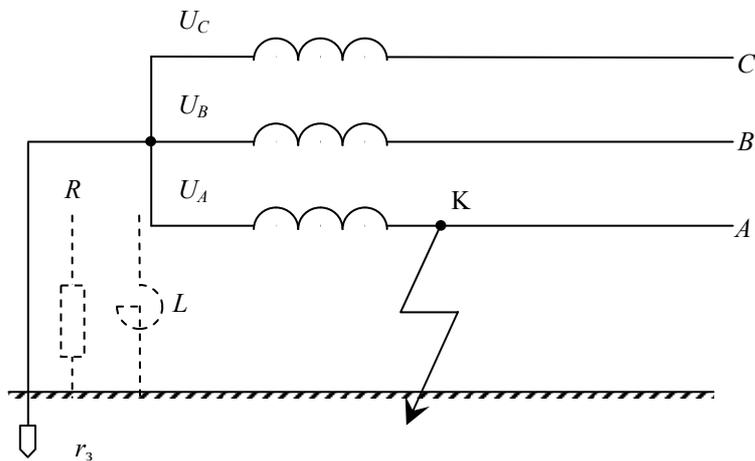
а при условии резонанса, полагая, что $R_K \ll \omega L_K$ $\dot{I}_{рез} = \dot{U}_A \frac{R_K}{R_K^2 + \omega^2 L_K^2}$.

При хорошей (резонансной или близкой к ней) настройке катушек результирующий ток однофазного замыкания на землю не сопровождается дугой, что является основным преимуществом рассматриваемого способа заземления нейтрали.

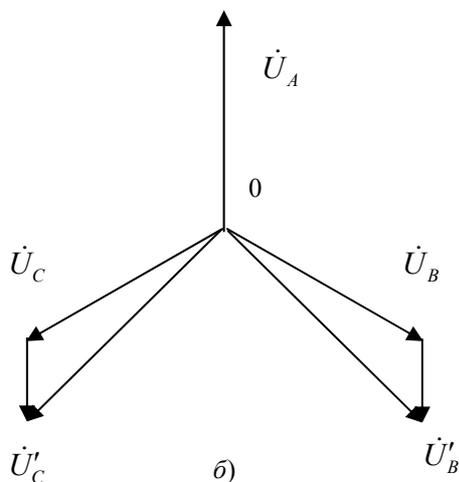
Система с глухозаземлённой нейтралью (рис. 76, а). Ток замыкания практически не зависит от величины сопротивления изоляции и ёмкости системы относительно земли, так как $g_0 \gg g_A$; $g_0 \gg g_B$; $g_0 \gg g_C$ и $g_0 = r_3$ – сопротивление заземления.

Поэтому ток однофазного замыкания на землю, например, фазы А определяется выражением $\dot{I}_{3A} = \frac{\dot{U}_A}{R_3} = \dot{U}_A$, т.е. при

глухом заземлении нейтрали ($r_\Phi \rightarrow 0, g_0 \rightarrow \infty$) величина i_{3A} может иметь очень большое значение (тысячи ампер).



а)



б)

Рис. 76

Напряжения повреждённых фаз относительно земли \dot{U}'_B и \dot{U}'_C (рис. 76, б) определяются геометрической суммой нормальных фазных напряжений U_B и U_C небольших дополнительных составляющих, обусловленных сопротивлениями обмоток трансформаторов (или генераторов) и подводящих проводов, но величины U_B и U_C менее $0,8 U_A$.

Порядок выполнения работы

1. Произвести сборку, согласно принципиальной схеме лабораторной установки (рис. 77). Перед началом работы все автоматы и выключатели на стенде должны быть в положении «отключено».

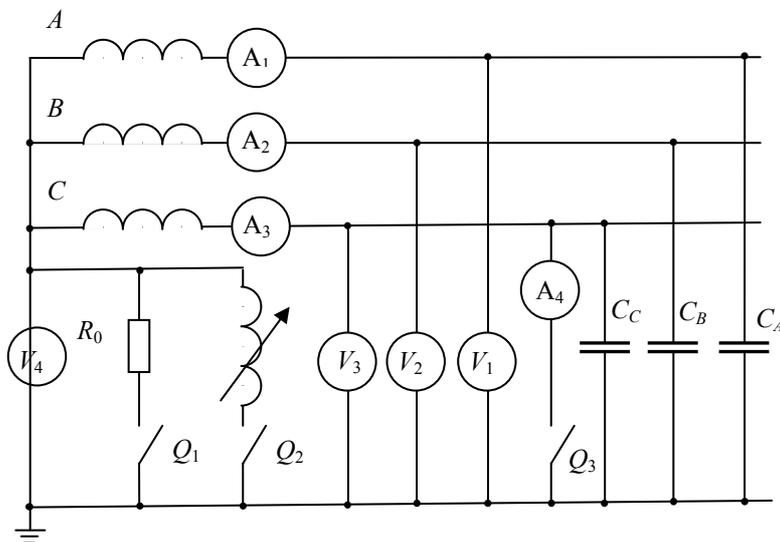


Рис. 77

2. Исследовать режимы работы системы с изолированной нейтралью. В нормальном режиме подаётся питание на схему при отключённых автоматах $Q_1 \dots Q_3$. В аварийном режиме замыкается одна из фаз на землю автоматом Q_3 . Записать показания приборов в табл. 8.

3. Исследовать режимы работы системы с нейтралью, заземлённой через катушку индуктивности. В нормальном режиме автомат Q_2 выключен. В аварийном режиме замыкается фаза C через автомат Q_3 . Изменяя индуктивность катушки, получить четыре значения результирующего тока в цепи замыкания фазы C (амперметр A_4). Полученные результаты измерения записать в табл. 9.

4. Исследовать систему с нейтралью, заземлённой через активное сопротивление. Для чего в нормальном режиме включить автомат Q_1 , в аварийном дополнительно включить автомат Q_3 . Записать все показания в табл. 10.

По экспериментальным данным из таблиц, для каждого из опытов, строятся в масштабе векторные диаграммы по типу рис. 74, б, 75, б, 76, б.

Таблица 8

Режим работы исследуемой системы	Параметры системы	Результаты измерений							
		$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_0, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$I_3, А$
Нормальный									
Аварийный									

Таблица 9

Режим работы системы	Параметры системы	Результаты измерений								
		$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_0, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$I_{рез}, А$	$I_K, А$
Нормальный										
Аварийный										
1										
2										
3										
4										

Таблица 10

Режим работы исследуемой системы	Параметры системы	Результаты измерений							
		$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_0, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$I_{3C}, А$
Нормальный									
Аварийный									

Проверить основные теоретические положения из пояснений к работе, в частности, что $I'_{AC} = \sqrt{3} I_{AC}$; $I'_{BC} = \sqrt{3} I_{BC}$; $U'_A = \sqrt{3} U_A$; $U'_B = \sqrt{3} U_B$; $I_3 = 3 I_C$; $I_{yp} = I_C - I_{LK}$.

Составить выводы по свойствам систем с различными режимами нейтрали.

Контрольные вопросы

1. Какие режимы заземления нейтрали Вы знаете?
2. Какие системы рекомендуется выполнять с изолированной нейтралью?
3. Каковы достоинства и недостатки систем с изолированной нейтралью?
4. Какова роль компенсации ёмкостных токов замыкания на землю?
5. Достоинства и недостатки систем с компенсацией ёмкостных токов замыкания на землю?
6. Какие системы рекомендуется выполнять с глухозаземлённой нейтралью?
7. Для чего вводится реактивное или активное сопротивление в нейтраль трансформаторов или генераторов?
8. Какие ЛЭП называются ЛЭП с большими токами замыкания на землю, какие с малыми токами замыкания на землю?
9. Чем определяется выбор режима нейтрали электроустановок напряжением до и выше 1000 В?
10. Какие системы рекомендуется использовать для электроустановок торфоразработок и шахт?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК $P(U)$, $Q(U)$
 АКТИВНОЙ, ИНДУКТИВНОЙ, ЁМКОСТНОЙ НАГРУЗОК

Цель работы: научиться исследовать статические характеристики различных видов нагрузки и определять регулирующие эффекты активной и реактивной нагрузки.

Оборудование

Обозначени	Наименование	Тип	Параметры
$G1$	Трёхфазный источник питания	201.2	400 В~; 16 А
$A1$	Регулировочный трансформатор	338	250 В·А 3 × 220 / 3 × 90 ... 140 В
$A2$	Трёхполюсный выключатель	301.1	400 В~; 10 А
$A3$	Модель линии электропередачи	313.2	400 В; 50 Гц; 3 × 0,3 А индуктивность/активное сопротивление фазы 0 ... 1,5 Гн / 0 ... 250 Ом, ёмкость между фазой и землёй 0 ... 0,45 мкФ
$A4$	Активная нагрузка	306.1	3 × 0 ... 50 Вт; 220 / 380
$A6$	Ёмкостная нагрузка	317.1	220 / 380 В; 50 Гц; 3 × 50 вар
$A7$	Индуктивная нагрузка	324.1	220 / 380 В; 50 Гц; 3×50 вар
$P1$	Измеритель мощностей	507.2	0 ... 600 ВА 0 ... 1 А 0 ... 600 В
$P2$	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0 ... 10 А; 0 ... 20 МОм

Исследуемые нагрузки на электрических схемах соединений (рис. 79, 80, 81) получают питание от трёхфазного источника $G1$ через модель линии электропередачи $A3$, трёхполюсный выключатель $A2$ и регулировочный трансформатор $A1$. Мощность, потребляемую нагрузками, можно контролировать с помощью измерителя $P1$, а величину питающего напряжения – с помощью вольтметра $P2$.1 блока мультиметров $P2$.

Методические указания

Строгого неизменённого режима в электроэнергетической системе не существует, поэтому установившимся режимом можно назвать только условно, так как в силу своих особенностей энергосистема подвержена воздействию непрерывного потока возмущений, которые не должны вызывать нарушения устойчивости системы, т.е. не должны приводить к прогрессирующему возрастающему изменению параметров её исходного режима. Электроэнергетическая система должна быть устойчива при малых возмущениях. Применительно к малым возмущениям введено понятие статической устойчивости.

Статическая устойчивость – это способность электроэнергетической системы самостоятельно восстанавливать исходный установившийся режим после малых возмущений или режим, весьма близкий к исходному, если возмущение не снято. Исходя из определения статической устойчивости системы, можно заключить, что существует такой режим, при котором очень малое увеличение нагрузки вызывает нарушение её устойчивости. Такой режим называют *предельным*, а нагрузки системы – максимальными или *предельными нагрузками* по условиям статической устойчивости.

Ограничение нагрузок может быть вызвано и другими факторами, например, уровнями напряжения в узлах, нагревом генераторов, трансформаторов и линий электропередач.

Пропускной способностью элемента электроэнергетической системы называют наибольшую мощность, которую можно передать через этот элемент с учётом всех ограничивающих факторов (устойчивости, нагрева, напряжения в узлах и т.п.) иногда пропускную способность определяют только по одному фактору и говорят, например, о пропускной способности по статической устойчивости.

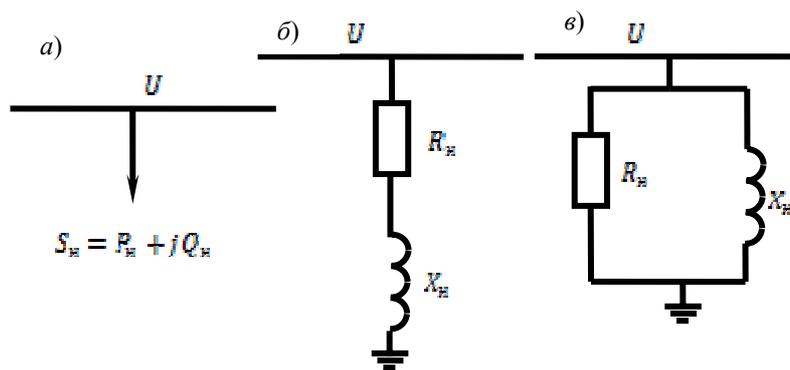


Рис. 78

Величина параллельно соединённых активного и реактивного сопротивлений вычисляется по мощности и напряжению исходного режима (рис. 78):

$$R_n = U^2 P_n^{-1}; \quad X_n = U^2 Q_n^{-1}.$$

Для случая последовательного соединения сопротивлений

$$Z_n = R_n + jX_n = U^2 S_n^{-1} (\cos \varphi_n + j \sin \varphi_n),$$

где $\cos \varphi_n$ – коэффициент мощности нагрузки.

Если напряжение в исходном режиме неизвестно, то в предыдущих выражениях подставляется номинальное или среднее напряжение.

Замена нагрузок постоянными сопротивлениями R_n , X_n позволяет существенно упростить расчёты, но связана с наибольшими погрешностями.

Состояние системы, характеризующееся совокупностью условий и величин в какой-либо момент времени или на интервале времени, называется *режимом системы*. Режим характеризуется количественными показателями, которые называются *параметрами режима*. К ним относятся значения мощности, напряжения, частоты, тока, ЭДС и т.д. Параметры режима связаны между собой зависимостями, в которые входят параметры системы.

Параметры системы – это показатели, количественно определяющиеся физическими свойствами элементов системы, схемой их соединения, а также расчётными данными. К параметрам системы относятся сопротивления и проводимости элементов, коэффициенты трансформации, постоянные времени и т.д.

В качестве примера приведём известные выражения:

$$P = \frac{U^2}{R}; \quad \Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X,$$

где P , U , Q , ΔQ – параметры режима; R , X – параметры системы.

Режим энергосистемы может быть установившимся или переходным, нормальным или аварийным. Причины, вызывающие изменение параметров режима, называются *возмущающими воздействиями*.

Динамическая устойчивость – это способность электроэнергетической системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние или практически близкое к нему.

Если после возмущения синхронная работа генераторов или двигателей системы нарушается, а затем, по прошествии определённого, допустимого по условиям эксплуатации времени восстанавливается, то такую систему принято считать обладающей *результатирующей устойчивостью*.

Следует отметить, что понятие «энергосистема устойчива» не определён до тех пор, пока не установлены условия, при которых

устойчивость энергосистемы обеспечивается. К ним, прежде всего, относятся параметры сети и исходного режима, а также вид и характер возмущения, возникающего в энергосистеме. Ведь практически всегда можно найти такие возмущения (иногда очень тяжёлые и крайне редкие), которые вызовут нарушение устойчивости энергосистемы. Поэтому часто в термин «энергосистема устойчива» вкладывают понятие «сохранение устойчивой работы генераторов и двигателей при нормативных требованиях в части возмущений».

При исследовании устойчивости широко используются статические и динамические характеристики элементов системы. Под *статическими характеристиками* понимают аналитические и графические зависимости параметров режима, определённые при медленных их изменениях, когда каждый режим можно считать установившимся. Примером могут служить зависимости активной P или реактивной Q мощности нагрузки от напряжения U и частоты f :

$$P = F_1(U, f); \quad Q = F_2(U, f).$$

Динамические характеристики – это зависимости параметров режима системы, определенные при быстрых изменениях режима с учётом времени и скорости его изменения. Например,

$$P = \varphi_1\left(U, f, t \frac{dU}{dt}, \dots\right); Q = \varphi_2\left(U, f, t \frac{dU}{dt}, \dots\right).$$

Представление нагрузки в расчётах электромеханических переходных процессов в энергосистемах выполняются по-разному. Правильность математического описания нагрузки может оказать существенное влияние на результаты расчётов устойчивости.

Существует несколько способов представления нагрузки. Наиболее точно нагрузка в расчётах устойчивости может быть представлена асинхронными и синхронными двигателями, а также статическими потребителями.

Простейшая наиболее часто применяемая модель статической нагрузки основана на замещении последней мощностью или линейной проводимостью, т.е. постоянными активными и реактивными сопротивлениями.

Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что все устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания. Соедините гнёзда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника G1.

2. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Переключатели режима работы выключателя A2 переведите в положение «РУЧН.».

3. Переключатели активной нагрузки A4 поверните против часовой стрелки до упора. При помощи короткого проводника соедините гнёзда «ТК» на трёхфазном источнике питания G1 (рис. 79).

Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P2 и включите питание используемого мультиметра.

5. Переключая отпайки регулировочного трансформатора A1, установите на шинах активной нагрузки A4 междуфазное напряжение 220 В. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» выключателя A2.

6. При помощи переключателей на активной нагрузке A4 установите такие сопротивления фаз, при которых мощность, потребляемая

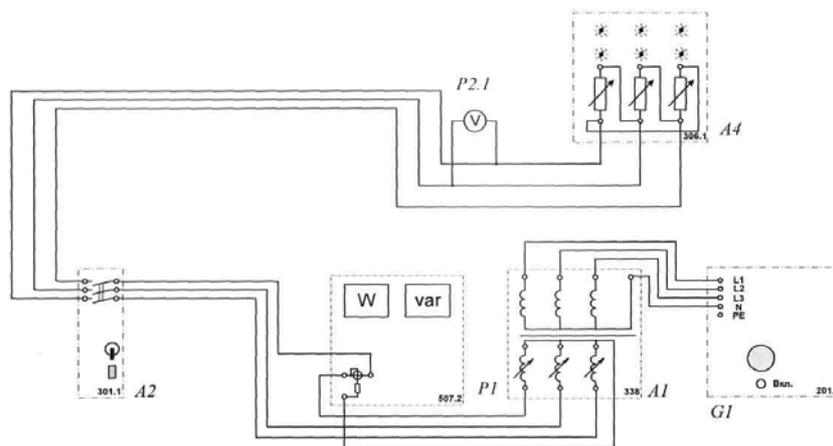


Рис. 79

одной фазой нагрузки при напряжении 220 В составляет около 50 Вт (мощность контролируется по измерителю P1). Изменяя напряжение питания нагрузки при помощи трансформатора A1, записывайте показания вольтметра P2.1 и утроенные показания измерителя мощностей P1 в табл. 11.

Таблица 11

P, Вт								
U, В								

7. Аналогично снимите характеристики других статических нагрузок – индуктивной, емкостной (рис. 80, 81). Перед снятием характеристики ёмкостной нагрузки установите на модели линии активное сопротивление, например 200 Ом. Это необходимо для ограничения броска тока в момент подачи напряжения на нагрузку. По окончании экспериментов переключатели всех нагрузок верните в исходное положение.

8. По окончании эксперимента, нажмите кнопку «ОТКЛ» выключателя A2, отключите питание блока мультиметров, отключите источник G1 нажатием на красную кнопку – «гриб» и последующим отключением ключа-выключателя.

9. Используя данные табл. 11, постройте статические характеристики $P = f(U)$ и $Q = f(U)$ нагрузок.

10. Для каждого интервала изменения напряжения определите регулирующие эффекты активной и реактивной мощности по напряже-

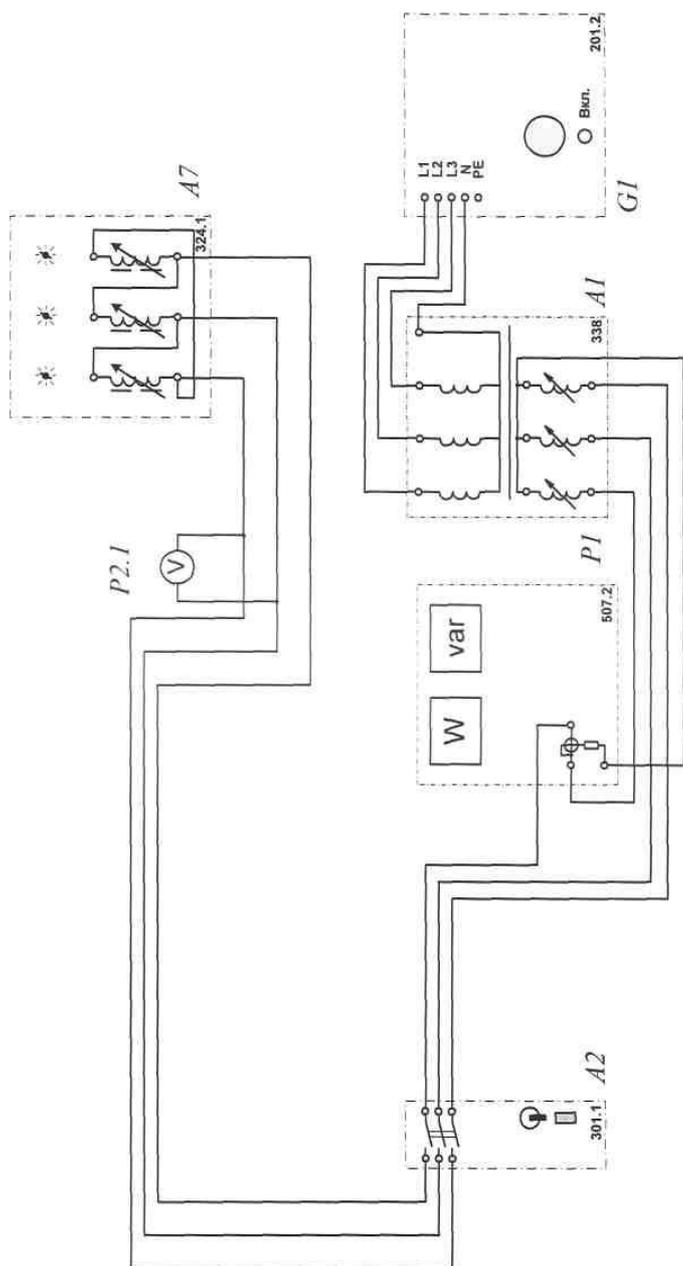


Рис. 80

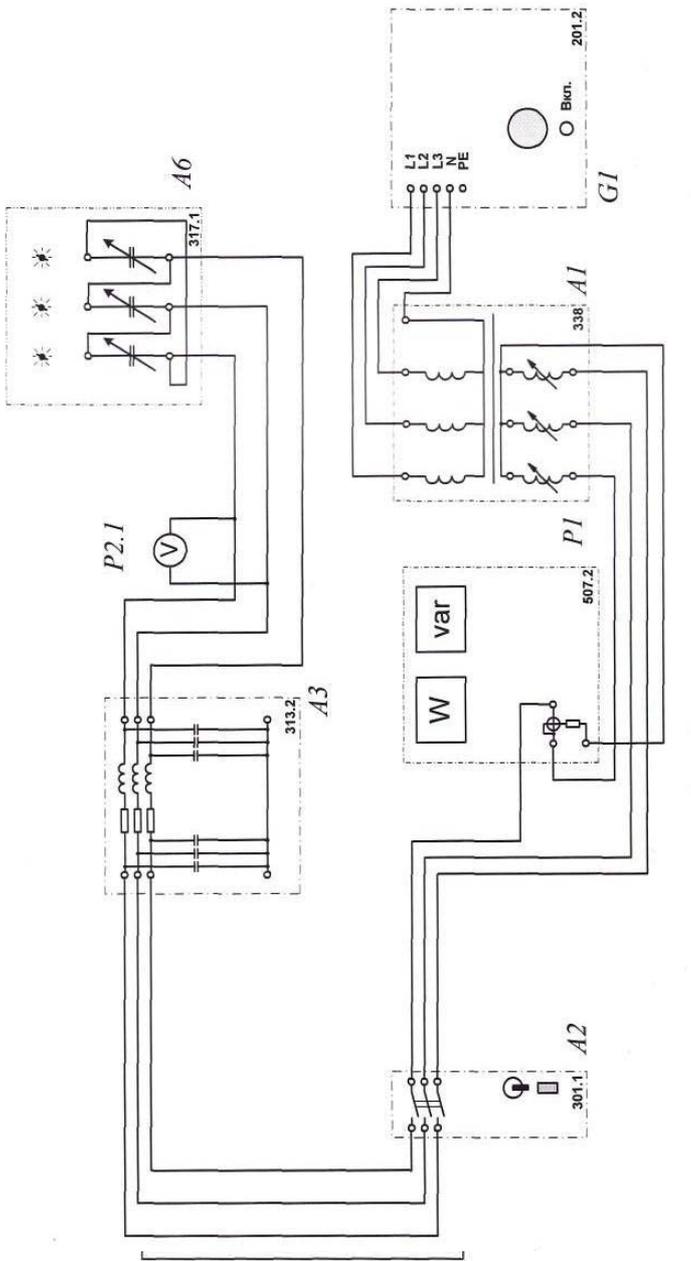


Рис. 81

нию соответственно $K_{PU} = \frac{\Delta P}{\Delta U}$; $K_{QU} = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$ и постройте зависимости $K_{PU} = f(U, \Delta U)$; $K_{QU} = f(U, \Delta U)$.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные этапы возникновения и решения проблемы устойчивости электроэнергетических систем?
2. Какие основные причины вызывают нарушения устойчивости в электроэнергетических системах?
3. Что такое электроэнергетическая система, и из каких элементов она состоит?
4. Каково различие между понятиями «параметры режима» и «параметры системы»?
5. Какие виды режимов имеют место в электроэнергетических системах?
6. Что считается нарушением режима электроэнергетической системы?
7. Что такое «пропускная способность» элемента системы?
8. Что понимается под статической, динамической и результирующей устойчивостью системы?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
 $P(U)$, $Q(U)$ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ И ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗОК

Цель работы: исследовать устойчивость электроэнергетической системы на примере определения статических характеристик её отдельных элементов; определить регулирующие эффекты для осветительной и выпрямительной нагрузки.

Оборудование

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	201.2	400 В~; 16 А
A1	Регулировочный трансформатор	338	250 В·А 3 × 220 / 3 × 90 ... 140 В
A2	Трёхполюсный выключатель	301.1	400 В~; 10 А
A3	Модель линии электропередачи	313.2	400 В; 50 Гц; 3 × 0,3 А индуктивность/активное сопротивление фазы 0 ... 1,5 Гн / 0 ... 250 Ом, ёмкость между фазой и землёй 0 ... 0,45 мкФ
A5	Осветительная нагрузка	340	3 × 0 ... 45 Вт; 220 В 220 / 380 В; 50 Гц; 3 × 50 вар
A8	Блок диодов	332	2 А; 600 В
P1	Измеритель мощностей	507.2	0 ... 600 В·А; 0 ... 1 А;
P2	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра; 0 ... 10 А; 0 ... 20 МОм

Исследуемые нагрузки на электрических схемах соединений (рис. 82, 83) получают питание от трёхфазного источника G1 через модель линии электропередачи A3, трёхполюсный выключатель A2 и регулировочный трансформатор A1. Мощность, потребляемую нагрузками, можно контролировать с помощью измерителя P1, а величину питающего напряжения – с помощью вольтметра P2.1 блока мультиметров P2.

Методические указания

Мощность статической нагрузки в общем случае зависит от напряжения U и частоты f в электроэнергетической системе.

Поэтому нагрузка может быть представлена статическими характеристиками нагрузки $P_n = \varphi(U, f)$ и $Q_n = \varphi(U, f)$.

Часто, однако, применяются характеристики $P = \varphi(U)$ и $Q = \varphi(U)$ при $f = \text{const}$, $P_n = \varphi(f)$ и $Q_n = \varphi(f)$ при $U = \text{const}$ – это так называемые статические характеристики нагрузки по напряжению и по частоте. В промышленных программах расчёта на ЭВМ электромеханических переходных процессов для описания статических потребителей используются характеристики вида

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{ст}} &= P_{\text{ст.н}} (a_0 + a_1 U_* + a_2 U_*^2 + a_3 f_*); \\ Q_{\text{ст}} &= Q_{\text{ст.н}} (b_0 + b_1 U_* + b_2 U_*^2 + b_3 f_*); \end{aligned} \right\}$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, b_3, b_2, b_1, b_0$ – коэффициенты статических характеристик по активной и реактивной мощности; $P_{\text{ст.н}}, Q_{\text{ст.н}}$ – активная и реактивная мощность статических электроустановок в исходном установившемся режиме; $U_* = \frac{U}{U_n}$, $f_* = \frac{f}{f_n}$ –

значение напряжения и частоты на шинах потребителей, отнесённые к их номинальным параметрам.

Важным показателем нагрузки для работы энергетической системы является так называемый регулирующий эффект. Под *регулирующим эффектом нагрузки* понимают явления, заключающиеся в изменении активной и реактивной мощностей нагрузки при изменении напряжения или частоты на её шинах. Численно регулирующий эффект определяют как изменения активной или реактивной мощности нагрузки на единицу изменения напряжения или частоты:

$$\left. \begin{aligned} K_{PU} &= \frac{\partial P}{\partial U} \approx \frac{\Delta P}{\Delta U}; K_{Pf} = \frac{\partial P}{\partial f} \approx \frac{\Delta P}{\Delta f}; \\ K_{QU} &= \frac{\partial Q}{\partial U} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta U}; K_{Qf} = \frac{\partial Q}{\partial f} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta f}, \end{aligned} \right\}$$

где K_{PU} , K_{Pf} – регулирующий эффект активной мощности нагрузки по напряжению и частоте, соответственно; K_{QU} , K_{Qf} – регулирующий эффект реактивной мощности нагрузки по напряжению и частоте, соответственно; ΔU , Δf – наибольшие изменения напряжения и частоты; ΔP , ΔQ – изменения активной и реактивной мощности, вызванные ΔU или Δf .

Регулирующие эффекты нагрузки достаточно правильно характеризуют изменения нагрузки при малых отклонениях напряжения и частоты. При больших изменениях U и f из-за линейности статических характеристик регулирующие эффекты нельзя использовать для оценки изменения мощностей нагрузки.

Регулирующий эффект комплексной нагрузки при изменении напряжения вблизи нормальных значений, выраженный в нормальных единицах, обычно составляет 1,5 ... 4 для реактивной мощности и 0,3 ... 1 для активной мощности.

Регулировочный эффект комплексной нагрузки при изменении частоты в области нормальных значений составляет 1 ... 3 для активной и 1 ... 6 для реактивной мощности.

Более точным является учёт нагрузки с помощью динамических характеристик по напряжению и частоте. Например:

$$P_n = \varphi_1\left(U, \frac{\partial U}{\partial t}\right); Q_n = \varphi_2\left(U, \frac{\partial U}{\partial t}\right).$$

Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что все устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания. Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника $G1$.

2. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 82). Переключатели режима работы выключателя $A2$ переведите в положение «РУЧН.».

3. Переключатели активной нагрузки $A4$ поверните против часовой стрелки до упора. При помощи короткого проводника соедините гнезда «ТК» на трёхфазном источнике питания $G1$.

4. Включите источник $G1$. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров $P2$ и включите питание используемого мультиметра.

5. Переключая отпайки регулировочного трансформатора $A1$, установите на шинах активной нагрузки $A4$ междуфазное напряжение 220 В. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» выключателя $A2$.

6. При помощи переключателей на активной нагрузке $A4$ установите такие сопротивления фаз, при которых мощность, потребляемая одной фазой нагрузки при напряжении 220 В составляет около 50 Вт (мощность контролируется по измерителю $P1$). Изменяя напряжение питания нагрузки при помощи трансформатора $A1$, записывайте показания вольтметра $P2.1$ и утроенные показания измерителя мощностей $P1$ в табл. 12.

Таблица 12

P , Вт									
U , В									

7. Аналогично снимите характеристики другой статической нагрузки – выпрямительной (рис. 83). По окончании экспериментов переключатели всех нагрузок верните в исходное положение.

8. По окончании эксперимента, нажмите кнопку «ОТКЛ» выключателя $A2$, отключите питание блока мультиметров, отключите источник $G1$ нажатием на красную кнопку – «гриб» и последующим отключением ключа-выключателя.

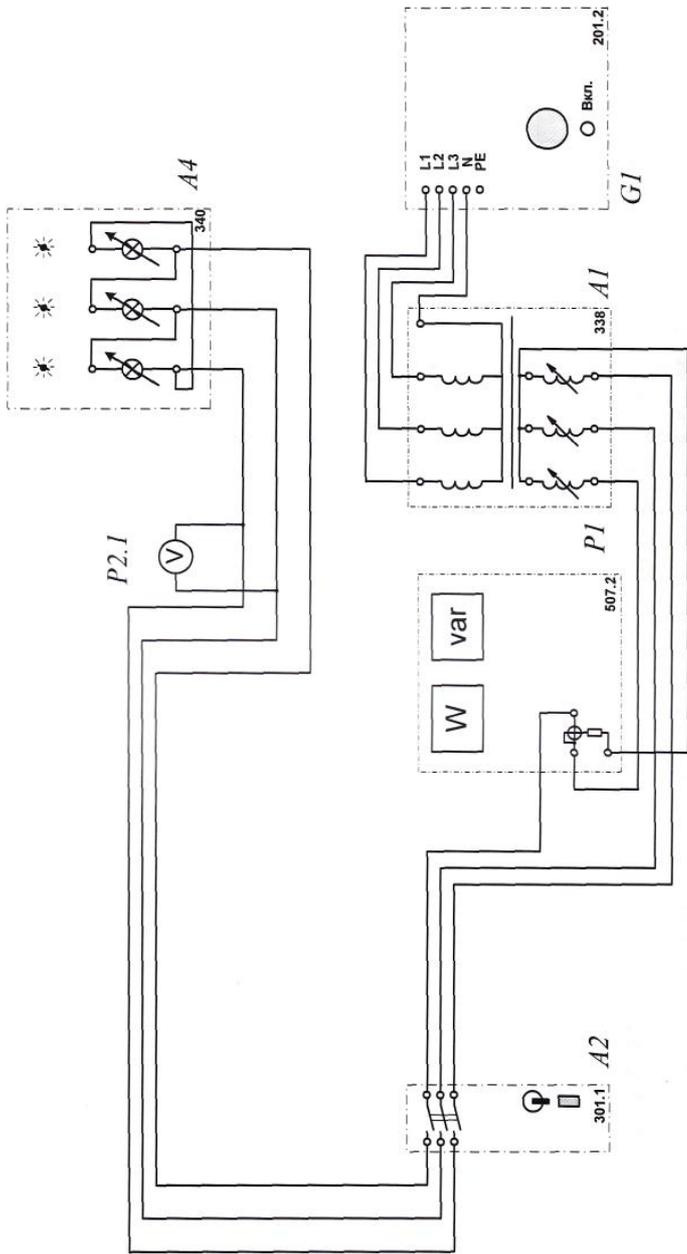


Рис. 82

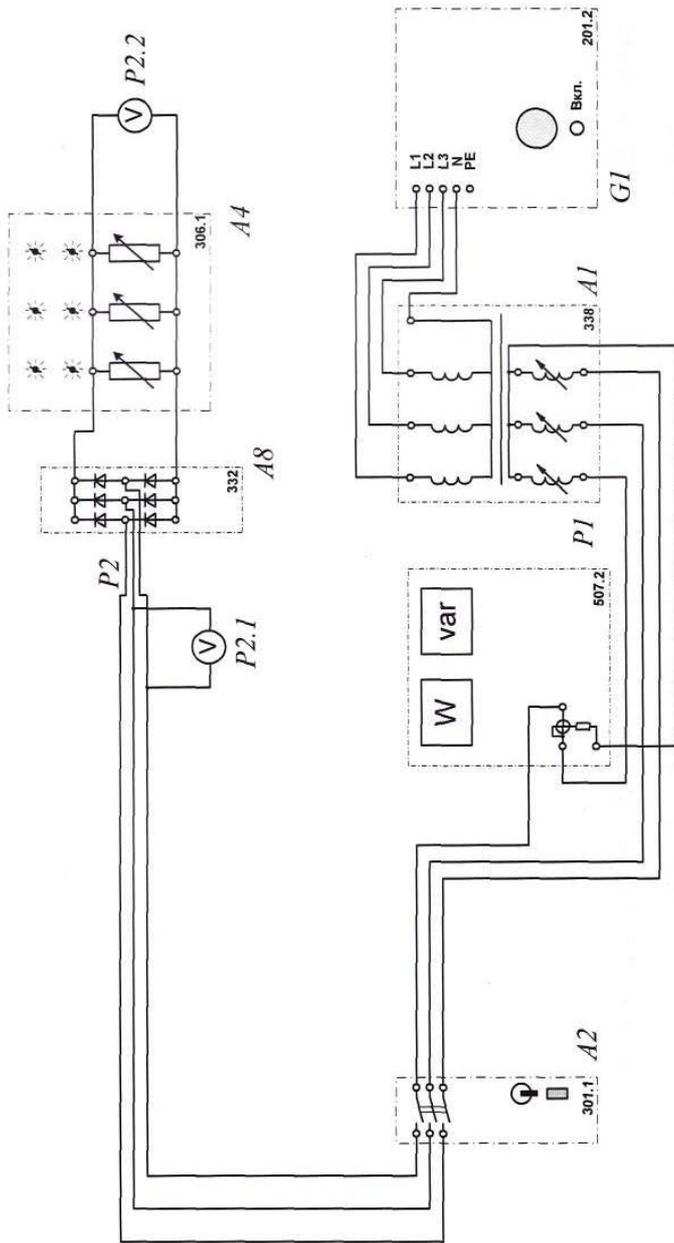


Рис. 83

9. Используя данные табл. 12, постройте статические характеристики $P = f(U)$ и $Q = f(U)$ нагрузок.
10. Для каждого интервала изменения напряжения определите регулирующие эффекты активной и реактивной мощности по напряжению, соответственно, $K_{PU} = \frac{\partial P}{\partial U}$; $K_{QU} = \frac{\partial Q}{\partial U}$ и постройте зависимости $K_{PU} = f(U, \Delta U)$ и $K_{QU} = f(U, \Delta U)$.

Контрольные вопросы

1. Как в расчётах устойчивости представляются элементы электрической сети?
2. По каким критериям оценивается статическая устойчивость комплексного узла нагрузки?
3. Какое влияние оказывают конденсаторные батареи на устойчивость нагрузки?
4. Что такое лавина напряжения и каковы наиболее существенные причины её возникновения?
5. Чем заканчивается лавина напряжения?
6. Как предотвратить лавину напряжения?
7. Каковы основные причины возникновения больших возмущений в узлах нагрузки?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
 $P(U)$, $Q(U)$ АСИНХРОННОЙ НАГРУЗКИ

Цель работы: снять статические характеристики асинхронной нагрузки; определить регулирующие эффекты активной и реактивной мощности; научиться оценивать запас устойчивости асинхронных двигателей по напряжению.

Оборудование

Обмотка возбуждения машины постоянного тока, используемой как электромагнитный тормоз $M2$, подключена к выходу источника постоянного напряжения $G2$. К этому же выходу присоединена якорная обмотка машины. Вход питания источника $G2$ присоединён с помощью электрического шнура к розетке «220 В» на тыльной стороне трёхфазного источника $G1$.

Фазы статорной обмотки двигателя $M1$ через трёхполюсный выключатель $A2$ и регулировочный трансформатор $A1$, включённый по схеме Y/Y , присоединены к гнездам трёхфазного источника $G1$. Мощность, потребляемую асинхронной нагрузкой, можно контролировать с помощью измерителя $P1$. Напряжение обмотки статора контролируется при помощи вольтметра $P3.1$. Частоту вращения агрегата можно контролировать с помощью указателя $P2$, соединённого с выходом преобразователя угловых перемещений $G3$.

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
$G1$	Трёхфазный источник питания	201.2	400 В~; 16 А
$G2$	Источник постоянного напряжения	214.1	0 ... 150 В~; 2,5 А
$G3$	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
$M1$	Асинхронный двигатель	103.1	120 Вт; 220 / 380 В; $\cos \varphi = 0,7$; 1360 мин^{-1}
$M2$	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; 220 В; 0,56 А (якорь); 220 В; 0,2 А (возбуждение)
$A1$	Регулировочный трансформатор	338	250 В·А: $3 \times 220 / 3 \times 90 \dots 140$
$A2$	Трёхполюсный выключатель	301.1	400 В~; 10 А
$P1$	Измеритель мощностей	507.2	0 ... 600 В·А, 0 ... 1 А 0 ... 600 В
$P2$	Указатель частоты вращения	506.2	2000 ... 0 ... 2000 мин"
$P3$	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0 ... 10 А; 0 ... 1000 В; 0 ... 20 МОм

Методические указания

Для анализа статической устойчивости асинхронного двигателя вновь построим зависимости электрической и механической мощностей от скольжения (рис. 84) и напряжения.

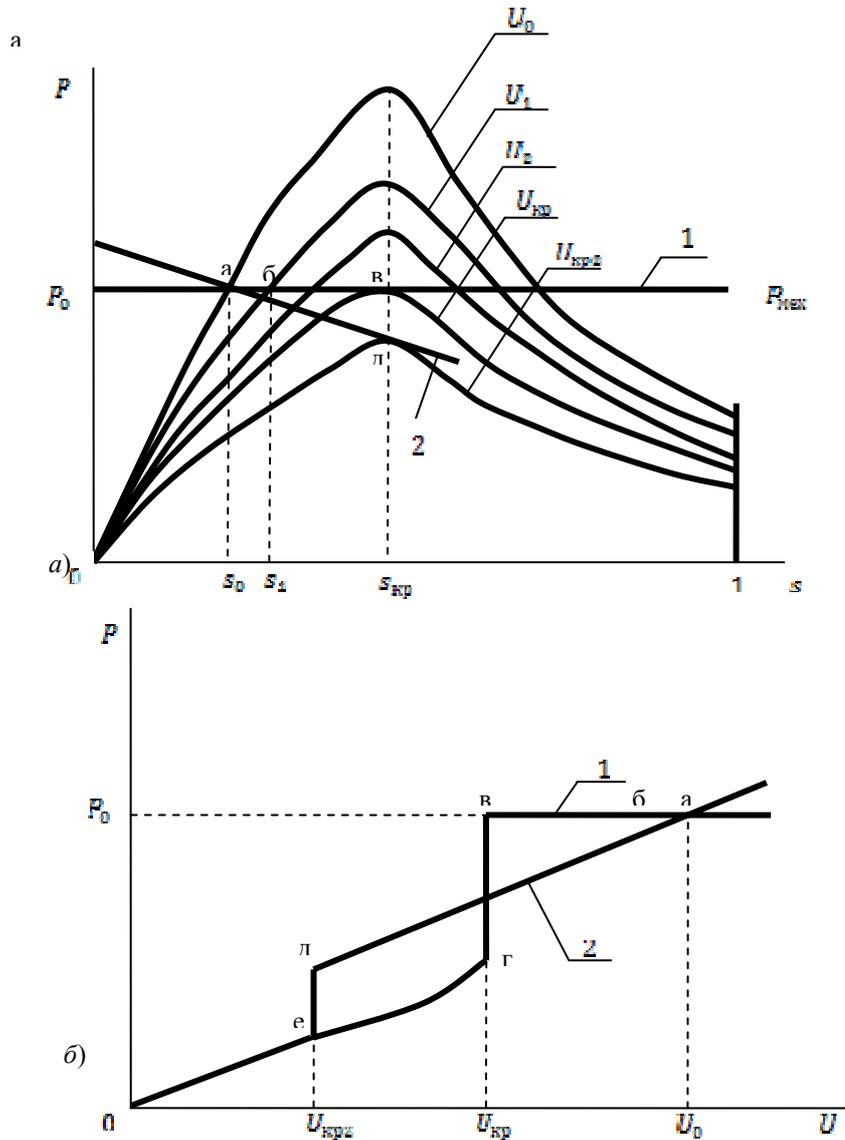


Рис. 84

Сохранение статической устойчивости асинхронного двигателя будет осуществлено не только в точке a , но и на всей восходящей части характеристики активной мощности двигателя, для которой справедливо соотношение $\frac{dP}{ds} > 0$.

Следовательно, критерием статической устойчивости асинхронного двигателя является положительный знак производной $\frac{dP}{ds} > 0$.

Нарушение устойчивой работы может быть вызвано увеличением механической мощности или снижением напряжения. Напряжение, при котором электромагнитная мощность, развиваемая двигателем, становится равной механической мощности ($P_m = P_0$), называют критическим (см. рис. 85), а его значение определяется выражением

$$U_{кр} = \sqrt{2P_0 x_s} .$$

Уровень статической устойчивости как асинхронного двигателя, так и узлов нагрузки оценивают путём расчёта коэффициента запаса по напряжению:

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} .$$

Для обеспечения устойчивости нагрузки коэффициент запаса по напряжению должен быть не менее 0,15 в нормальных и 0,1 в аварийных режимах электроэнергетических систем.

Изменение частоты в системе оказывает влияние на условия устойчивости работы асинхронных двигателей:

$$s_{кр} = \frac{r_2}{2\pi L_s f}; \quad P_m = \frac{U^2}{4\pi L_s f}; \quad U_{кр} = \sqrt{4P_0 \pi L_s f} .$$

Из полученных формул видно, что критическое скольжение, максимальная мощность у двигателя, работающего при пониженной частоте, увеличиваются, а критическое напряжение уменьшается.

Снижение частоты, таким образом, положительно влияет на условия работы двигателя. Однако полученные выводы справедливы для режимов, имеющих запасы по реактивной мощности. В условиях дефицита реактивной мощности рост потребления реактивной мощности асинхронных двигателей при снижении частоты может вызвать настолько глубокое снижение напряжения, что приведёт к нарушению устойчивости значительной части потребителей. Поэтому положительное влияние снижения частоты на устойчивость двигательной нагрузки может смениться весьма отрицательным из-за роста потребления реактивной мощности двигателями. В каждом конкретном случае необходима проверка и оценка режимов при снижениях частоты, так и напряжения.

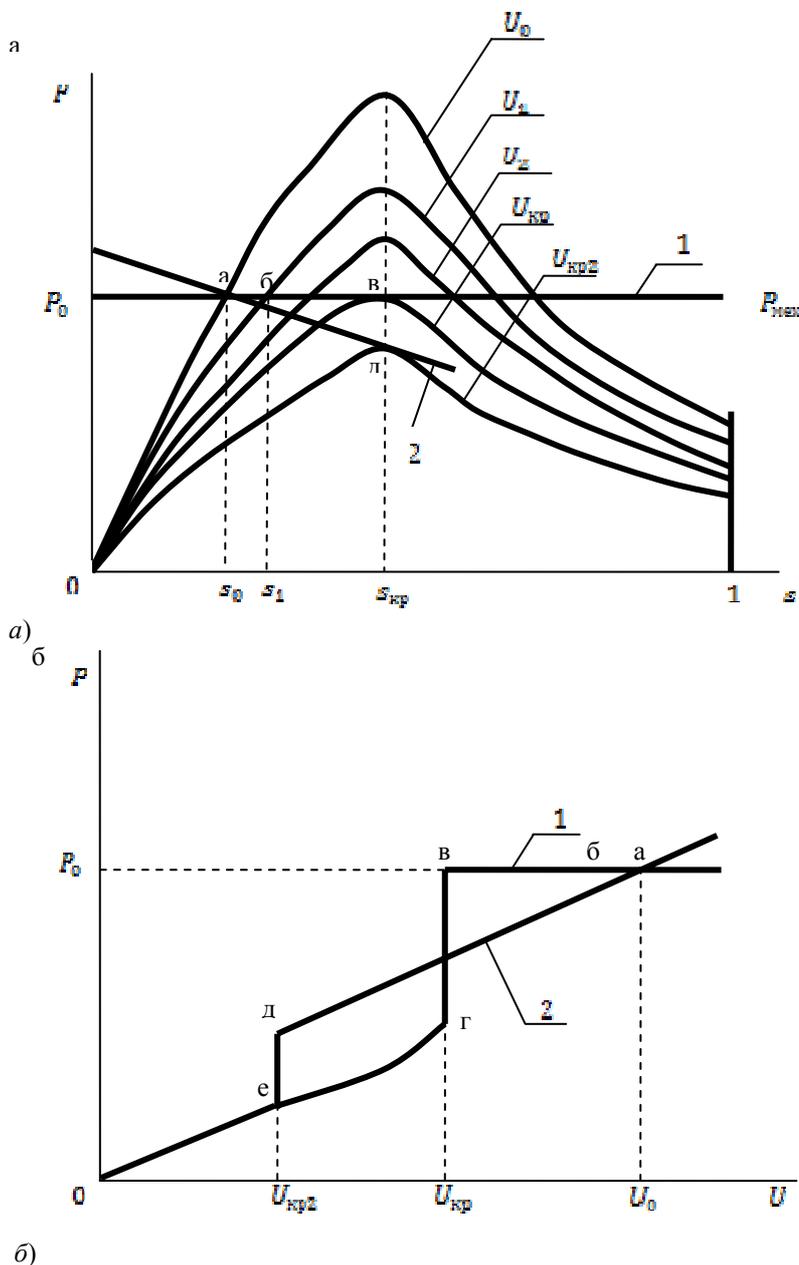


Рис. 85

Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что все устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания. Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника G1.

2. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Переключатели режима работы выключателя A2 переведите в положение «РУЧН.» При помощи короткого проводника соедините гнезда «ТК» на трёхфазном источнике питания G1 (рис. 86).

3. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P3 и включите питание мультиметра. Переключая отпайки регулировочного трансформатора A1, установите на шинах нагрузки междуфазное напряжение 220 В.

4. Включите выключатель «СЕТЬ» указателя $P2$. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» выключателя $A2$. Обратите внимание на направление вращения агрегата – для проведения эксперимента необходимо левое вращение. Если же оно правое, то необходимо поменять местами любые два фазных провода, идущих к асинхронному двигателю.

5. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» источника $G2$. Плавно увеличивайте его выходное напряжение до тех пор, пока частота вращения агрегата не снизится до 1360 об/мин при напряжении питания асинхронного двигателя 220 В. Это – номинальный режим работы двигателя. Изменяя напряжение питания двигателя при помощи трансформатора $A1$, записывайте в табл. 13 показания измерителя мощностей $P1$ и вольтметра $P3.1$.

Если асинхронный двигатель при уменьшении напряжения остановится (опрокинется), то необходимо уменьшать выходное напряжение источника $G2$ до тех пор, пока асинхронный двигатель не начнёт вновь увеличивать свою частоту вращения.

Снятие статических характеристик асинхронной нагрузки производите по возможности быстрее, во избежание излишнего нагрева машины постоянного тока, работающей в тормозном режиме. Кроме того, при нагреве изменяется активное сопротивление обмоток, что может негативно повлиять на точность полученных результатов.

6. По окончании эксперимента уменьшите до нуля выходное напряжение источника $G2$, отключите его сетевой выключатель, нажмите кнопку «ОТКЛ» выключателя $A2$, отключите питание блока мультиметров, отключите источник $G1$ нажатием на красную кнопку – «гриб» и последующим отключением ключа-выключателя.

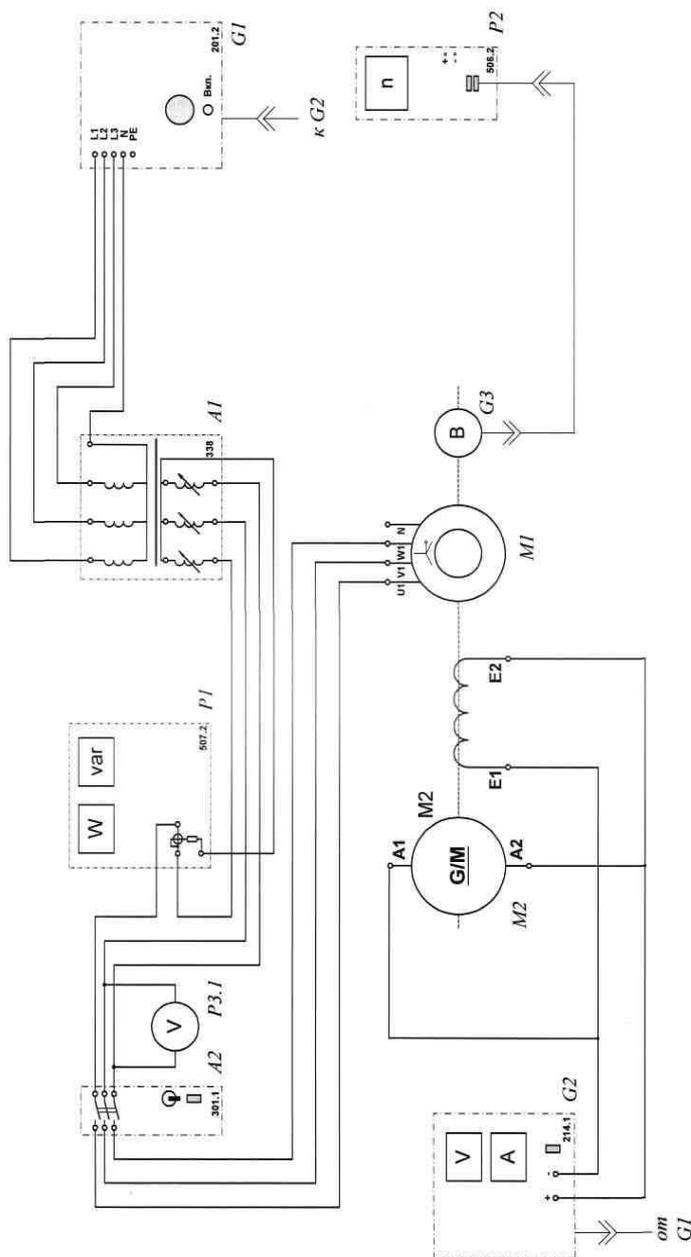


Рис. 86

Таблица 13

U , В									
P , Вт									
Q , вар									

- Используя данные табл. 13, постройте статические характеристики $P = f(U)$ и $Q = f(U)$ асинхронной нагрузки.
- Для каждого интервала изменения напряжения определите регулирующие эффекты активной и реактивной мощности по напряжению соответственно K_{PU} и K_{QU} и постройте зависимости $K_{PU} = f(U, \Delta U)$ и $K_{QU} = f(U, \Delta U)$.
- По данным работы определить коэффициенты запаса устойчивости асинхронных двигателей по напряжению.

Контрольные вопросы

- Что представляют собой статические характеристики асинхронного двигателя?
- По каким критериям оценивается статическая устойчивость асинхронного двигателя?
- Как определяется коэффициент запаса по напряжению?
- Какое влияние оказывает изменение частоты на условия устойчивой работы асинхронных двигателей?
- Как оценивается динамическая устойчивость двигателей при изменении напряжения?
- Как определить предельное время перерыва питания по условию сохранения устойчивости двигателей?
- Как рассчитать устойчивость двигателей при набросах на-грузки?
- Что такое самозапуск двигателей?
- На какие периоды может быть разделен переходный процесс при кратковременных нарушениях электроснабжения потребителей с учётом самозапуска?
- В чём заключается расчёт самозапуска двигателей?

Лабораторная работа 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

Цель работы: оценить влияние защитного заземления на опасность поражения током в электроустановках, питающихся от трёхфазных трёхпроводных сетей с изолированной нейтралью и от трёхфазных пятипроводных сетей с заземлённой нейтралью напряжением до 1кВ.

Оборудование

Стенд представляет собой настольную конструкцию с вертикальной передней панелью. На лицевой панели стенда (рис. 87) изображена мнемосхема системы «электрическая сеть – потребители», которая содержит изображение источника питания (трёхфазная сеть), фазных и защитных проводников, электропотребителей: полуактивного (корпус 1), активного (корпус 2) и пассивного (корпус 3). Подключение корпусов 1 и 2 к РЕ-проводнику (зануление) или к заземляющим устройствам осуществляется путём соединения гибким проводом со штеккерами клемм X_1 или X_1 с одной из соответствующих клемм X_{PE1} , X_{PE2} или X_{3M1} , X_{3M2} . Реально существующие распределенные сопротивления изоляции проводов (фазных и нулевого) относительно земли изображены на мнемосхеме в виде сосредоточенных элементов – резисторов, расположенных справа (R_{AE} , R_{BE} , R_{CE} , R_{NE}).

Методические указания

На поле мнемосхемы, рядом с изображениями элементов моделируемой сети, размещены коммутационные элементы и регуляторы с соответствующими буквенно-цифровыми обозначениями, выполняющими следующие функции:

- изменение значений фазных напряжений U_{ϕ} в диапазоне $220 \text{ В} \pm 10\%$ (не является необходимым средством для проведения лабораторных работ; может применяться для исключения получения одинаковых результатов разными группами студентов);
- изменение значений сопротивления изоляции проводов R_{AE} , R_{BE} , R_{CE} , R_{NE} : 1; 5; 10; 20 кОм, имитацию подключения автоматическими выключателями активного (корпус 2) и полуактивного (корпус 1) потребителей кнопками без фиксации с индикацией, соответственно S_2 и S_1 . При нажатии на эти кнопки потребитель считается включённым, о чём свидетельствует загорание соответствующего светодиода внутри кнопки; при отжатии, либо при срабатывании защиты корпуса, либо по нажатию кнопки «СБРОС» потребитель отключается от сети, и соответствующий светодиод гаснет. Корпус 3 является пассивным и изображён как однофазный потребитель;

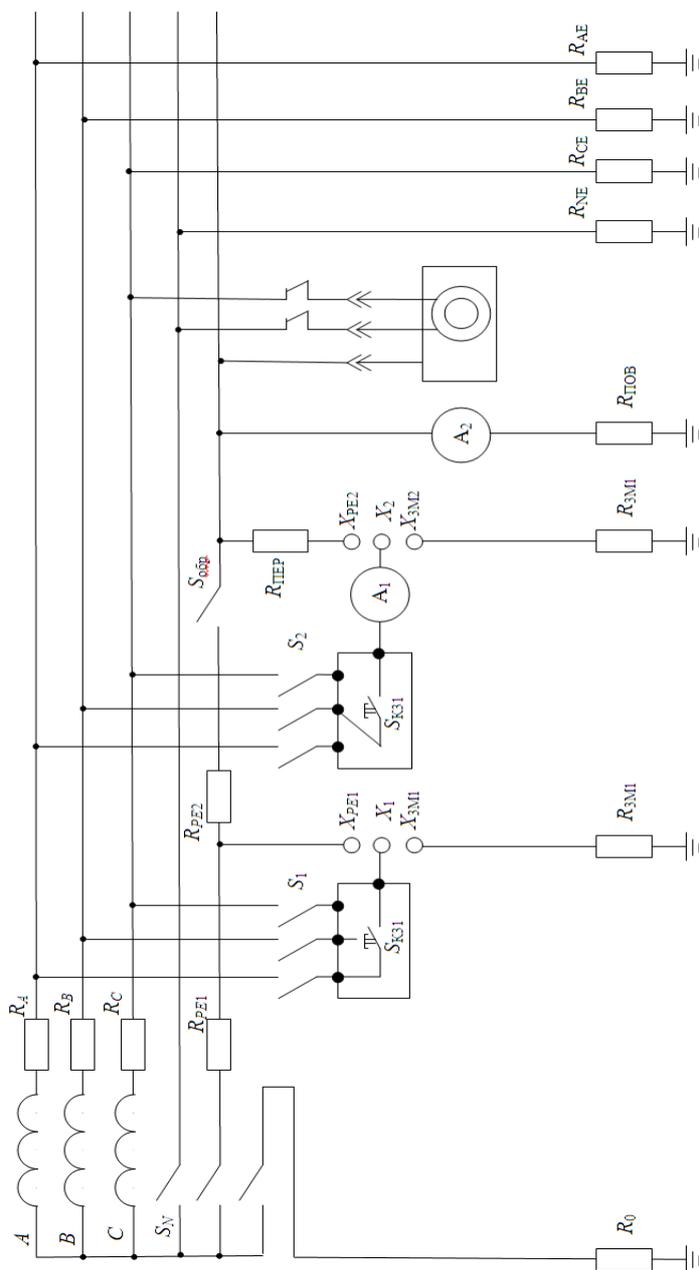


Рис. 87

- имитацию замыкания корпусов 1 и 2 на фазы соответственно А и В нажатием кнопок с фиксацией и индикацией S_{K31} и S_{K32} . О замыкании корпуса при нажатии кнопки свидетельствует загорание соответствующего светодиода, при отжатии кнопки происходит размыкание корпуса от фазы, и светодиод внутри кнопки гаснет;
 - изменение значений сопротивлений PE-проводника R_{PE} : 0,1, 0,2 и 0,5 Ом (сопротивления участков «нейтраль – корпус 1» и «корпус 1 – корпус 2» условно считаются равными);
 - изменение значений переходного сопротивления между корпусом 2 и зануляющим проводником $R_{пер}$: 0; 0,1 и 0,5 Ом;
 - изменение значений сопротивления заземления корпуса 2 $R_{ЗМ2}$: 4; 10; 100 Ом;
 - изменение значений сопротивления повторного заземления $R_{пов}$: 4; 10; 100 Ом; значение $R_{пов} = \infty$ означает отсутствие повторного заземления;
 - имитацию обрыва PE-проводника тумблером $S_{обр}$ при переводе его в нижнее положение;
 - переключение режима нейтрали «глухозаземлённая (переключатель S_N в верхнем положении) – изолированная» (переключатель S_N в нижнем положении) с одновременным подключением (отключением) PE- и N-проводников (S_N).
- Сопротивления заземления нейтрали R_0 и заземления корпуса 1 $R_{ЗМ1}$ установлены постоянными и равными 4 Ом. Сопротивления фазных проводов R_A, R_B, R_C установлены постоянными и равными 0,1 Ом по каждой фазе, распределены равномерно на двух участках проводника – от нейтральной точки до корпуса 2 и после корпуса 2; на мнемосхеме изображены пунктиром.
- Реальные уровни напряжений на доступных прикосновению частях стенда составляют не более 3 В и не представляют опасности поражения электрическим током.

Индикация токов (амперметр) и напряжений (вольтметр) в моделируемой трёхфазной сети, а также времени срабатывания автоматического выключателя корпуса 2 (секундомер) осуществляется цифровыми индикаторами в нижней части стенда. Срабатывание автоматического выключателя корпуса 2 и соответствующая индикация времени срабатывания происходят при токах свыше 200 А.

По принципу работы стенд является цифровым микропроцессорным устройством, вычисляющим по соответствующим формулам параметры сети в зависимости от комбинаций коммутационных элементов на передней панели стенда. Результаты вычислений выводятся на цифровые индикаторы. Индикаторы отображают «измеренные» (вычисленные) значения параметров по нажатию кнопки «ИЗМЕРЕНИЕ», расположенной справа в нижней части передней панели; показания сбрасываются нажатием кнопки «СБРОС», расположенной там же. Стенд устроен таким образом, что позволяет длительно сохранять режим замыкания фазных проводов на корпуса электропотребителей 1 и 2 и полученные при этом результаты измерений исследуемых параметров.

Как только корпус 2 является активным, т.е. работающим при всех экспериментах, работа стенда осуществляется только при условии включения корпуса 2 и замыкания на землю фазы В (кнопка с фиксацией и индикацией $S_{к32}$). Если будет попытка произвести измерение при несоблюдении этого условия, на цифровых индикаторах высветится цифра 2, (напоминание о необходимости подключить и «закоротить» корпус 2).

Порядок выполнения работы

1. Исследовать эффективность защитного заземления корпуса электропотребителя, питающегося от трёхфазной трёхпроводной сети с изолированной нейтралью.

1.1. Включить стенд, переведя тумблер "ВКЛ-ВЫКЛ" в верхнее положение: при этом должны загореться светодиодные индикаторы наличия фазных напряжений на мнемосхеме передней панели.

1.2. Привести стенд в исходное состояние: нажать кнопку "СБРОС": при этом сбрасываются значения предыдущего состояния стенда. Нажать кнопки S_2 , $S_{к32}$. Регулятором напряжения сети U_ϕ подобрать заданное преподавателем значение, для чего, повернув его рукоятку на некоторый угол в нужную от среднего положения сторону (значения U_ϕ изменяются в пределах $220 \text{ В} \pm 10\%$), нажать кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ» и наблюдать на цифровом табло вольтметра значение U_ϕ при соответствующем положении переключателя « $U_\phi-U_0-U_1-U_2-U_3-U_A-U_B-U_C$ » (в данном случае – крайнее левое положение). Корректировать положение регулятора, повторяя этот процесс до получения заданного значения, после чего рукоятку U_ϕ не трогать во избежание изменения значения U_ϕ . После каждого нажатия кнопки «СБРОС» не забывать включать корпус 2 (кнопка S_2).

1.3. Моделировать трёхфазную трёхпроводную сеть с изолированной нейтралью, установив переключатель S_N в нижнее положение.

1.4. Переключателем S_{RE} установить заданные преподавателем сопротивления изоляции проводов относительно земли (например, $R_E = 20 \text{ кОм}$).

1.5. Присоединить электропотребитель 2 к сети, нажав кнопку S_2 . Замкнуть фазный провод В на корпус 2, нажав кнопку $S_{к32}$. Убедиться, что на кнопках S_2 и $S_{к32}$ горят светодиодные индикаторы.

1.6. Нажать кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ».

1.7. Измерить вольтметром значения напряжения относительно земли корпуса 2, а также фазных проводов А, В и С, для чего последовательно переводить рукоятку вольтметра в положения U_2 , U_A , U_B , U_C . Полученные значения напряжений занести в табл. 14.

1.8. Нажать кнопку «СБРОС».

1.9. Переключателем $S_{R_{3M2}}$ установить заданное преподавателем значение сопротивления R_{3M2} заземляющего устройства (например, $R_{3M2} = 4 \text{ Ом}$).

1.10. Заземлить корпус 2, для чего гибкий провод, снабженный наконечниками, подсоединить к клеммам X_2 и X_{3M2} .

1.11. Присоединить электропотребитель 2 к сети, нажав кнопку S_2 . Убедиться, что на кнопках S_2 и $S_{к32}$ горят светодиодные индикаторы.

1.12. Измерить ток, стекающий в землю через заземляющее устройство, установив переключатель амперметра в положение A_1 . Полученное значение тока записать в табл. 14.

1.13. Измерить вольтметром значения напряжений относительно земли корпуса 2, а также фазных проводов А, В и С, для чего последовательно переводить рукоятку вольтметра в положения U_2 , U_A , U_B , U_C . Полученные значения напряжений занести в отчёт о лабораторной работе.

Сделать вывод об опасности прикосновения человека к корпусу электропотребителя в случае замыкания на него фазного провода при отсутствии и наличии защитного заземления. Отметить при этом влияние защитного заземления на напряжение фазных проводов сети относительно земли.

2. Исследовать напряжение на заземлённом корпусе электропотребителя в зависимости от сопротивления его заземляющего устройства в сети с изолированной нейтралью.

2.1. Выполнить указания пп. 1.2 – 1.5 и 1.10 (если предварительно выполнялось задание № 1, то следует только проверить соответствие положений коммутационных элементов указаниям перечисленных пунктов).

2.2. Устанавливая последовательно переключателем $S_{R_{3M2}}$ значения сопротивления заземляющего устройства $R = 4, 10$ и 100 Ом , каждый раз производить измерение напряжения на корпусе 2 относительно земли (положение рукоятки вольтметра U_2), нажимая кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ». При этом необходимо убеждаться каждый раз, что на кнопках S_2 и $S_{к32}$ горят светодиодные индикаторы, (т.е. корпус 2 подключён к сети и закорочен), в противном случае выполнить требования п. 1.11. Полученные значения напряжения U_2 записать в табл. 14.

2.3. Измерить ток, стекающий в землю через заземляющее устройство при $R_{3M2} = 4, 10$ и 100 Ом . Полученные значения тока занести в отчёт.

- 2.4. Нажать кнопку «СБРОС».
- 2.5. Проанализировать зависимость опасности поражения электрическим током от сопротивления заземляющего устройства в случае прикосновения человека к заземленному корпусу.
3. Оценить опасность поражения током при одновременном замыкании разных фаз сети с изолированной нейтралью на корпуса электропотребителей, имеющих отдельные заземляющие устройства.
- 3.1. Проверить соответствие состояния стенда требованиям пп. 1.2 – 1.4.
- 3.2. Подключить корпуса 1 и 2 к заземляющим устройствам путём соединения гибкими проводами со штеккерами клеммы X_1 с клеммой X_{3M1} , а клеммы X_2 с клеммой X_{3M2} .
- 3.3. Присоединить электропотребители – корпуса 1 и 2 к сети, нажав кнопки S_1 и S_2 , при этом должны загореться соответствующие этим кнопкам светодиоды. Замкнуть фазный провод B на корпус 2, нажав кнопку $S_{кз2}$, а фазный провод A на корпус 1, нажав кнопку $S_{кз1}$, при этом также должны загореться соответствующие этим кнопкам светодиоды.
- 3.4. Переключателем $S_{R_{3M2}}$ установить значение сопротивления заземляющего устройства корпуса 2 $R_{3M2} = 4$ Ом.
- 3.5. Нажав кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ», произвести замыкание фазных проводов A и B соответственно на корпуса 1 и 2; измерить напряжения корпусов 1 и 2 относительно земли, для чего перевести рукоятку вольтметра в положения соответственно U_1 и U_2 . Полученные значения напряжения записать в табл. 14.
- 3.6. Измерить ток, стекающий в землю через заземляющее устройство корпуса 2, при положении A_1 переключателя амперметра.
- 3.7. Повторно последовательно выполнить задание при значениях $R_{3M2} = 10$ и 100 Ом.
- 3.8. Оценить опасность косвенного прикосновения в случае двойного замыкания фаз на заземлённые корпуса и её зависимость от сопротивления заземляющего устройства.
- 3.9. Нажать кнопку СБРОС.
4. Исследовать влияние защитного заземления на опасность поражения током при замыкании фазы на корпус электропотребителя, питающегося от трёхфазной пятипроводной сети с заземлённой нейтралью.
- 4.1. Выполнить указание п. 1.2.
- 4.2. Заземлить нейтраль источника питания, подключить к нему N и PE – проводники, для чего установить переключатель S_N в верхнее положение.
Переключатель установить в положение «∞».
- 4.3. Выполнить указания пп. 1.9, 1.10, 1.4, 1.5.
- 4.4. Нажать кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ».
- 4.5. Измерить, руководствуясь указаниями п. 1.7, напряжения относительно земли корпуса 2, нейтральной точки источника питания, проводов сети A, B, C, N . Результаты измерения занести в табл. 14.
- 4.6. Измерить ток, стекающий на землю через заземляющее устройство, установив переключатель амперметра в положение A_1 .
- 4.7. Выключить стенд, переведя тумблер "ВКЛ-ВЫКЛ" в нижнее положение; при этом должны погаснуть светодиодные индикаторы наличия фазных напряжений на мнемосхеме передней панели.
- 4.8. Оценить в выводе эффективность применения защитного заземления в сетях с заземлённой нейтралью.

Таблица 14

R_{3M2} , Ом	U_2 , В	U_1 , В	I_{3M} , А
4			
10			
100			

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать обработанные результаты измерений в виде табл., принципиальные схемы, поясняющие сущность выполненных экспериментов, а также заключение, обобщающее выводы по каждому разделу проведённых исследований.

Таблица 15

R , Ом	U_2 , В	U_A , В	U_B , В	U_C , В	I_{3M} , А
Без заземления					
С заземлением	4				
	10				
	100				

Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняет защитное заземление?
2. Каким образом защитное заземление выполняется в реальных действующих установках?
3. Можно ли использовать естественные заземлители и в наших случаях?
4. В каких пределах устанавливаются значения сопротивления заземления для различных электропотребителей у электроустановок?
5. Какие материалы и формы искусственных заземлителей используются?
6. Укажите порядок расчета защитного заземления.
7. Что такое напряжение прикосновения и шаговое напряжение? Приведите примеры их возникновения.
8. Приведите сравнительный анализ 3-, 4-, 5-проводной трехфазной сети в плане опасности поражения электрическим током?
9. Какая буквенная и цифровая маркировка используется в трёхфазных цепях?

Лабораторная работа 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО ЗАНУЛЕНИЯ

Цель работы: исследовать действие системы защитного зануления металлических нетоковедущих частей электропотребителей, могущих оказаться под напряжением, питающихся от трёхфазной пятипроводной сети с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ.

Оборудование

Описание стенда, на котором проводится данная лабораторная работа, и методические указания приведены в лабораторной работе 9 (см. рис. 87).

Порядок выполнения работы

1. Исследовать функционирование защитного зануления без повторного заземления PE-проводника. Оценить время срабатывания автоматических выключателей, ток короткого замыкания, напряжение зануленных корпусов 1, 2, 3 и нулевой точки источника питания относительно земли в зависимости от сопротивления петли «фаза-нуль», образующейся при замыкании фазного провода на корпус 2.

1.1. Включить стенд, переведя тумблер «ВКЛ-ВЫКЛ» в верхнее положение.

1.2. Привести стенд в исходное состояние: нажать кнопку «СБРОС»; при этом сбрасываются значения предыдущего состояния стенда. Нажать кнопки S_2 , $S_{кз2}$. Регулятором напряжения сети U_ϕ подобрать заданное преподавателем значение, для чего, повернув его рукоятку на некоторый угол в нужную от среднего положения сторону (значения U_ϕ изменяются в пределах $220 \text{ В} \pm 10\%$), нажать кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ» и наблюдать на цифровом табло вольтметра значение U_ϕ при соответствующем положении переключателя « $U_\phi-U_0-U_1-U_2-U_3-U_A-U_B-U_C$ » (в данном случае – крайнее левое положение). Корректировать положение регулятора, повторяя этот процесс до получения заданного значения, после чего рукоятку U_ϕ не трогать во избежание изменения значения U_ϕ . После каждого нажатия кнопки «СБРОС» не забывать включать корпус 2 (кнопка S_2).

1.3. Моделировать трехфазную пятипроводную сеть с заземленной нейтралью, включить переключатель S_N . Переключатель S_{RE} установить в положение 20 кОм.

1.4. Присоединить корпуса 1 и 2 к PE – проводнику путём соединения гибкими проводами со штеккерами клеммы X_1 с клеммой X_{PE1} , а клеммы X_2 с клеммой X_{PE2} .

1.5. Установить переключателями S_{RPE} и $S_{Rпер}$ значения $R_{PE} = 0,1 \text{ Ом}$ и $R_{Rпер} = 0$ соответственно, переключатель $S_{Rобв}$ установить в верхнее положение, а переключатель $S_{Rпов}$ в положение « ∞ ».

1.6. Подключить электропотребители 1 и 2 к фазным проводам сети, нажав кнопки S_1 и S_2 , при этом должны загореться соответствующие этим кнопкам светодиоды.

1.7. Установить переключатель амперметра в положение A_1 .

1.8. Замкнуть фазный провод B на корпус 2, зафиксировав кнопку $S_{кз2}$ в нажатом положении (при этом кнопка $S_{кз1}$ должна находиться в отжатом положении), затем нажать кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ».

1.9. При срабатывании автоматов S_1 или S_2 соответствующие им светодиодные индикаторы гаснут. Продолжающий гореть светодиод свидетельствует о недостаточности тока для срабатывания автомата. Записать показания цифровых индикаторов амперметра и миллисекундомера в отчёт о лабораторной работе.

1.10. Измерить напряжения относительно земли корпусов 1, 2, 3 и нулевой точки источника питания соответственно, для чего последовательно переводить рукоятку вольтметра в положения U_1 , U_2 , U_3 , U_0 . Полученные значения напряжения записать в табл. 16.

1.11. Нажать кнопку «СБРОС».

1.12. Устанавливая переключателем S_{RPE} значения $R_{PE} = 0,2$ и $0,5 \text{ Ом}$, каждый раз измерять время срабатывания автоматического выключателя, ток короткого замыкания и напряжения, указанные в п. 1.10, выполняя указания п.п. 1.6 – 1.11.

1.13. Оценить время срабатывания автоматического выключателя, ток короткого замыкания, напряжения относительно земли занулённых корпусов 1, 2, 3 и нулевой точки источника питания в зависимости от переходного сопротивления $R_{пер}$ петли «фаза-нуль», образующейся при замыкании фазного провода на корпус 2.

1.14. Установить переключателем $S_{R_{PE}}$ заданное преподавателем значение R_{PE} , которое должно оставаться в процессе эксперимента постоянным (например, $R_{PE} = 0,1$ Ом).

1.15. Измерить время срабатывания автоматического выключателя, ток короткого замыкания, напряжения относительно земли корпусов 1, 2, 3 и нулевой точки источника питания, устанавливая переключателем $SR_{пер}$ последовательно значения $R_{пер} = 0,1$ и $0,5$ Ом. При каждом значении $R_{пер}$ выполнить указания пп. 1.6 – 1.11. Результат измерений занести в табл. 16.

1.16. Сделать вывод о характере зависимости исследуемых параметров от сопротивлений R_{PE} и $R_{пер}$ петли «фаза-нуль» при отсутствии повторного заземления PE -проводника.

2. Исследовать влияние повторного заземления PE -проводника на уровень обеспечения электробезопасности при применении защитного зануления.

2.1. Измерить напряжения относительно земли занулённых корпусов 1, 2, 3 и нулевой точки источника питания, а также ток короткого замыкания и время срабатывания автомата защиты при замыкании фазы B на корпус 2 с повторным заземлением, оценив при этом влияние сопротивления $R_{пов}$ на исследуемые параметры.

2.2. Установить переключателями SR_{PE} на $S_{R_{пер}}$ значения $R_{PE} = 0,1$ Ом и $R_{пер} = 0$ соответственно, переключатель $SR_{обр}$ установить в верхнее положение. Переключателем $S_{R_{пов}}$ установить значение $R_{пов} = 4$ Ом.

2.3. Выполнить повторно указания пп. 1.6 – 1.10 задания № 1.

2.4. Измерить ток, стекающий на землю через повторный заземлитель, установив переключатель амперметра в положение A_2 . Полученное значение тока записать в отчёт о лабораторной работе.

2.5. Нажать кнопку «СБРОС».

2.6. Установить переключателем $S_{R_{пов}}$ поочередно значения $R_{пов} = 10$ и 100 Ом. При каждом значении $R_{пов}$ выполнить указания пп. 1.2 – 1.4.

3. Измерить напряжение занулённых корпусов 1, 2 и 3 и нулевой точки источника питания в случае обрыва PE -проводника между корпусами 1 и 2 и замыкании фазы B на корпус 2 вначале без повторного заземления PE -проводника, а затем с повторным заземлением, оценив при этом влияние сопротивления повторного заземления $R_{пов}$ на исследуемые напряжения и ток, стекающий в землю.

3.1. Отсоединить повторный заземлитель от PE -проводника, переведя рукоятку переключателя $S_{R_{пов}}$ в положение «∞».

3.2. Произвести обрыв PE -проводника, установив рукоятку переключателя $S_{R_{пов}}$ в соответствующее положение.

3.3. Выполнить указания пп. 1.6, 1.8, 1.10, 1.11 задания № 1.

3.4. Присоединить повторный заземлитель к PE -проводнику: переключателем $S_{R_{пов}}$ установить значение $R_{пов} = 4$ Ом.

3.5. Выполнить повторно указания пп. 1.6, 1.8, 1.10 задания № 1, а также п. 1.3 задания № 2.

3.6. Установить переключателем $SR_{пов}$ последовательно значения $R_{пов} = 10$ и 100 Ом. При каждом значении $R_{пов}$ выполнить измерения исследуемых напряжений и тока.

3.7. Выключить стенд, переведя тумблер «ВКЛ-ВЫКЛ» в нижнее положение; при этом должны погаснуть светодиодные индикаторы наличия фазных напряжений на мнемосхеме передней панели.

Таблица 16

$R_{з\text{м}2}, \text{Ом}$	$U_2, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$I_{з\text{м}}, \text{А}$
4			
10			
100			

Таблица 17

$R_{з\text{м}2}, \text{Ом}$	$U_2, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$I_{з\text{м}}, \text{А}$
4			
10			
100			

4. Сделать вывод о характере влияния повторного заземления PE -проводника и сопротивления $R_{пов}$ на напряжения занулённых корпусов 1, 2, 3 и нулевой точки источника питания при замыкании фазного провода на корпус 2 при нормальном состоянии PE -проводника и в случае его обрыва.

Содержание отчёта

Представить в виде таблиц обработанные результаты измерений, привести принципиальные схемы, поясняющие сущность выполненных экспериментов. Сделать заключение, обобщающее выводы по разделам выполненной работы.

Контрольные вопросы

1. Каким образом выполняется защитное зануление?
2. Каковы функции защитного заземления?
3. Влияет ли защитное зануление на снижение опасности поражения электрическим током?
4. Проведите сравнительный анализ эффективности работы защитного зануления и заземления в плане повышения надёжности и безопасности трёхфазных электрических сетей.
5. Укажите варианты соединения защитного зануления и заземления с электроприёмниками.

Лабораторная работа 11

АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ В ТРЁХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

Цель работы: исследовать опасность прикосновения человека к фазному проводу электрической сети напряжением до 1 кВ в её нормальном и аварийном состояниях в зависимости от режима нейтрали источника питания сети, активного сопротивления изоляции и ёмкости проводов относительно земли, а также сопротивления в цепи тела человека.

Оборудование

Стенд представляет собой настольную конструкцию с вертикальной передней панелью. Реально существующие распределённые сопротивления изоляции и ёмкости проводов (фазных и нулевого) относительно земли изображены на мнемосхеме в виде сосредоточенных элементов-резисторов и конденсаторов, расположенных слева вне зоны защиты УЗО. Трёхфазный электропотребитель показан на мнемосхеме в виде корпуса, подключённого к сети через УЗО, реагирующего на дифференциальный ток (рис. 88).

Методические указания

В изображении человека помещён светодиодный индикатор, сигнализирующий о превышении предельно допустимого длительного тока через человека.

На поле мнемосхемы, рядом с изображениями элементов моделируемой сети, размещены коммутационные элементы и регуляторы с соответствующими буквенно-цифровыми обозначениями, выполняющими следующие функции:

- изменение значений сопротивления изоляции проводов вне зоны защиты ($R_{AE}, R_{BE}, R_{CF}, R_{PEN}$): 1; 2,5; 10; 25; 100: ∞, кОм и ёмкости проводов ($C_{AE}, C_{BE}, C_{CE}, C_{PEN}$): 0; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5 мкФ;
- имитацию прикосновения человека к токоведущим проводам сети или к проводу сети на стороне трёхфазного потребителя, подключённого к сети через УЗО, путём соединения гибким проводом со штеккерами клеммы $X_{\text{пд}}$ с одной из клемм X_A, X_B, X_C или X_{AK} ;
- имитацию замыкания одного из фазных проводов на землю (S_{K3}), при этом положение «0» соответствует нормальному режиму работы сети;
- изменение значений сопротивления тела человека ($R_{\text{ч}}$): 1 – 100 кОм;
- изменение значений сопротивления замыкания фазного провода на землю (R_{3M}): 10; 100; 1000 Ом.

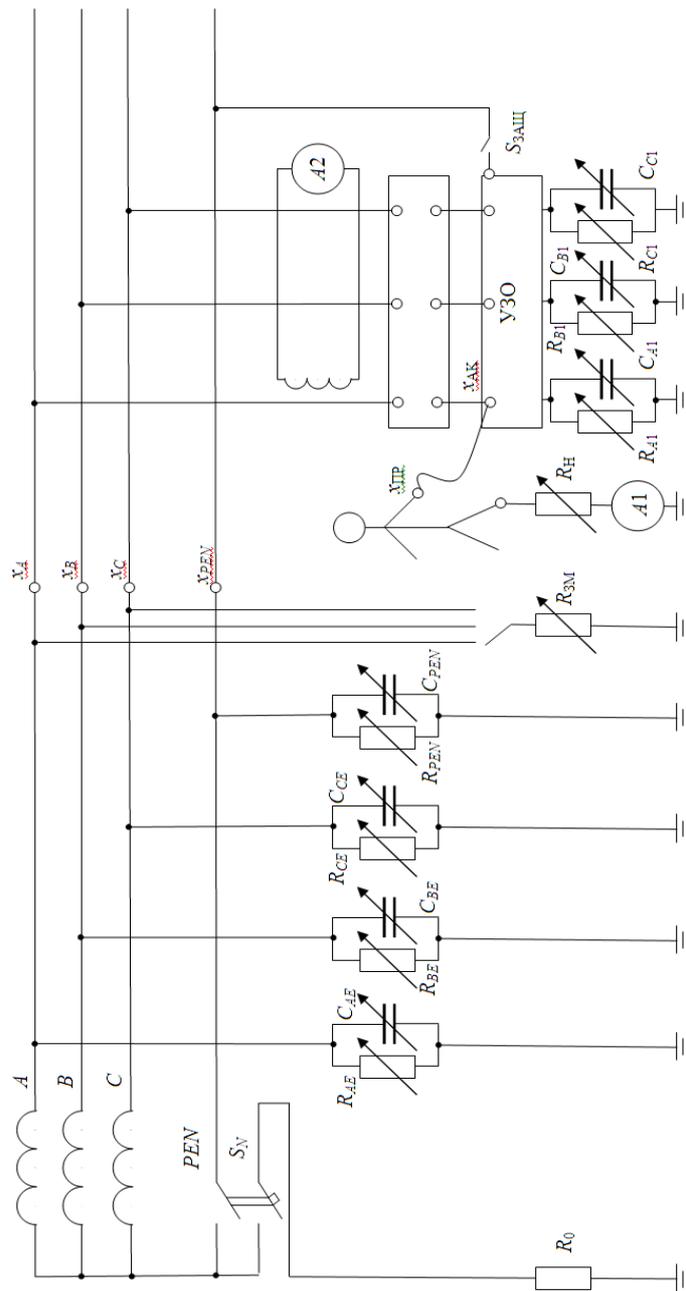


Рис. 88

– управление УЗО (кнопки «ПУСК», «СТОП», по которым производится включение-выключение УЗО, и «КОНТРОЛЬ», по которой одновременно с нажатием кнопки «ИЗМЕРЕНИЕ» производится оперативный контроль УЗО), подключение корпуса электропотребителя к нулевому проводу ($S_{зашщ}$):

– имитация замыкания фазного провода электропотребителя на корпус ($S_{кз. к.}$, одновременно с нажатием кнопки «ИЗМЕРЕНИЕ»);

– переключение режима нейтрали («глухозаземленная изолированная») с одновременным подключением (отключением) PEN-провода (S_N).

Сопротивление заземления нейтрали (R_0) установлено постоянное (4 Ом)

Уровни напряжений на доступных прикосновению частях стенда не более 3 В и не представляют опасности поражения электрическим током.

Индикация токов (амперметр) и напряжений (вольтметр) в моделируемой трёхфазной сети, а также времени срабатывания УЗО (секундомер) осуществляется цифровыми индикаторами в нижней части стенда. Индицируемые параметры зависят от положения переключателей «A1–A2–Rч» (ток в цепи тела человека «A1», установка УЗО A2, либо сопротивление тела человека $R_{ч}$) и « $U_A-U_B-U_C$ » (напряжения фазных проводов относительно земли).

По принципу работы стенд является цифровым микропроцессорным устройством, вычисляющим по соответствующим формулам параметры сети в зависимости от комбинации коммутационных элементов на передней панели стенда. Результаты вычислений выводятся на цифровые индикаторы. Индикаторы отображают «измеренные» (вычисленные) значения параметров по нажатию кнопки «ИЗМЕРЕНИЕ», расположенной справа в нижней части передней панели; показания сбрасываются нажатием кнопки «СБРОС», расположенной там же. При работе с УЗО кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ» нажимают, удерживая кнопки «КОНТРОЛЬ» либо $S_{кз. к.}$.

Включение-выключение стенда производится тумблером «ВКЛ- ВЫКЛ», расположенным слева в нижней части передней панели стенда. При включении стенда загорятся светодиодные индикаторы наличия фазных напряжений на мнемосхеме передней панели.

Следует провести сравнительный анализ трёхфазных сетей напряжением до 1 кВ: трёхпроводной с изолированной нейтралью и четырёхпроводной с заземлённой нейтралью, с точки зрения опасности поражения электрическим током в случае прямого прикосновения человека к фазному проводу при нормальном и аварийном режимах работы сетей.

При нормальном режиме работы каждого вида сети исследовать зависимость тока, проходящего через тело человека:

– от активного сопротивления изоляции проводов при постоянном значении их ёмкости относительно земли ($R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_{PEN} = R_E = \text{var}$; $C_{AE} = C_{BE} = C_{CE} = C_{PEN} = C_E = \text{const}$);

– от ёмкости проводов относительно земли при постоянном значении их сопротивления изоляции ($C_{AE} = C_{BE} = C_{CE} = C_{PEN} = C_E = \text{var}$; $R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_{PEN} = R_E = \text{const}$);

– от сопротивления R_h в цепи тела человека при постоянных значениях активного сопротивления изоляции R_E и ёмкости проводов относительно земли C_E .

При аварийном режиме работы каждого вида сети (в случае замыкания фазного провода на землю через сопротивление растеканию тока $R_{зм}$) исследовать зависимость тока, проходящего через тело человека,

– от сопротивления $R_{зм}$ при постоянных значениях параметров R_E , C_E и R_h ;

– от сопротивления R_h при постоянных значениях параметров R_E , C_E и $R_{зм}$.

Порядок выполнения работы

Нормальный режим работы сети.

1. Исследовать зависимость тока, проходящего через тело человека при прямом прикосновении к фазному проводу, от активного сопротивления изоляции проводов сети с изолированной, а затем с заземлённой нейтралью при постоянном значении ёмкости проводов относительно земли, соблюдая условие: $R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_{PEN}$ и $C_{AE} = C_{BE} = C_{CE} = C_{PEN}$.

1.1. Включить стенд, переведя тумблер «ВКЛ-ВЫКЛ» в верхнее положение; при этом должны загореться светодиодные индикаторы наличия фазных напряжений на мнемосхеме передней панели.

1.2. Привести стенд в исходное состояние: нажать кнопку «СБРОС»; при этом сбрасываются значения предыдущего состояния стенда.

1.3. Моделировать трёхфазную трёхпроводную сеть с изолированной нейтралью, установив переключатель S_N в нижнее положение (рис. 88).

1.4. Моделировать нормальный режим работы сети, установив переключатель $S_{кз}$ в положение 0.

1.5. Имитировать прикосновение человека к фазному проводу, например к фазе A , для чего гибкий провод, снабженный наконечниками, подсоединить к клеммам $X_{пр}$ и X_A .

1.6. Установить переключатель $A1-A2-R_n$ в положение R_n , при этом на цифровом табло омметра появляется значение сопротивления тела человека, соответствующее положению рукоятки потенциометра R_n . Установить медленным вращением рукоятки потенциометра R_n заданное преподавателем сопротивление цепи тела человека (обычно 1 кОм – этому значению соответствует крайнее левое положение рукоятки потенциометра), наблюдая значение R_n на цифровом табло омметра.

1.7. Установить переключателями заданные преподавателем значения ёмкостей проводов относительно земли (например, моделируя короткую воздушную сеть, можно задать $C_{AE} = C_{BE} = C_{CE} = 0$).

1.8. Установить переключатель $A1-A2-R_n$ в положение $A1$, при этом на передней панели стенда загорается светодиод в мнемоническом изображении амперметра в цепи тела человека.

1.9. Установить переключатели сопротивлений R_{AE} , R_{BE} , R_{CE} в крайние левые положения, соответствующие значению «∞».

1.10. Нажать кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ», снять показание амперметра, нажать кнопку «СБРОС».

1.11. Устанавливая переключателями последовательно значения $R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_E : 1,0; 2,5; 10; 25; 100$ кОм, измерять ток в цепи тела человека. Считывая показания индикатора амперметра, занести в табл. 18.

Примечание: Для каждого нового измерения нажимать кнопку «ИЗМЕНЕНИЕ», предварительно сбрасывая предыдущее кнопкой «СБРОС».

Таблица 18

C_{AE}	C_{BE}	C_{CE}	R_{AE}	R_{BE}	R_{CE}	$I_{чел}$

1.12. Моделировать трёхфазную четырёхпроводную сеть с заземлённой нейтралью: перевести переключатель S_N в верхнее положение.

1.13. Установить значение ёмкости PEN – провода относительно земли $C_{PEN} = C_E$ (см. п. 1.7) с помощью переключателя S_{CPEN} .

1.14. Выполнить указания пп. 1.4 – 1.11, устанавливая последовательно значения $R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_E : \infty; 1,0; 2,5; 10; 25; 100$ кОм, измеряя ток в цепи тела человека, считывая показания индикатора амперметра и занося их в табл. 19.

1.15. Сделать вывод о характере влияния режима нейтрали, а также активного сопротивления изоляции проводов сети относительно земли на опасность поражения током при прямом прикосновении человека к фазному проводу в условиях нормальной работы сети.

Таблица 19

C_{PEN}	R_{AE}	R_{BE}	R_{CE}	$I_{\text{чел}}$

2. Исследовать зависимость тока, проходящего через тело человека при прямом прикосновении к фазному проводу, от ёмкости проводов относительно земли в сети с изолированной, а затем с заземлённой нейтралью при постоянном значении активного сопротивления изоляции проводов, соблюдая условие: $R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_{PEN}$ и $C_{AE} = C_{BE} = C_{CE} = C_{PEN}$.

2.1. Выполнить указания пп. 1.2 – 1.6 задания № 1.

2.2. Установить переключателями заданные преподавателем значения активного сопротивления проводов относительно земли (например, моделируя кабельную сеть, можно задать $R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_E = \infty$).

2.3. Устанавливая переключателями последовательно значения $C_{AE} = C_{BE} = C_{CE} = C_E$: 0; 0,3; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5 мкФ, измерять ток в цепи человека, считывая показания индикатора амперметра и занося их в табл. 20. При работе не забывать требования примечания к п. 1.11.

Таблица 20

R_{PEN}	R_{AE}	C_{AE}	C_{BE}	C_{CE}	$I_{\text{чел}}$	R_{BE}	R_{CE}	C_{PEN}

2.4. Моделировать трёхфазную четырёхпроводную сеть с заземлённой нейтралью: перевести переключатель S_N в верхнее положение.

2.5. Дополнительно к указаниям п. 2.2 установить переключателем S_{RPEN} значение $R_{PEN} = R_E$.

2.6. Выполнить повторно указания п. 2.3, устанавливая переключателем S_{CPEN} значения $C_{PEN} = C_E$. табл. 21.

2.7. Сделать вывод о характере влияния режима нейтрали сети, а также ёмкости её проводов относительно земли на опасность поражения током при прямом прикосновении человека к фазному проводу в условиях нормальной работы сети.

3. Исследовать влияние активного сопротивления в цепи тела человека R_H на значение тока $I_{\text{чел}}$, проходящего через человека, прикоснувшегося к фазному проводу сети с изолированной и с заземлённой нейтралью, при нормальном режиме работы сети.

3.1. Выполнить указания пп. 1.2 – 1.6 задания № 1. Кроме того, переключатель вольтметра установить в положение U_A .

Таблица 21

R_{3M}	R_E	C_E	R_H	$I_{\text{чел}}$	$U_{\text{пр}}$	R_{PEN}	C_{PEN}

3.2. Установить переключателями заданные преподавателем значения активного сопротивления изоляции $R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_E$ и $C_{AE} =$

3.3. $= C_{BE} = C_{CE} = C_E$ ёмкости проводов относительно земли (например, моделируя короткую воздушную сеть, можно задать $R_E = 100$ кОм и

3.4. $C_E = 0$).

3.5. Подобно указанному в пп. 1.6, 1.8, 1.10, устанавливая медленным вращением рукоятки потенциометра R_H последовательно значения сопротивления R_H в цепи тела человека, измерять соответствующие этим значениям токи I_H напряжения U_A , между фазным проводом A и землёй (считывать показания индикаторов амперметра и вольтметра и заносить их в табл. 22).

Таблица 22

R_{3M}	R_H	$I_{\text{чел}}$

3.6. Моделировать трёхфазную четырёхпроводную сеть с заземлённой нейтралью, установив переключатель S_N в верхнее положение.

3.7. Дополнительно к указаниям п. 3.2 установить переключателями S_{RPEN} и S_{CPEN} значения $R_{PEN} = R_E$ и $C_{PEN} = C_E$.

3.8. Повторно выполнить указания пп. 3.3.

3.9. Построить зависимость $I_{\text{чел}} = I(R_H)$ и $U_i = U(R_H)$ для обоих видов сетей.

3.10. Сделать вывод о характере влияния сопротивления R_H в цепи тела человека на опасность поражения током в трёхфазных сетях с различным режимом нейтрали.

Аварийный режим работы сети.

4. При аварийной ситуации (замыкание фазного провода на землю через сопротивление растеканию тока R_{3M}) провести сравнительный анализ опасности прикосновения человека к исправному фазному проводу в сетях с изолированной и

заземлённой нейтралью. Исследовать характер влияния сопротивления R_{3M} на значение тока $I_{\text{чел}}$ протекающего через человека.

- 4.1. Выполнить указания пп. 3.1 и 3.2 задания № 3.
- 4.2. Переключателем $S_{\text{КЗ}}$ замкнуть фазный провод B или C на землю через сопротивление R_{3M} .
- 4.3. Устанавливая переключателем S_{3M} последовательно значения $R_{3M} = 10; 100$ и 1000 Ом, измерить ток $I_{\text{чел}}$ в цепи тела человека и напряжение U_A между фазным проводом A и землёй (считывать показания индикаторов амперметра и вольтметра и заносить их в табл. 22).
- 4.4. Моделировать трехфазную четырёхпроводную сеть с заземлённой нейтралью, установив переключатель S_N в верхнее положение.
- 4.5. Измерить ток $I_{\text{чел}}$ и напряжение $U_{\text{пр}}$ в зависимости от сопротивления R_{3M} , выполнив последовательно указания п. 3.5 задания № 3 и 4.3 задания № 4.
- 4.6. Представить в виде графиков зависимость $I_{\text{чел}} = J(R_{3M})$ и $U_{\text{пр}} = U(R_{3M})$ для обоих видов сетей.
- 4.7. Сделать вывод о характере влияния сопротивления растеканию тока в месте замыкания фазного провода на землю R_{3M} на опасность поражения током в трёхфазных сетях с различным режимом нейтрали.
5. При аварийной ситуации (замыкании фазного провода на землю через сопротивление растеканию тока R_{3M}) выполнить исследование характера влияния сопротивления в цепи тела человека, прикоснувшегося к исправному фазному проводу в сетях с изолированной и заземлённой нейтралью, на значение тока $I_{\text{чел}}$, протекающего через человека.
 - 5.1. Выполнить указания пп. 1.2 – 1.3 и 1.5 – 1.6 задания № 1. Кроме того, переключатель вольтметра установить в положение U_A .
 - 5.2. Переключателем $S_{\text{КЗ}}$ замкнуть фазный провод B или C на землю через сопротивление R_{3M} .
 - 5.3. Установить переключателем S_{3M} заданное преподавателем значение R_{3M} (например $R_{3M} = 100$ Ом).
 - 5.4. Определить и записать в табл. 22 значения тока I_h в зависимости от сопротивления в цепи тела человека R_h при постоянном значении R_{3M} для сети с изолированной и заземлённой нейтралью, выполнив последовательно указания пп. 3.2 – 3.3.
 - 5.5. Сделать вывод о характере влияния сопротивления R_h в цепи тела человека на опасность поражения током в трёхфазных сетях с изолированной и заземлённой нейтралью при аварийном режиме работы сетей.
 - 5.6. Выключить стенд, переведя тумблер «ВКЛ-ВЫКЛ» в нижнее положение.

Содержание отчёта

Результаты измерений представить в виде таблиц и графиков, вычертить схемы исследуемых сетей и сделать выводы, указанные в соответствующих пунктах приведённых выше заданий.

Контрольные вопросы

1. Каков безопасный уровень тока, проходящего через тело человека?
2. Каким образом режим работы нейтрали влияет на опасность поражения электрическим током?
3. Как влияет величина ёмкости проводов относительно земли на опасность поражения током при прямом прикосновении человека к фазному проводу в условиях нормальной работы сети?
4. Как влияет сопротивление заземления на значение тока протекающего через человека?
5. Сравнить опасность поражения человека при прикосновении его к неисправному фазному проводу в сетях с изолированной нейтралью, если возникла аварийная ситуация (замыкание другой фазы на землю).

Лабораторная работа 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Цель работы: исследовать основные характеристики устройства защитного отключения (УЗО), реагирующего на дифференциальный ток (ток нулевой последовательности) в трёхфазной сети напряжением до 1 кВ с заземлённой нейтралью, и оценить их соответствие нормативным требованиям электробезопасности.

Оборудование

Работа проводится на стенде, описанном в лабораторной работе 11 (см. рис. 88).

Методические указания

1. Экспериментально определить установленное на стенде длительно допустимое значение тока $I_{\text{чел.д.д}}$, проходящего через тело человека (рис. 88).
2. Выполнить предварительный контроль работоспособности УЗО.
3. Измерить ток установки I_y УЗО.
4. Измерить время срабатывания $\tau_{\text{ср}}$ УЗО и ток I_h , который в течение этого времени проходит через человека, прикоснувшегося к фазе в защищаемом электропотребителе.

5. Исследовать влияние защитного зануления корпуса электро-потребителя на эффективность действия УЗО при замыкании фазы на корпус.

6. Сделать заключение о соответствии исследованных параметров УЗО допустимым, обеспечивающим условия электробезопасности. Оценить влияние защитного зануления на эффективность действия УЗО.

Порядок выполнения работы

Включить стенд, переведя тумблер «ВКЛ-ВЫКЛ» в верхнее положение; при этом должны загореться светодиодные индикаторы наличия фазных напряжений на мнемосхеме передней панели.

Привести стенд в исходное состояние: нажать кнопку «СБРОС»; при этом сбрасываются значения предыдущего состояния стенда.

1. Определить заданное в стенде длительно допустимое значение тока $I_{\text{чел.д.д}}$ проходящего через тело человека.

1.1. Моделировать на стенде трёхфазную четырёхпроводную сеть с заземлённой нейтралью. Для этого установить переключателями сопротивление изоляции и ёмкости проводов сети относительно земли в соответствии с указаниями преподавателя (например, $R_{AE} = R_{BE} = R_{CE} = R_{PEN} = 100$ кОм и $C_{AE} = C_{BE} = C_{CE} = C_{PEN} = 0,1$ мкФ). Перевести переключатель S_N в верхнее положение. Установить переключатель $S_{\text{кз}}$ в положение 0 (рис. 88).

1.2. Имитировать прикосновение человека к фазе сети, для чего гибкий провод, снабжённый наконечниками, подсоединить к клемме $X_{\text{пр}}$ на мнемоническом изображении руки человека и одной из клемм X_A , X_B или X_C .

1.3. Рукоятку плавного регулятора R_n переместить в крайнее правое положение (ему соответствует значение сопротивления тела человека, равное 100 кОм).

1.4. Установить переключатель $A1-A2-R_n$ в положение $A1$, при этом высветится светодиод в месте подключения амперметра для измерения тока I_h в цепи тела человека.

1.5. Медленно вращая рукоятку регулятора R_n против часовой стрелки, ожидая загорания светодиода в изображении человека, в момент начала свечения светодиода в изображении человека измерить, нажав кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ», значение тока $I_{\text{чел}}$ которое соответствует принятому длительно допустимому току $I_{\text{чел.д.д}}$. Оставить рукоятку регулятора в положении, соответствующем длительно допустимому току $I_{\text{чел.д.д}}$.

1.6. Нажать кнопку «СБРОС».

2. Проверить работоспособность УЗО.

2.1. Включить УЗО, нажав кнопку «ПУСК». При этом на кнопке «ПУСК» высветится светодиод, свидетельствующий о замыкании контактов УЗО, наличии напряжения на его выходе и соответственно на входе электропотребителя.

2.2. Наблюдать срабатывание УЗО при одновременном нажатии кнопок «КОНТРОЛЬ» и «ИЗМЕРЕНИЕ». Светодиод на кнопке «ПУСК» гаснет, что указывает на отсутствие напряжения на выходе УЗО вследствие размыкания его контактов, загорается светодиод «КОНТРОЛЬ». Секундомер при этом показывает время срабатывания УЗО.

2.3. Сделать вывод о работоспособности УЗО.

3. Измерить ток установки I_v УЗО.

3.1. Нажать кнопку «СБРОС».

3.2. Установить переключатель амперметра в положение $A1$.

3.3. Присоединить «человека» к фазе A в электропотребителе, для чего гибкий провод, снабжённый наконечниками, подсоединить к клеммам $X_{\text{пр}}$ на мнемоническом изображении руки человека и $X_{\text{ак}}$ на корпусе электропотребителя.

3.4. Включить УЗО, нажав кнопку «ПУСК».

3.5. Нажав и удерживая кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ», уменьшая сопротивление R_n посредством медленного вращения против часовой стрелки рукоятки его регулятора, оставленной в положении, соответствующем длительно допустимому току $I_{\text{чел.д.д}}$, наблюдать за моментом срабатывания УЗО. В момент срабатывания УЗО (гаснет индикатор на кнопке «ПУСК» УЗО) зафиксировать показание амперметра, которое соответствует току установки I_v . Сравнить измеренное значение тока установки I_v с установленным на УЗО, установив переключатель амперметра в положение $A2$ (при этом загорается светодиодный индикатор на мнемоническом изображении амперметра $A2$) и сняв его показания.

4. Замерить время срабатывания $t_{\text{ср}}$ УЗО и ток $I_{\text{чел}}$, проходящий в течение $t_{\text{ср}}$ через человека, прикоснувшегося к фазе защищаемом электропотребителе.

4.1. Перевести устройство в исходное состояние, нажав кнопку «СБРОС».

4.2. Установить рукоятку плавного регулятора R_h в положение «1 кОм».

4.3. Установить переключатель амперметра в положение $A1$.

4.4. Включить УЗО, нажав кнопку «ПУСК».

4.5. Присоединить «человека» к фазе A электропотребителя, оставив подсоединение в соответствие с п.3.3 и нажав кнопку «ИЗМЕРЕНИЯ». Наблюдать срабатывание УЗО (что вызовет отключение электропотребителя от сети). Показание миллисекундомера соответствует времени срабатывания $t_{\text{ср}}$ УЗО, а амперметра – току $I_{\text{чел}}$, прошедшему в течение этого времени через человека.

4.6. На основании сравнения измеренного значения тока $I_{\text{чел}}$ допустимым при времени воздействия на человека, равном $t_{\text{ср}}$, сделать вывод об эффективности защитного действия исследуемого УЗО.

5. Исследовать влияние зануления электропотребителя на работу защищающего его УЗО в случае замыкания фазы на корпус электропотребителя.

5.1. Отсоединить гибкий провод, снабженный наконечниками, от клеммы $X_{\text{ак}}$ на корпусе электропотребителя. Перевести устройство в исходное состояние, нажав кнопку «СБРОС».

5.2. Занулить корпус электропотребителя, установив переключатель $S_{\text{защ}}$ в верхнее положение.

5.3. Включить УЗО, нажав кнопку «ПУСК».

5.4. Осуществить пробой фазы C на корпус электропотребителя, нажав одновременно кнопки $S_{\text{кз.3}}$ и «ИЗМЕРЕНИЕ». Наблюдать последствия.

5.5. Перевести устройство в исходное состояние, нажав кнопку $S_{\text{кз.3}}$, нажав кнопку «СБРОС».

5.6. Нарушить зануление, произведя разрыв зануляющего проводника посредством переключения $S_{\text{защ}}$ в нижнее положение.

5.7. Повторно выполнить указания пп. 5.3, 5.4, 5.5.

5.8. В отчёте о лабораторной работе написать вывод по результатам проведенного эксперимента.

5.9. Выключить стенд, переведя тумблер «ВКЛ-ВЫКЛ» в нижнее положение.

Содержание отчёта

1. Схематическое изображение занулённого электропотребителя, подключённого к сети через УЗО, а также элементов в зоне его защиты.
2. Обработанные результаты проведённых исследований и полученные на их основе выводы (см. указания соответствующих пунктов работы).
3. Обобщённое заключение об эффективности защитного действия УЗО и соответствии его параметров допустимым, обеспечивающим условия электробезопасности.

Контрольные вопросы

1. Как должны осуществляться при наличии быстродействующих РЗ и УРОВ все операции по включению линий, шин и оборудования после ремонтов или нахождения без напряжения?
2. Не ниже какого значения должно поддерживаться в пределах каждого присоединения сопротивление изоляции электрически связанных вторичных цепей напряжением выше 60 В относительно земли?
3. Объясните устройство и принцип действия УЗО?
4. Как выбирается ток уставки УЗО?
5. Как влияет зануление электропотребителя на работу защищающего УЗО?

13. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. Генератор трёхфазного тока питает нагрузку через соединительную линию (рис. 89). Даны активное и реактивное сопротивления фазы генератора, линии и нагрузки, а также фазная ЭДС генератора: $r_r = 0,25$ Ом; $x_r = 1,25$ 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.

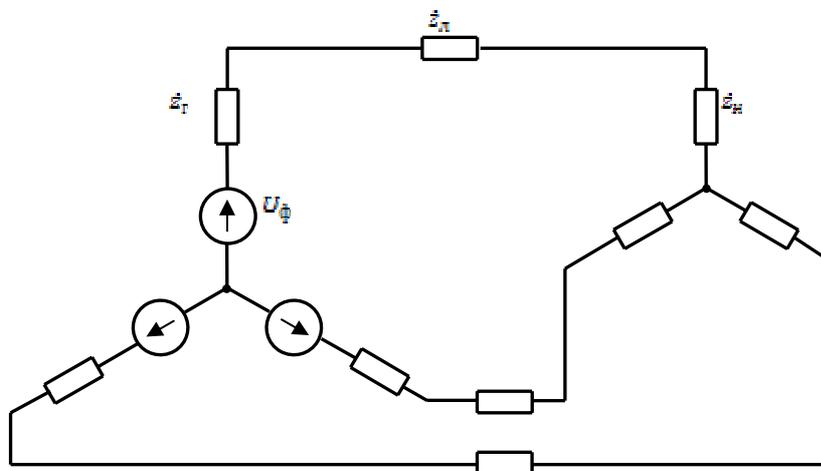


Рис. 89

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)

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

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. 90). Ёмкостное сопротивление конденсатора берётся равным по величине сопротивлению лампы, т.е. $X_C = R$. Тогда

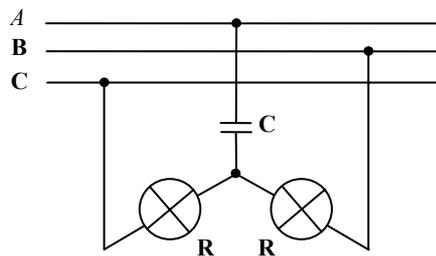


Рис. 90

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

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.

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

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

Активное сопротивление кабеля

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

Пример 4. Нагрузка, соединённая в звезду с нулевым проводом, к которой приложено напряжение симметричной трёхфазной системы, представлена на рис. 91. Линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380$ В; $R = 22$ Ом.

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

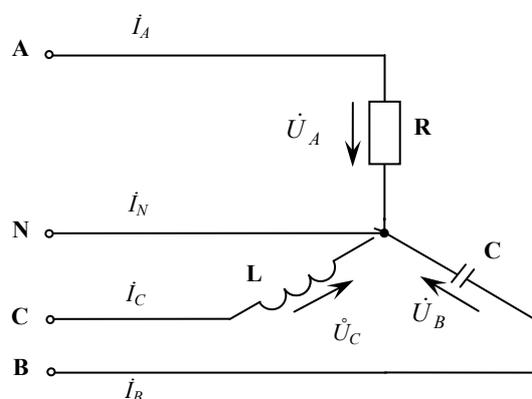


Рис. 91

Требуется:

- определить линейные токи и ток в нулевом проводе;
- построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Решение. Выбираем положительные напряжения для токов и фазных напряжений и отмечаем их стрелками на расчётной схеме рис. 92.

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:

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

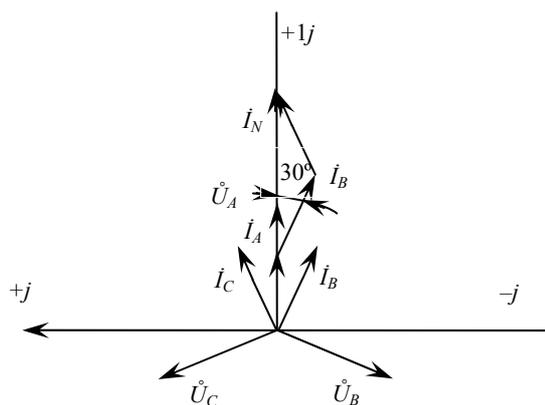


Рис. 92

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

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

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. 92).

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. 93).

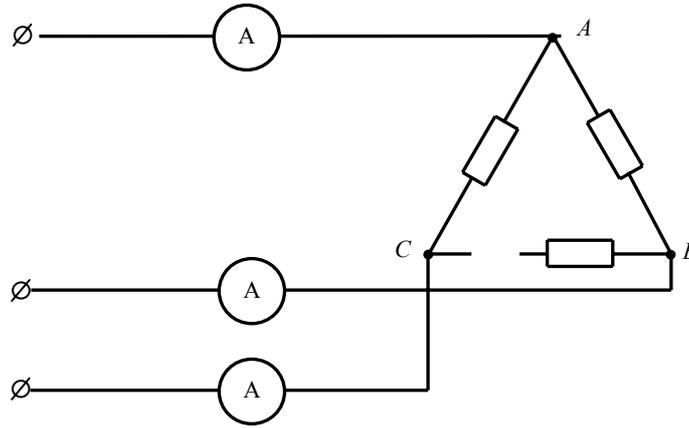


Рис. 93

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:

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

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

Токи в линии:

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

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

Построим векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 94).

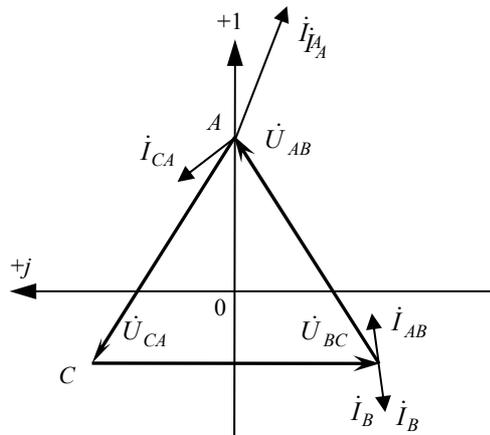


Рис. 94

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

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

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

Сопrotивление фазы нагрузки

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

Фазный и линейный токи

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

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:

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

Расчёт ненормальных режимов

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

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

Фазное напряжение

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

Потребляемая мощность в фазах *А* и *С*

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

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

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

Токи при коротком замыкании

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

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

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

Пример 7. Напряжения симметричной трёхфазной системы приложены к нагрузке, соединённой звездой без нулевого провода (рис. 95). Линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$; $R = 20 \text{ Ом}$; $X_L = 40 \text{ Ом}$; $X_C = 30 \text{ Ом}$.

Требуется:

а) определить напряжение смещения нейтрали;

б) определить линейные токи.

Решение. Выбираем положительные направления для токов и фазных напряжений и отмечаем их стрелкой на расчётной схеме рис. 95, а.

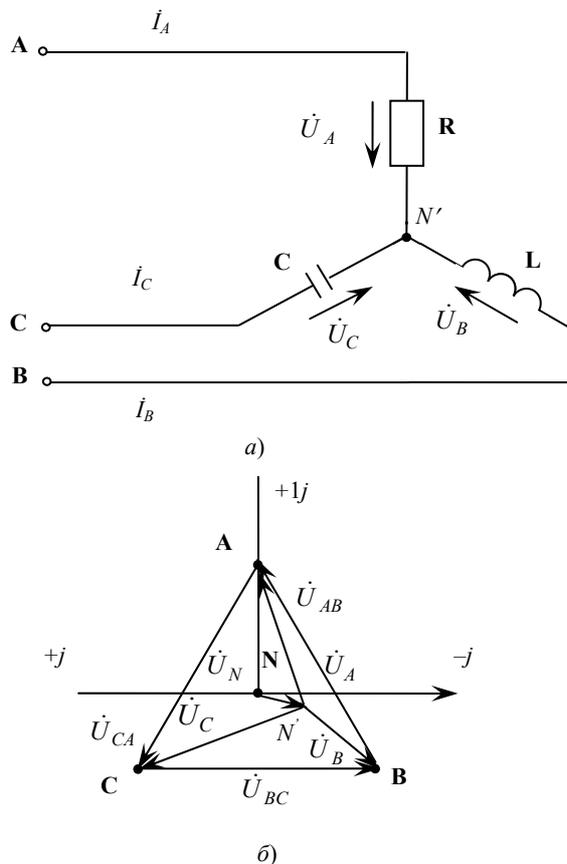


Рис. 95

Определяем напряжение смещения нейтрали:

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

но так как

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

то

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

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

и окончательно

$$U_N = (-4,9 - 17,5j), \text{ В.}$$

Находим линейные токи:

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

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

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

Пример 8. Для заданной схемы рис. 96, 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

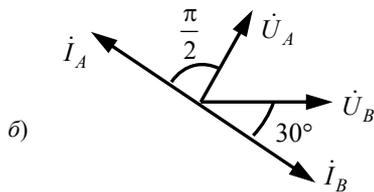
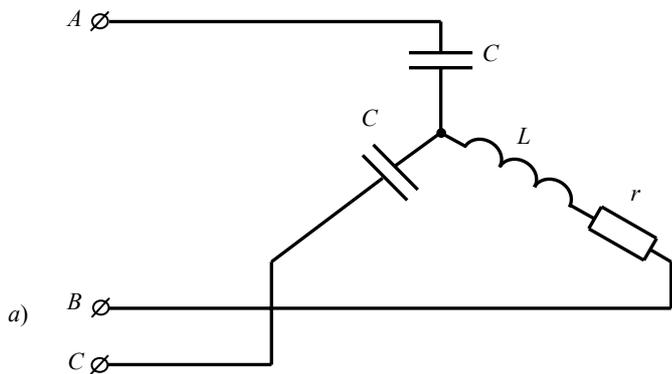


Рис. 96

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

т.е. нейтральная точка перемещается в точку C.

Фазные напряжения:

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

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

$$\dot{U}'_0 = \dot{U}_C - \dot{U}_C = 0.$$

Токи в фазах и линии

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

где $I = \frac{U_\Delta}{Z}$;

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

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. 96, б.

Пример 9. В схеме (рис. 97, а) дано $R = 22 \text{ Ом}$; $X_L = 19 \text{ Ом}$; $X_C = 19 \text{ Ом}$; $U_\Delta = 380 \text{ В}$.

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. 97, а. Определяем фазные токи:

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

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

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

Определяем линейные токи:

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

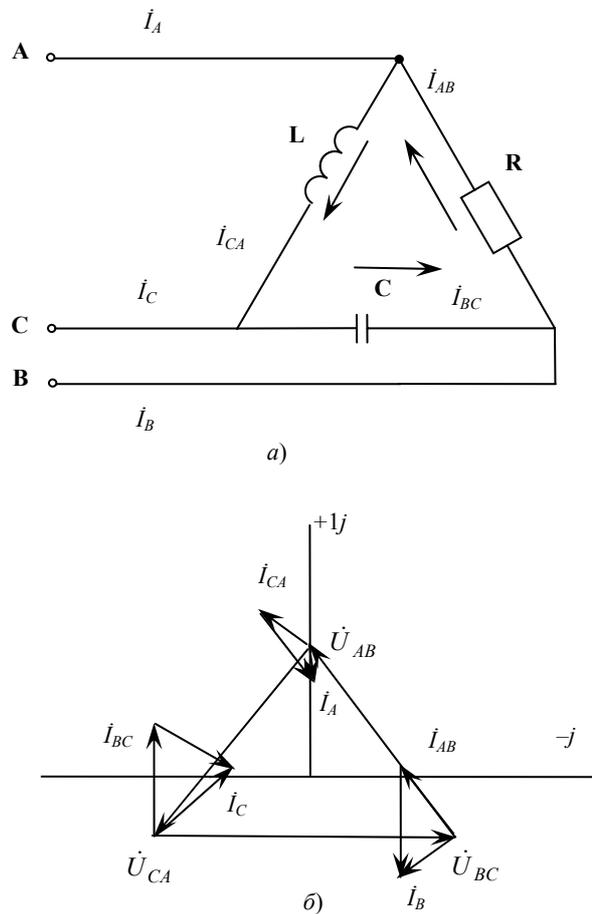


Рис. 97

Строим векторную диаграмму токов и векторную диаграмму напряжений (рис. 97, 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. 98).

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.

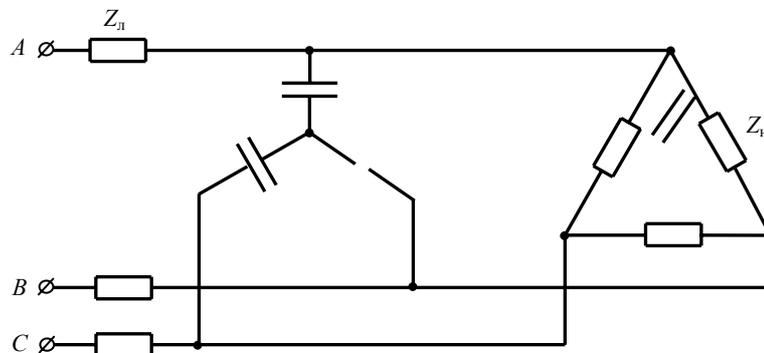


Рис. 98

Решение. Преобразование треугольника нагрузки в эквивалентную звезду

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

Параллельное соединение одной фазы звезды вместе с конденсатором

$$Z'' = \frac{Z'_H (-jx_C)}{Z'_H - jx_C} = \frac{(6 + j2)(-jx_C)}{6 + j(2 - x_C)} = \frac{(-j6x_C + 2x_C)[6 - j(2 - x_C)]}{6^2 + (2 - x_C)^2} =$$

$$= \frac{6x_C^2 + j(2x_C^2 - 40x_C)}{6^2 + (2 - x_C)^2}, \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление на фазу

$$Z_3 = Z'' + Z_{II} = \frac{6x_C^2 + j(2x_C^2 - 40x_C)}{6^2 + (2 - x_C)^2} + \frac{(1 + j3)[6^2 + (2 - x_C)^2]}{6^2 + (2 - x_C)^2} =$$

$$= \frac{7x_C^2 - 4x_C + 40}{6^2 + (2 - x_C)^2} + j \frac{5x_C^2 - 52x_C + 120}{6^2 + (2 - x_C)^2} = r_3 + jx_3.$$

Для того чтобы $\cos\varphi = 1$, 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. 99. Вычислить активную и реактивную мощность всех фаз нагрузки при $Z_H = 8 + j6$, Ом и линейном напряжении $U_{II} = 190$ В.

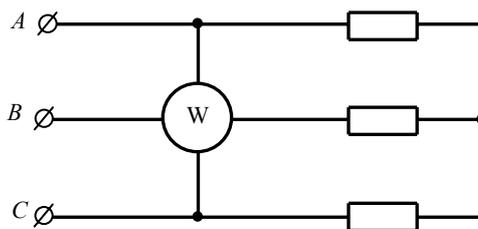


Рис. 99

Решение. Ваттметр, включённый по данной схеме, покажет мощность, равную произведению $U_{AC} I_B \cos(90^\circ + \varphi)$, а это есть реактивная мощность. Отсюда в соответствии с рис. 100 фазное напряжение

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

ток в фазе и в линии

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

угол сдвига фаз

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

Показание включённого в схему ваттметра

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

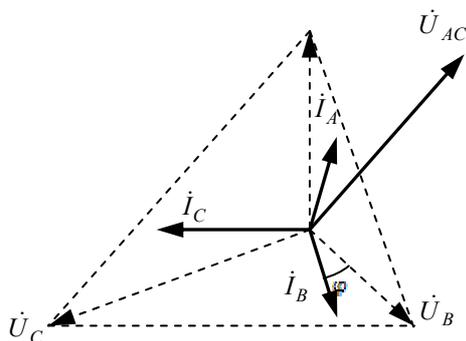


Рис. 100

Потребляемая нагрузкой активная мощность

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

Проверка:

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

Пример 12. Монтаж обмотки трёхфазного генератора был выполнен с нарушением порядка чередования фаз, как это показано на рис. 101.

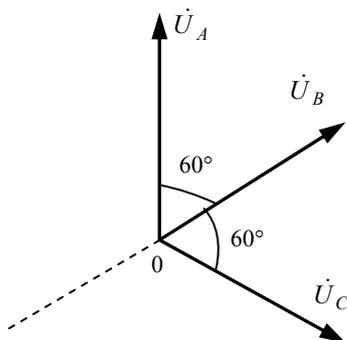


Рис. 101

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

Определить токи в линии при наличии и отсутствии нейтрального провода.

Решение

1. *Расчёт схемы при наличии нейтрального провода.*

Согласно условию фазные напряжения равны:

$$\dot{U}_A = 220 \text{ В;}$$

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

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

Сопроотивления одной фазы

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

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

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

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:

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

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

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

Проверка:

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

Пример 13. В цепь трёхфазного тока с нейтральным проводом включена осветительная нагрузка по схеме, представленной на рис. 102.

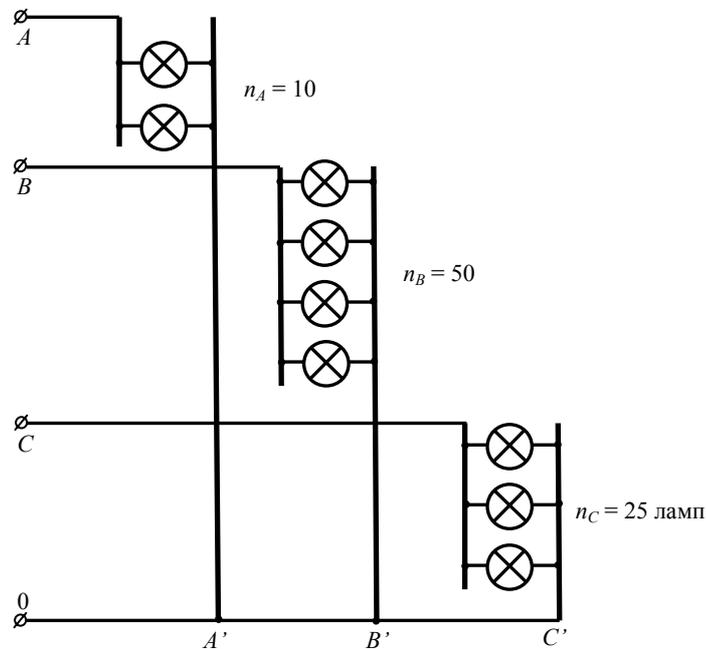


Рис. 102

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 $r_{\text{л}} \approx 500$ Ом, а линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220$ В.

Решение. Фазные напряжения

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

Сопротивления каждой группы ламп:

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

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

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

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 $C'B'$

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

– на участке $B'A'$

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

– на участке $A'O'$

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

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 $U_n = 190$ 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:

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

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

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

Фазные проводимости:

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

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

$$Y_C = \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{8\sqrt{2}e^{j45^\circ}} = \frac{1}{11,3e^{45^\circ}} \approx 0,09e^{-j45^\circ}, \text{ Ом}^{-1}.$$

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

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:

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

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

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

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: $\dot{U}_A = 6600e^{j120^\circ}$, В; $\dot{U}_B = 6000$ В; $\dot{U}_C = 5400e^{j240^\circ}$, В.

Решение. Системы заданных фазных напряжений:

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

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

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. 103 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 последовательности,

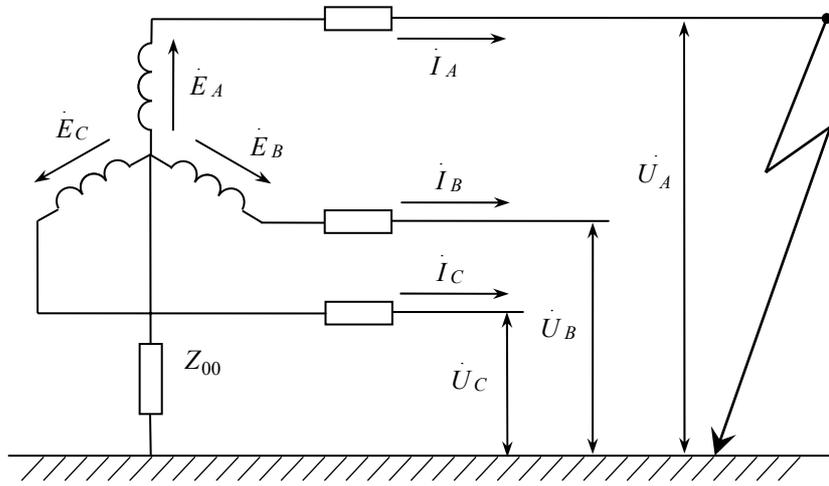


Рис. 103

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. 103).

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:

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

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. 104.

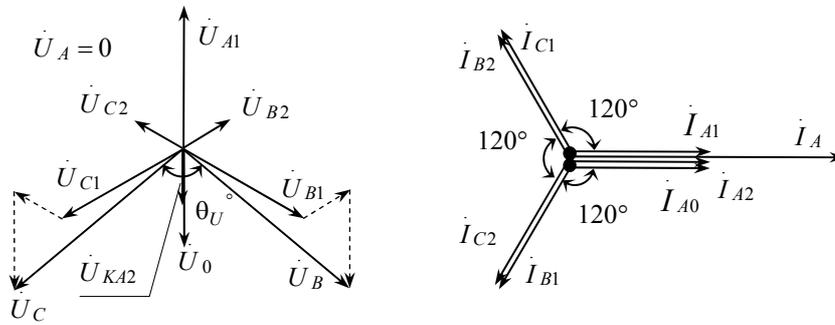


Рис. 104

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

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

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

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

Пример 19. Исследовать двухфазное короткое замыкание в цепи трёхфазного тока методом симметричных составляющих (рис. 105). Составить комплексную схему замещения (рис. 106). Построить векторную диаграмму токов.

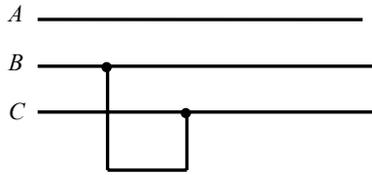


Рис. 105

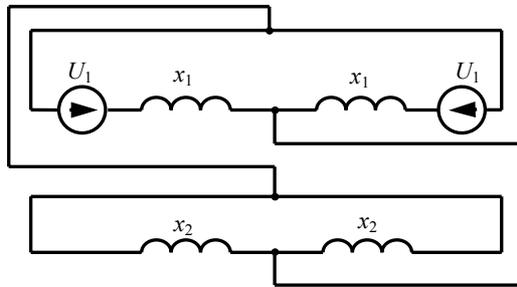


Рис. 106

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:

$$i_{A0} = \frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C) = \frac{1}{3}(0 + i_B + i_C) = \frac{1}{3}(i_B - i_B) = 0;$$

$$i_{A2} = \frac{1}{3}(i_A + a^2 i_B + a i_C) = \frac{1}{3}(0 + a^2 i_B + a i_C) = \frac{1}{3}(a^2 i_B - a i_B) = \\ = \frac{1}{3}(a^2 - a) i_B = \frac{1}{3}(-j\sqrt{3}) i_B = -j \frac{1}{\sqrt{3}} i_B a;$$

$$i_{A1} = \frac{1}{3}(i_A + a i_B + a^2 i_C) = \frac{1}{3}(a i_B + a^2 i_C) = \frac{1}{3}(a i_B - a^2 i_B) = \\ = \frac{1}{3}(a - a^2) i_B = \frac{1}{3}(-j\sqrt{3}) i_B = -j \frac{1}{\sqrt{3}} i_B a.$$

Так как $i_{A0} = 0$, то $\dot{U}_{A0} = 0$ и составляющие нулевой последовательности из рассмотрения исключаются. Комплексная схема замещения и векторная диаграмма токов представлена на рис. 107.

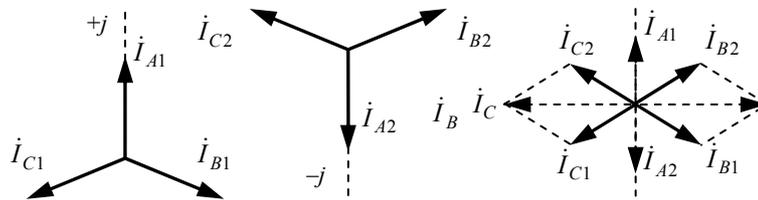


Рис. 107

Пример 20. 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. 108).

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.

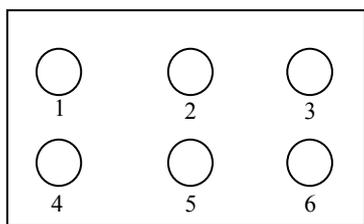


Рис. 108

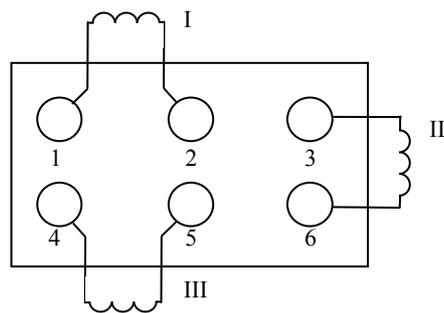


Рис. 109

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. 109). 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. 110). Следовательно, одноимёнными зажимами обмоток являются зажимы 4, 6 и 2, 5, 3.

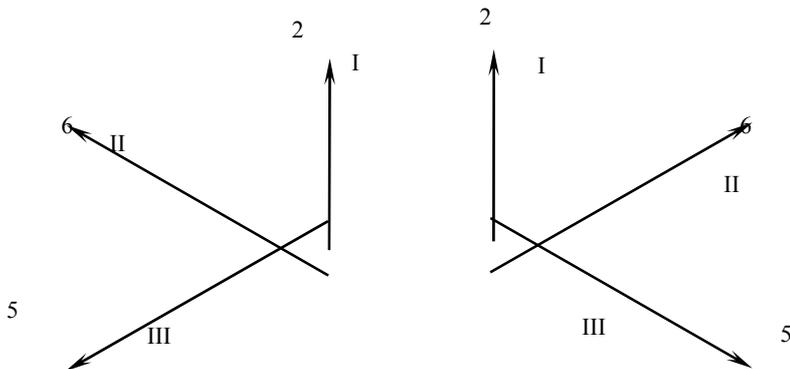


Рис. 110

При соединении обмоток звездой выводы клеммной коробки должны быть соединены, как показано на рис. 111, а при соединении треугольником – так, как показано на рис. 112.

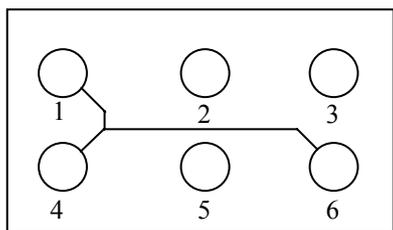


Рис. 111

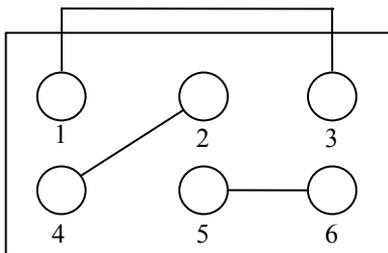


Рис. 112

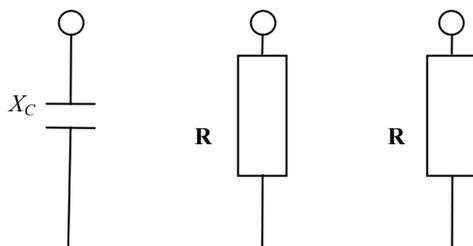


Рис. 113

Для определения последовательности фаз следует собрать схему фазоуказателя (рис. 113). 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 21. 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 качества электрической энергии», коэффициент несимметрии не должен превышать 2%.

Из-за неправильного соединения обмоток трёхфазного трансформатора диаграмма линейных напряжений имеет вид, показанный на рис. 114. Определить величину коэффициента несимметрии линейных напряжений при $U_{AB} = U_{BC} = 220 \text{ В}$; $U_{CA} = 380 \text{ В}$.

Запишем комплексы линейных напряжений, приняв $\dot{U}_{AB} = 220e^{j0^\circ}$; тогда

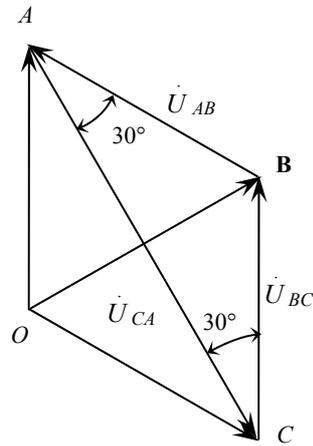


Рис.114

$$\dot{U}_{BC} = 220e^{-j60^\circ}, \text{ В}; \quad \dot{U}_{CA} = 380e^{j150^\circ}, \text{ В};$$

$$K_{\text{нсм}} = \frac{220e^{-j120^\circ} + 220e^{-j60^\circ} + 380e^{j150^\circ} e^{j120^\circ}}{3 \cdot 380} \cdot 100\% = 33,3\%.$$

Пример 22. 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. 115. 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

$$\dot{U}_{AO} = 220e^{j0^\circ}, \text{ В. При этом } \dot{U}_{BO} = 220e^{-j60^\circ}, \text{ В}; \quad \dot{U}_{CO} = 220e^{-j120^\circ}, \text{ В.}$$

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

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 42,2 - j97,7 = 106,3e^{-j66,6^\circ}, \text{ А}; \\ \dot{I}_B &= a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 = e^{j240^\circ} 48,7e^{-j30^\circ} + e^{j120^\circ} 73,3e^{-j90^\circ} = 24,6e^{j30^\circ}, \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_C = a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 = e^{j120^\circ} 48,7e^{-j30^\circ} + e^{j240^\circ} 73,3e^{-j90^\circ} = 106,3e^{j126,3^\circ}, \text{ А.}$$

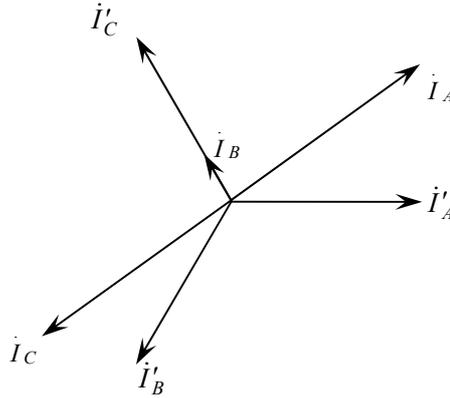


Рис. 115

При правильном соединении обмоток трансформатора фазные напряжения образуют симметричную звезду, а фазные токи равны

$$\dot{I}'_A = \frac{\dot{U}_{AO}}{Z_1} = \frac{220}{j3} = 73,3e^{-j90^\circ}, \text{ А;}$$

$$\dot{I}'_B = 73,3e^{-j210^\circ}, \text{ А;}$$

$$\dot{I}'_C = 73,3e^{-j330^\circ} = 73,3e^{j30^\circ}, \text{ А.}$$

Векторная диаграмма токов при неправильном и правильном соединении обмоток приведена на рис. 88.

Пример 23. Определить ток трёхфазного короткого замыкания в точке K за реактором отходящей линии 6,3 кВ схемы рис. 116 (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.

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

$$x_6 = \frac{0,2 \cdot 6,3^2}{5,8} = 1,37 \text{ Ом;}$$

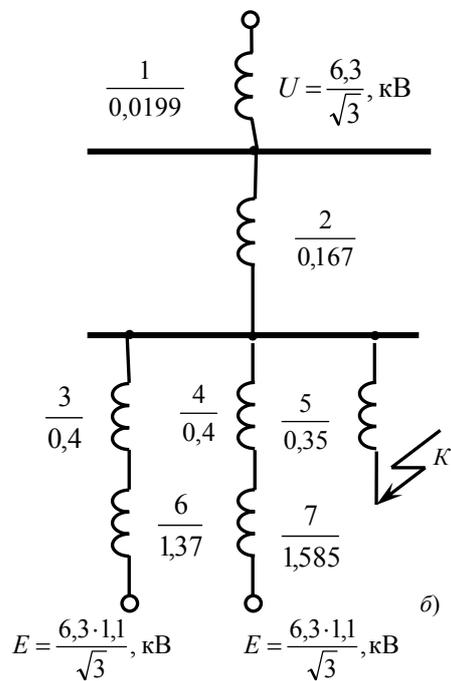
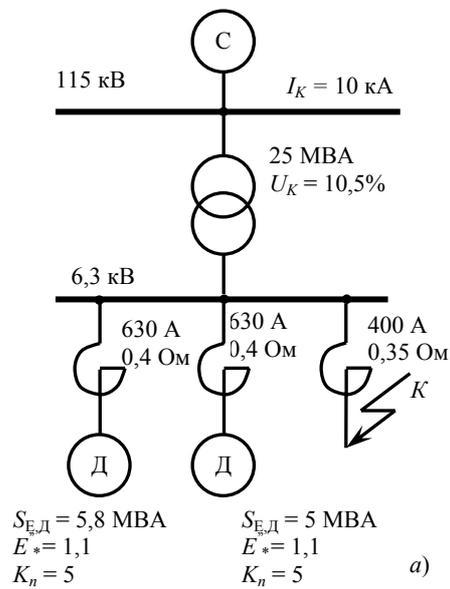


Рис. 116

$$x_7 = \frac{0,2 \cdot 6,3^2}{5} = 1,585 \text{ Ом.}$$

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)

$$E_{\text{эк}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{0,1869} + \frac{1,1}{0,936}\right)}{\frac{1}{0,1869} + \frac{1}{0,936}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} \cdot 1,0167 \text{ Ом.}$$

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 24. Определить ток короткого замыкания в начальный момент времени для трёхфазного, двухфазного и однофазного короткого замыкания в точке K (рис. 117, а).

На шинах 115 кВ связи энергосистемой заданы токи трёхфазного короткого замыкания. $I^{(3)} = 1000 \text{ А}$ и однофазного короткого замыкания $I^{(1)} = 3I_0 = 8300 \text{ А}$.

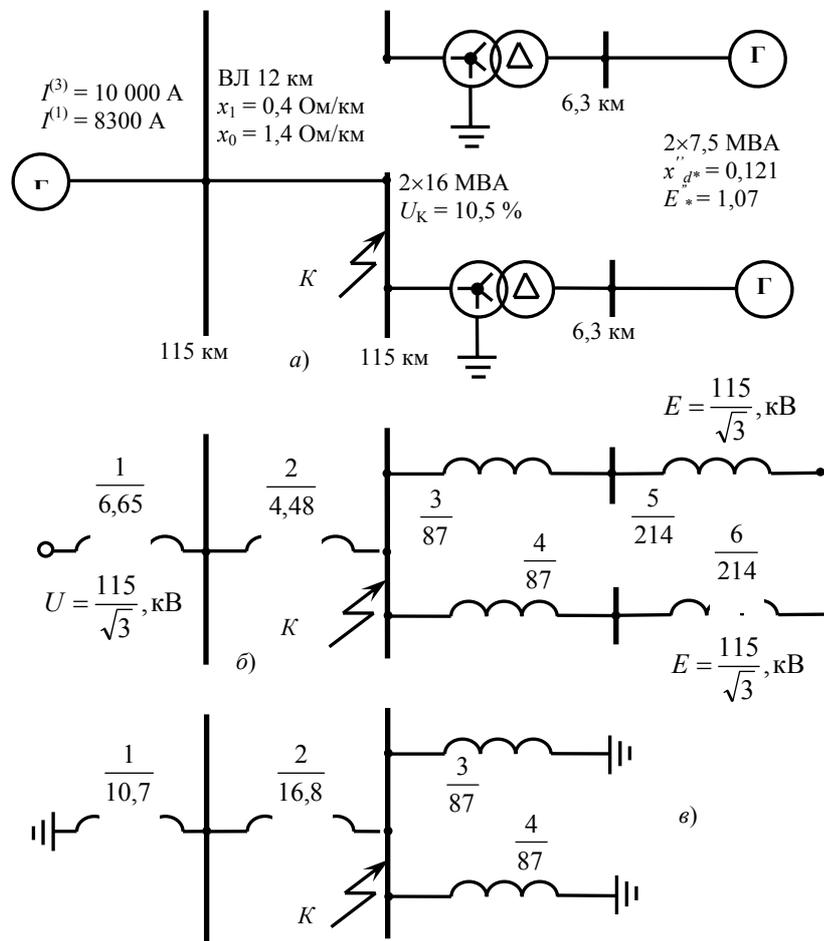


Рис. 117

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. 117, 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 нейтралями, 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. 117, в).

За расчётную ступень напряжения принимаем $U_6 = 115 \text{ кВ}$.

Для упрощения из-за малой мощности генераторов ($E_{\text{эк}} = 1,005U$) 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

$$I^{(1)} = \frac{115 \cdot 3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 38,13} = 5220 \text{ А.}$$

Пример 25. На втулках 115 кВ трансформатора отпаечной подстанции в точке K (рис. 118, a) произошло однофазное короткое замыкание. Требуется определить ток короткого замыкания для начального момента времени. Схемы прямой (обратной) и нулевой последовательностей показаны на рис. 118 (штрихами помечены доли сопротивления поврежденной ВЛ и взаимоиנדукции между ВЛ).

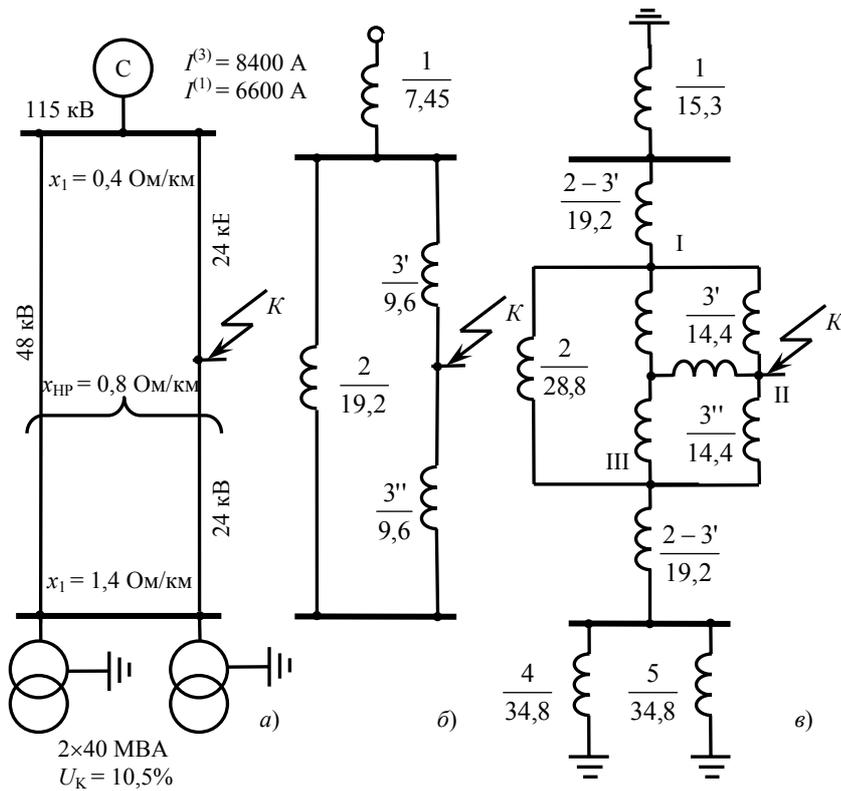


Рис. 118

Решение. Сопротивления схем замещения (рис. 118, 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:

$$x_{0,1} = \frac{115\sqrt{3} \cdot 10^3}{6600} - 2 \cdot 7,45 = 15,3 \text{ Ом};$$

$$x_{0,2} = (1,4 - 0,8) \cdot 48 = 28,8 \text{ Ом};$$

$$x'_{0,3} = x''_{0,3} = 14,4 \text{ Ом};$$

$$x'_{0,2-3} = x''_{0,2-3} = 0,8 \cdot 48 \cdot 0,5 = 19,2 \text{ Ом};$$

$$x_{0,4} = x_{0,5} = 0,105 \frac{115^2}{40} = 34,8 \text{ Ом}.$$

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

$$x_{0,I} = 0,25 \cdot 28,8 = 7,2 \text{ Ом};$$

$$x_{0,II} = 0,25 \cdot 0,5 \cdot 28,8 = 3,6 \text{ Ом};$$

$$x_{0,III} = 0,25 \cdot 28,8 = 7,2 \text{ Ом}.$$

Резльтирующее сопротивление схемы прямой (обратной) последовательности

$$x_{1,\Sigma} = 7,45 + \frac{19,2 + 9,6}{9,6} = 14,65 \text{ Ом}.$$

Резльтирующее 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

$$I^{(1)} = 3I_0 = 3 \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 54,3} = 3670 \text{ А}.$$

14. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 1. При производстве работ электромонтёр повредил кабель трёхфазной электрической сети с изолированной нейтралью с линейным напряжением $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{л} = 380 \text{ В}$ при частоте $f = 50 \text{ Гц}$ и коснулся инструментом одной из фаз. Ёмкость каждой фазы кабеля относительно земли $C = 0,1 \text{ мкФ}$. Определить ток, протекающий по телу электромонтёра, приняв сопротивление его тела $R = 1000 \text{ Ом}$ (рис. 119).

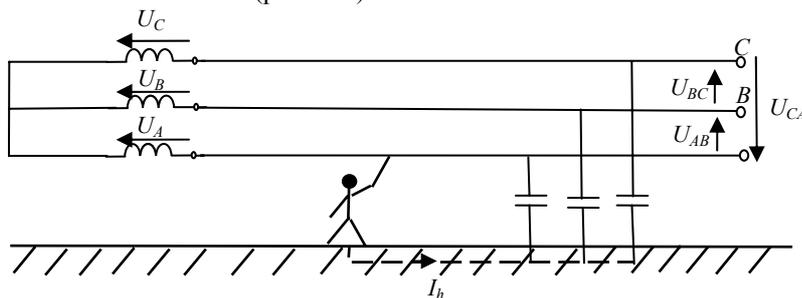


Рис. 119

Задача 2. При ревизии электрооборудования электромонтёр, находясь на земле, коснулся линейного провода с линейным напряжением $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{л \text{ ном}} = 380 \text{ В}$. Сопротивление изоляции проводов $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ кОм}$. Определить ток, протекающий по телу человека, сопротивление которого $R_h = 1000 \text{ Ом}$. Ёмкостью проводов относительно земли пренебречь ввиду их малой напряжённости (рис. 120).

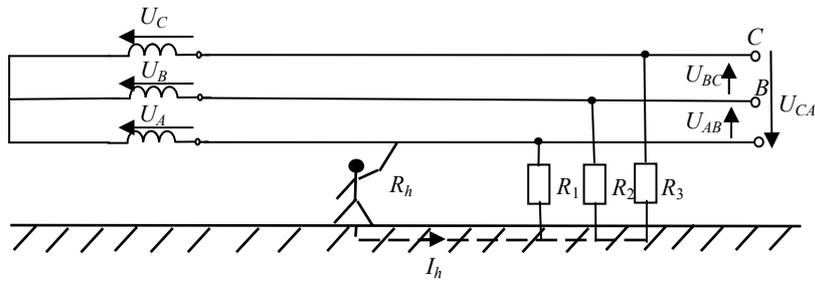


Рис. 120

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 $R_{3M} = 100$ Ом и прикосновении человека к исправной фазе A с фазным напряжением $U_{1\phi \text{ ном}} = 220$ В. Сопротивления изоляции проводников $R_1 = R_2 = R_3 = 10$ кОм, $R_h = 1$ кОм (рис. 121).

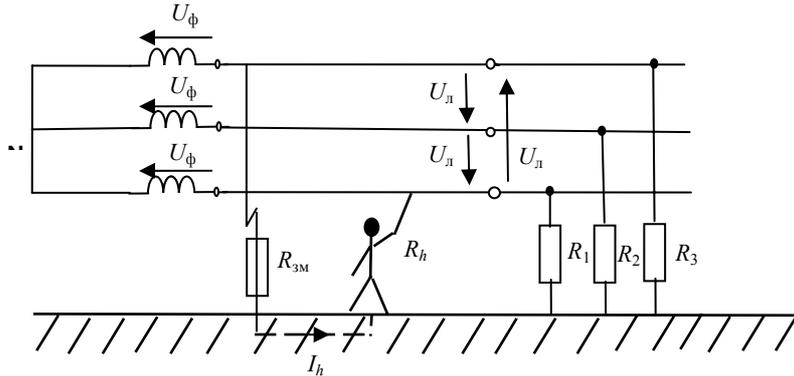


Рис. 121

Задача 4. Три группы осветительных ламп мощностью $P = 100$ Вт каждая с номинальным напряжением $U_{\text{ном}} = 220$ В соединены по схеме «звезда» с нейтральным проводом. При этом в фазе A включено параллельно $n_1 = 6$ лампы, в фазе $B - n_2 = 4$ лампы, в фазе $C - n_3 = 2$ лампы. Линейное симметричное напряжение источника питания $U_L = 380$ 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. 122).

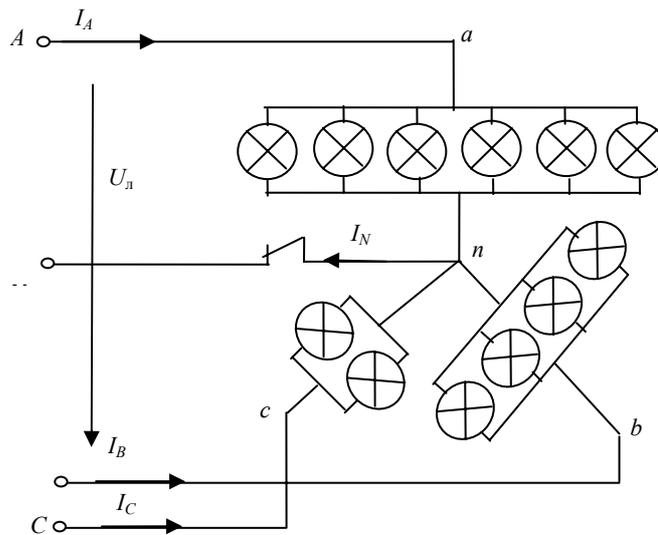


Рис. 122

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. 123).

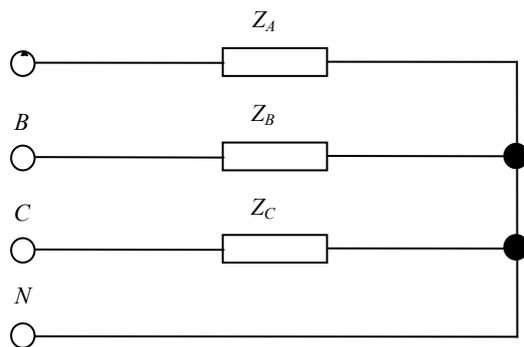


Рис. 123

Задача 7. $\dot{Z}_A = -j10$, Ом; $\dot{Z}_B = j10$, Ом; $\dot{Z}_C = j10$, Ом (рис. 124). Определить токи в линии до и после обрыва линейного провода B , построить векторные диаграммы, при $U_{л} = 127$ В, при $U_{л} = 220$ В.

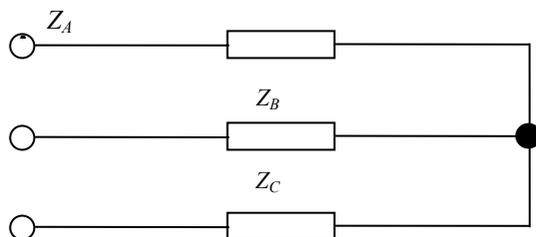


Рис. 124

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; $U_{л} = 220$ В; $\dot{Z}_N = 8$ Ом (рис. 125).

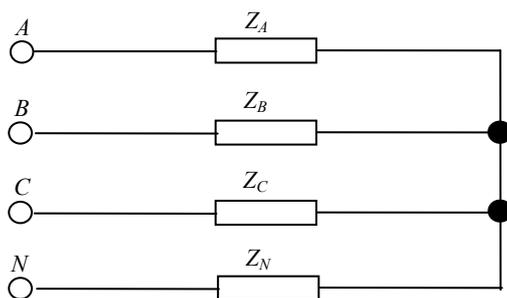


Рис. 125

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; $U_{л} = 380$ В (рис. 126).

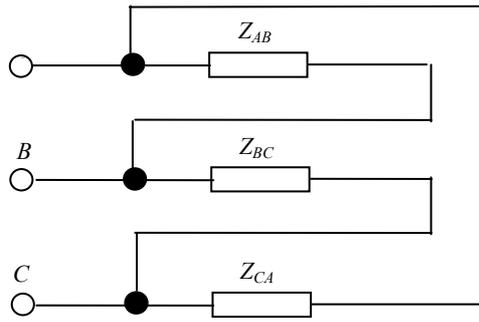


Рис. 126

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; $U_{л} = 380$ В (рис. 127).

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; $U_{л} = 380$ В (рис. 128).

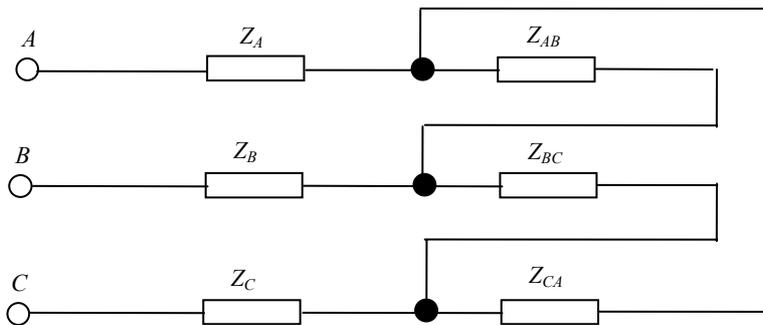


Рис. 127

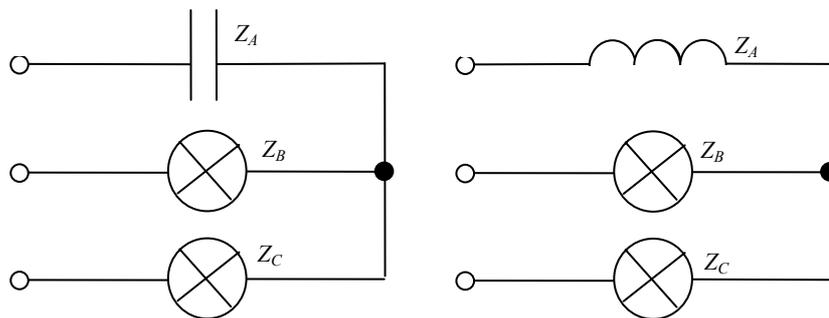


Рис. 128

15. ЗАДАНИЕ ДЛЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

По исходным данным, указанным в табл. 23, выполнить следующие задания:

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 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. Построить на комплексной плоскости совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений приёмников.
7. Соединить однофазную нагрузку треугольником и определить токи при обрыве фазы *C*. Построить векторную диаграмму.

Таблица 23

Номер варианта	Количество проводов	Напряжение в сети, В	Однофазный приёмник № 1					Однофазный приёмник № 2					Однофазный приёмник № 3					3-фазный симметричный приёмник № 4				
			$U_{\text{ном}}$, В	$P_{\text{н}}$, кВт	$Q_{\text{н}}$, квар	cos φ	Род нагрузки	$U_{\text{ном}}$, В	$P_{\text{н}}$, кВт	$Q_{\text{н}}$, квар	cos φ	Род нагрузки	$U_{\text{ном}}$, В	$P_{\text{н}}$, кВт	$Q_{\text{н}}$, квар	cos φ	Род нагрузки	$U_{\text{ном}}$, В	$P_{\text{н}}$, кВт	$Q_{\text{н}}$, 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
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

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
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	

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

8. Для указанного в пункте 7 соединения потребителей рассчитать токи при обрыве нагрузки в ветви AB . Построить векторные диаграммы.

9. Соединить однофазные приёмники в звезду с нулевым проводом. Определить ток через человека при соприкосновении с фазой C и нулевым проводом. Построить векторные диаграммы. Сопротивление человека принять равным $\dot{Z}_ч = 1000$ Ом.

10. Соединить однофазные приёмники в звезду без нулевого провода. Определить ток через человека при соприкосновении с фазой C и нулевой точкой нагрузки. Построить векторные диаграммы. Сопротивление человека принять равным $\dot{Z}_ч = 1000$ Ом.

11. Рассчитать токи и напряжения при коротком замыкании фазы B . Сопротивления последовательностей взять из таблицы исходных данных для несимметричного трёхфазного приёмника. Уровень напряжения задаётся преподавателем. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

12. В аналогичной трёхфазной системе п. 11 рассчитать токи и напряжения при двухфазном коротком замыкании между фазами A и C .

13. Рассчитать токи и напряжения при двухфазном коротком замыкании между фазами A и C на землю. Сопротивления последовательностей и уровень напряжения аналогичны п. 11.

14. Для представленной в исходных данных несимметричной трёхфазной нагрузки основной гармоники $f_1 = 50$ Гц, определить фазные и линейные токи и потребляемую мощность, если напряжения генератора для фазы A :

$$\dot{U}_A = U_1 \sin \omega t - U_3 \sin 3\omega t + U_5 \sin 5\omega t, \text{ В,}$$

где U_1 – напряжение по варианту задания;

$$U_3 = \frac{U_1}{n_3}; U_5 = \frac{U_1}{n_5};$$

n_3 – номер варианта с 1 по 20; с 20 по 40 номер варианта делится на 2,5; с 40 по 80 на 5; с 80 по 100 на 7,5 и т. д.;

$$n_5 = n_3 \cdot 3.$$

15. Рассчитать фильтр токов обратной последовательности определить ток, который он будет выделять при его включении в представленную в исходном задании трёхфазную систему несимметричных потребителей.

16. ПРИМЕРНЫЙ ВАРИАНТ РЕШЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

По исходным данным, указанным в табл. 24, выполним необходимые пункты.

Таблица 24

$U_{\text{сети}} = 220$ В	Однофазный приёмник № 1	Однофазный приёмник № 2	Однофазный приёмник № 3	Трёхфазный приёмник № 4
$U_{\text{ном}}$, В	220	220	220	380
$P_{\text{ном}}$, кВт	6	4	9	6
$Q_{\text{ном}}$, квар	–	–	–	–
$\cos\varphi_{\text{ном}}$	1	0,7	0,7	0,9
Род нагрузки	акт	инд	ёмк	инд

Решение

1. Схема включения приёмников и ваттметров для измерения суммарной активной мощности всех приёмников представлена на (рис. 129).

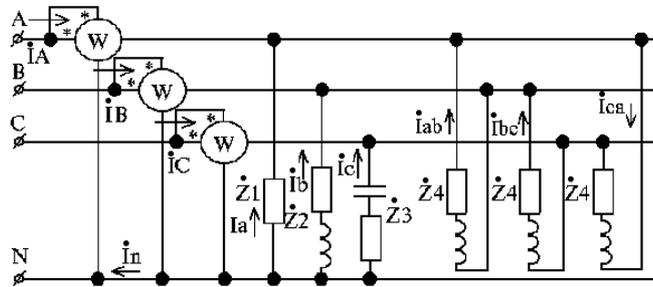


Рис. 129

2. Определим сопротивление элементов схемы замещения приёмников:

$$Z_1 = \frac{U_{1\text{ном}}^2 \cos\varphi_{1\text{ном}}}{P_{1\text{ном}}} = 8,067 \text{ Ом},$$

$$\varphi_1 = \arccos(\cos\varphi_{1\text{ном}}) = 0^\circ;$$

$$Z_2 = \frac{U_{2\text{ном}}^2 \cos\varphi_{2\text{ном}}}{P_{2\text{ном}}} = 8,47 \text{ Ом},$$

$$\varphi_2 = \arccos(\cos\varphi_{2\text{ном}}) = 46^\circ;$$

$$Z_3 = \frac{U_{3\text{ном}}^2 \cos\varphi_{3\text{ном}}}{P_{3\text{ном}}} = 3,764 \text{ Ом},$$

$$\varphi_3 = -\arccos(\cos\varphi_{3\text{ном}}) = -46^\circ;$$

$$Z_4 = \frac{U_{4\text{ном}}^2 \cos\varphi_{4\text{ном}}}{P_{4\text{ном}}/3} = 64,98 \text{ Ом},$$

$$\varphi_4 = \arccos(\cos\varphi_{4\text{ном}}) = 26^\circ.$$

В комплексной форме:

$$\dot{Z}_1 = 8,067e^{j0^\circ} = 8,067 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_2 = 8,47e^{j46^\circ} = 5,929 + j6,049 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_3 = 3,764e^{-j46^\circ} = 2,635 - j2,688 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_4 = 64,98e^{j26^\circ} = 58,482 + j28,324 \text{ Ом}.$$

3. Определим фазные и линейные токи приёмников:

$$\dot{U}_A = 220 \text{ В},$$

$$\dot{U}_B = 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190,526 \text{ В},$$

$$\dot{U}_C = 220e^{j120^\circ} = -110 + j190,526 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{ab} = 380e^{j30^\circ} = 329,09 + j190 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{bc} = 380e^{-j90^\circ} = -j380 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{ca} = 380e^{j150^\circ} = -329,09 + j190 \text{ В};$$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_1} = 27,273e^{j0^\circ} = 27,273 \text{ А},$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_2} = 25,974e^{-j166^\circ} = -25,155 - j6,471 \text{ А},$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_3} = 58,442e^{j166^\circ} = -56,599 + j14,561 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_4} = 5,848e^{j4^\circ} = 5,833 + j0,424 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\dot{Z}_4} = 5,848e^{-j116^\circ} = -2,549 - j5,263 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\dot{Z}_4} = 5,848e^{j124^\circ} = -3,283 + j4,839 \text{ А}.$$

Линейные токи:

$$\dot{I}_{A1} = -\dot{I}_{ab} - \dot{I}_A + \dot{I}_{ca} = -36,389 + j4,415 = 36,656e^{j173^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_{B1} = -\dot{I}_{bc} - \dot{I}_B + \dot{I}_{ab} = 33,537 + j12,159 = 35,673e^{j20^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_{C1} = -\dot{I}_{ca} - \dot{I}_C + \dot{I}_{bc} = 57,333 - j24,663 = 62,413e^{-j23^\circ} \text{ А}.$$

Ток нулевого провода: $\dot{I}_N = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = -54,481 + j8,089 = 55,078e^{j172^\circ} \text{ А}.$

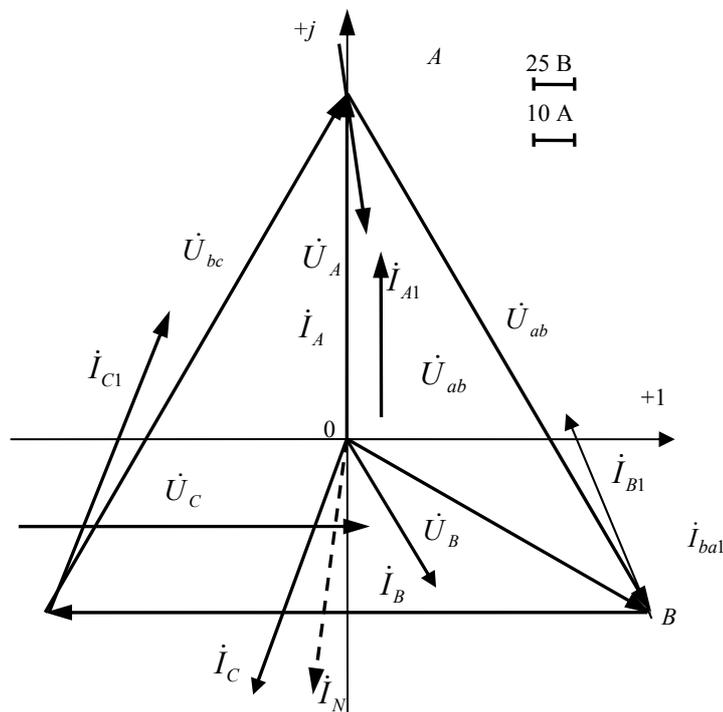


Рис. 130

4. Построим совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 130).

5. Мощность, показываемая ваттметрами:

$$P_1 = \operatorname{Re}(-\dot{U}_A I_{A1}^*) = 8006 \text{ Вт},$$

$$P_2 = \operatorname{Re}(-\dot{U}_A I_{B1}^*) = 6006 \text{ Вт},$$

$$P_3 = \operatorname{Re}(-\dot{U}_C I_{C1}^*) = 11\,010 \text{ Вт}.$$

Суммарная потребляемая мощность:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 25\,022 = 25,022 \text{ кВт}.$$

Согласно условию:

$$P = 6 + 4 + 9 + 6 = 25 \text{ кВт}.$$

6. Соединим однофазные приёмники звездой без нулевого провода. Схема будет выглядеть, как показано на рис. 131.

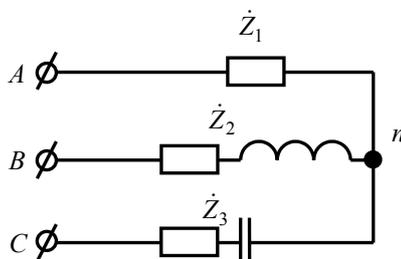


Рис. 131

Определим напряжение смещения нейтрали (рис. 132):

$$\dot{U}_N = \frac{\frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_1} + \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_2} + \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_3}}{\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3}} = 142,741e^{j171^\circ} = -140,901 + j22,843 \text{ В}.$$

Определим напряжение в фазах нагрузки:

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_A - \dot{U}_N = 360,901 - j22,843 = 361,623e^{-j4^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{B1} = \dot{U}_B - \dot{U}_N = 30,901 - j213,369 = 215,595e^{-j82^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{C1} = \dot{U}_C - \dot{U}_N = 30,901 + j167,682 = 170,506e^{j80^\circ} \text{ В}.$$

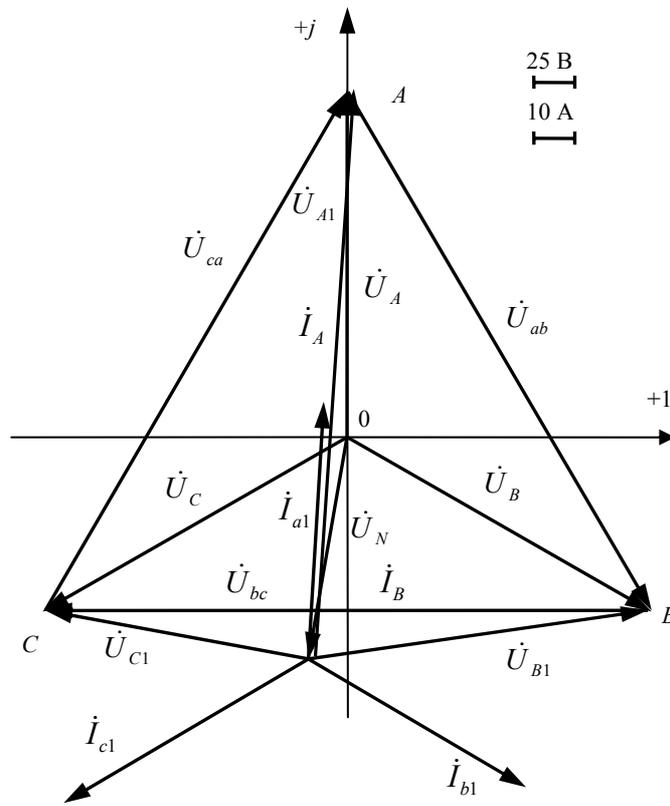


Рис. 132

Определим токи в фазах нагрузки:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \frac{\dot{U}_{A1}}{\dot{Z}_1} = 44,829e^{-j4^\circ} = 44,74 - j2,832 \text{ A}, \\ \dot{I}_{b1} &= \frac{\dot{U}_{B1}}{\dot{Z}_2} = 38,976e^{-j119^\circ} = -18,675 - j34,211 \text{ A}, \\ \dot{I}_{c1} &= \frac{\dot{U}_{C1}}{\dot{Z}_3} = 45,294e^{j125^\circ} = -26,065 + j37,043 \text{ A}. \end{aligned}$$

7. Определим токи в треугольнике при обрыве фазы C (см. рис. 133).

Фазные и линейные напряжения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= 220e^{j30^\circ} = 190,526 + j110 \text{ В}, \\ \dot{U}_{bc} &= 220e^{-j90^\circ} = -j220 \text{ В}, \\ \dot{U}_{ca} &= 220e^{j150^\circ} = -190,526 + j110 \text{ В}. \end{aligned}$$

134. Схема соединения приёмников в треугольник с обрывом фазы C показана на рис. 133, векторная диаграмма – на рис.

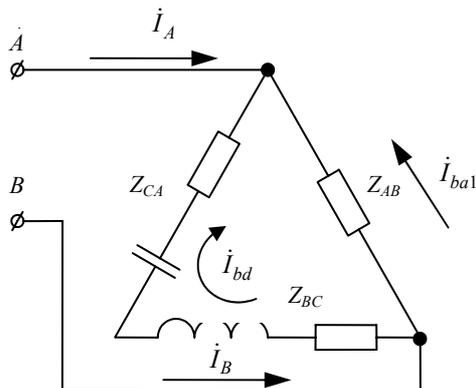


Рис. 133

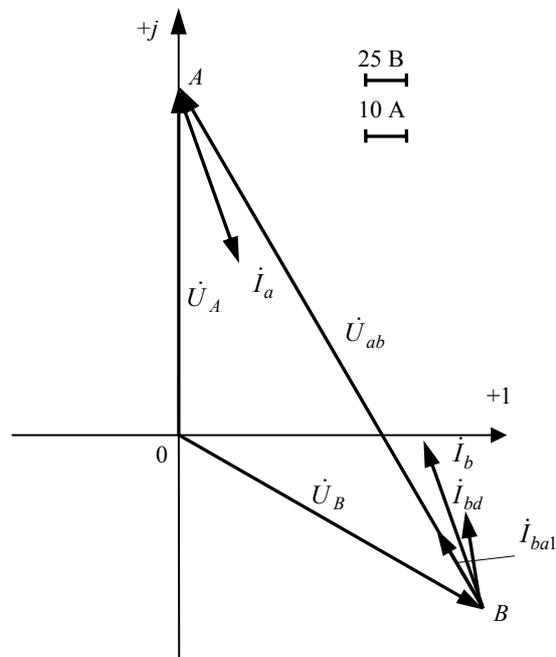


Рис. 134

Определим сопротивления элементов схемы замещения приём-ников:

$$Z_{AB} = \frac{U_{1\text{НОМ}}^2 \cos \varphi_{1\text{НОМ}}}{P_{1\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 1}{6000} = 8,07 \text{ Ом},$$

$$\varphi_{AB} = \arccos(\cos \varphi_{1\text{НОМ}}) = 0^\circ,$$

$$Z_{BC} = \frac{U_{2\text{НОМ}}^2 \cos \varphi_{2\text{НОМ}}}{P_{2\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{4000} = 8,47 \text{ Ом},$$

$$\varphi_{BC} = \arccos(\cos \varphi_{2\text{НОМ}}) = 46^\circ,$$

$$Z_{CA} = \frac{U_{3\text{НОМ}}^2 \cos \varphi_{3\text{НОМ}}}{P_{3\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{9000} = 3,76 \text{ Ом},$$

$$\varphi_{CA} = \arccos(\cos \varphi_{3\text{НОМ}}) = -46^\circ.$$

В комплексной форме:

$$\dot{Z}_{AB} = 8,07e^{j0^\circ} \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_{BC} = 8,47e^{j45,6^\circ} = 5,93 + j6,05 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_{CA} = 3,76e^{-j45,6^\circ} = 2,63 - j2,69 \text{ Ом}.$$

Определяем фазные токи приёмников:

$$\dot{I}_{ba1} = \frac{U_{ab}}{Z_{AB}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{8,07e^{j0^\circ}} = 27,26e^{j30^\circ} = 23,61 + j13,63 \text{ А},$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{bd} &= \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{5,93 + j6,05 + 2,63 - j2,69} = \frac{220e^{j30^\circ}}{9,196e^{j21^\circ}} = \\ &= 23,86e^{j9^\circ} = 23,55 + j3,73 \text{ А}. \end{aligned}$$

Определяем линейный ток приёмников:

$$\begin{aligned} \dot{I}_b &= \dot{I}_{ba1} + \dot{I}_{bd} = j13,63 + 23,61 + 23,55 + j3,73 = \\ &= 47,16 + j17,36 = 50,3e^{j20^\circ} \text{ A}, \\ \dot{I}_a &= -\dot{I}_b = -47,16 - j17,36 = 50,3e^{-j160^\circ} \text{ A}, \end{aligned}$$

8. Определим токи в нагрузке при обрыве ветви AB .

Схема соединения приёмников в треугольник, с обрывом нагрузки AB показана на рис. 135, векторная диаграмма – на рис. 136.

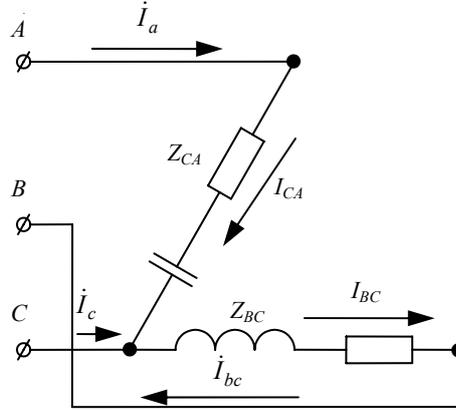


Рис. 135

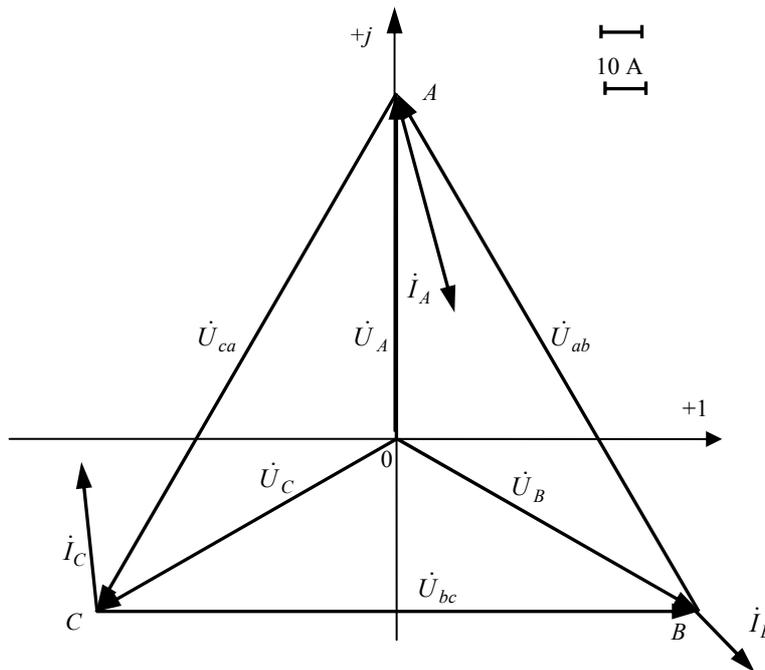


Рис. 136

Определяем фазные токи:

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\dot{Z}_{CA}} = \frac{220e^{j150^\circ}}{3,76e^{-j46^\circ}} = 58,51e^{-j164^\circ} = -56,24 - j16,13 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\dot{Z}_{BC}} = \frac{220e^{-j90^\circ}}{8,47e^{j46^\circ}} = 25,97e^{-j136^\circ} = -18,68 - j12,98 \text{ A},$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc}.$$

Определяем линейный ток:

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} = -18,68 - j12,98 + 56,24 + j16,13 = 39,83 + j3,15 = \\ &= 39,95e^{j6^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

9. Определим ток, протекающий через тело человека, при соприкосновении с фазой *C* и нулевым проводом.

Соединим приёмники в звезду с нулевым проводом (рис. 137), векторная диаграмма этого соединения представлена на рис. 138. Сопротивление человека примем равным $\dot{Z}_ч = 1000 \text{ Ом}$.

$$\dot{U}_A = 220 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_B = 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190,53 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_C = 220e^{j120^\circ} = -110 + j190,53 \text{ В.}$$

Определяем сопротивление элементов схемы замещения приём-ников:

$$Z_A = \frac{U_A^2 \cos \varphi_{1\text{НОМ}}}{P_{1\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 1}{6000} = 8,07 \text{ Ом,}$$

$$\varphi_A = \arccos(\cos \varphi_{1\text{НОМ}}) = 0^\circ,$$

$$Z_B = \frac{U_B^2 \cos \varphi_{2\text{НОМ}}}{P_{2\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{4000} = 8,47 \text{ Ом,}$$

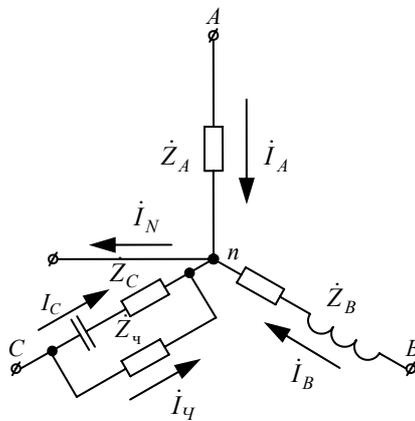


Рис. 137

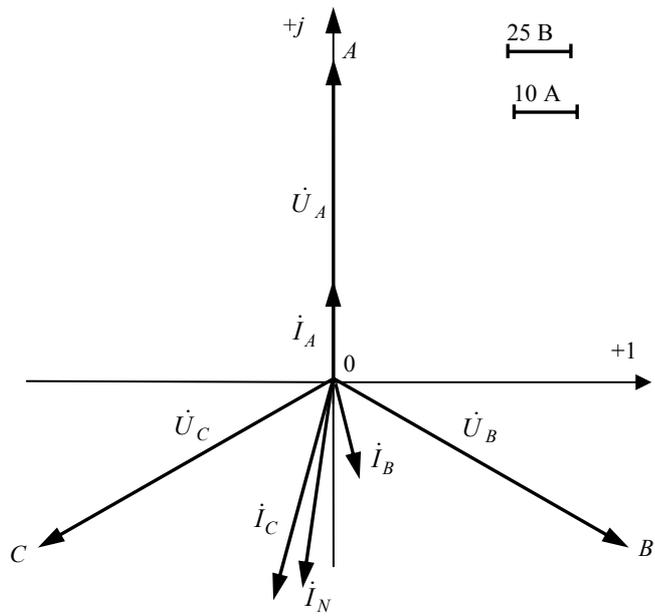


Рис. 138

$$\varphi_B = \arccos(\cos \varphi_{2\text{НОМ}}) = 46^\circ,$$

$$Z_C = \frac{U_C^2 \cos \varphi_{3\text{НОМ}}}{P_{3\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{9000} = 3,76 \text{ Ом},$$

$$\varphi_C = \arccos(\cos \varphi_{3\text{НОМ}}) = -46^\circ.$$

В комплексной форме:

$$Z_A = 8,07e^{j0^\circ} \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_B = 8,47e^{j46^\circ} = 5,93 + j6,05 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_C = 3,76e^{-j46^\circ} = 2,63 - j2,69 \text{ Ом}.$$

Сопrotивление фазы C с учётом человека

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{C1} &= \frac{\dot{Z}_C \cdot \dot{Z}_ч}{\dot{Z}_C + \dot{Z}_ч} = \frac{3,76e^{-j46^\circ} \cdot 1000}{2,63 - j2,69 + 1000} = \frac{3760e^{-j46^\circ}}{1002,6e^{-j0,15^\circ}} = \\ &= 3,75e^{-j46,15^\circ} = 2,62 - j2,67 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

Определяем фазные и линейные токи приёмников:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_A} = \frac{220e^{j0^\circ}}{8,07e^{j0^\circ}} = 27,27 \text{ А},$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_B} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{8,47e^{j46^\circ}} = 25,97e^{-j166^\circ} = -25,15 - j6,46 \text{ А},$$

$$\dot{i}_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_{C1}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{3,75e^{-j46,15^\circ}} = 58,67e^{j166,15^\circ} = -56,83 + j14,6 \text{ А.}$$

Определяем ток нейтрального провода:

$$\begin{aligned} I_N &= I_A + I_B + I_C = 27,27 - 25,15 - j6,46 - 56,83 + j14,6 = \\ &= -54,71 + j8,13 = 55,31e^{j172^\circ} \text{ А,} \end{aligned}$$

$$\dot{i}_{\text{чел}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{1000} = 0,22e^{j120^\circ} \text{ А.}$$

10. Определим ток, протекающий через человека, при соприкосновении с фазой С и нулевой точкой нагрузки. Соединим приёмники в звезду без нулевого провода (рис. 139), векторная диаграмма этого соединения показана на рис. 140. Сопротивление человека принять равным $\dot{Z}_q = 1000 \text{ Ом}$.

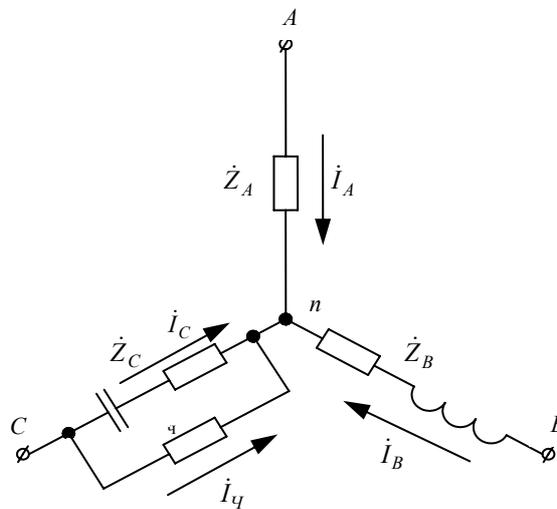


Рис. 139

$$\frac{1}{\dot{Z}_B} = \frac{1}{5,93 + j6,05} = \frac{5,93 - j6,05}{8,47} = 0,7 - j0,72 \text{ См,}$$

$$\frac{1}{\dot{Z}_C} = \frac{1}{2,62 - j2,67} = \frac{2,62 + j2,67}{3,74} = 0,7 + j0,72 \text{ См,}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= \frac{27,27 - 25,15 - j6,46 - 56,83 + j14,6}{0,12 + 0,7 - j0,72 + 0,7 + j0,72} = \frac{-54,71 + j8,14}{1,52} = \\ &= -35,9 + j5,34 = 36,3e^{j172^\circ} \text{ В.} \end{aligned}$$

Определяем напряжения в фазах нагрузки:

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_A - \dot{U}_N = 220 + 35,9 - j5,34 = 256 - j5,34 = 256e^{-j2^\circ} \text{ В,}$$

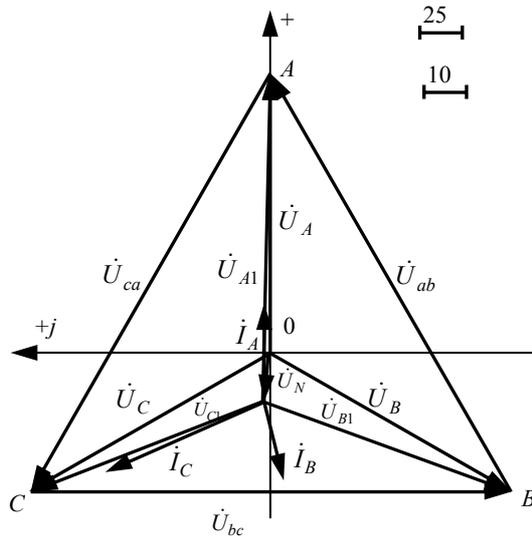


Рис. 140

$$\begin{aligned}\dot{U}_{B1} &= \dot{U}_B - \dot{U}_N = -110 - j190,53 + 35,9 - j5,34 = \\ &= -74,1 - j195,87 = 210e^{-j110^\circ} \text{ В},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{C1} &= \dot{U}_C - \dot{U}_N = -110 + j190,53 + 35,9 - j5,34 = \\ &= -74,1 + j185,19 = 199,5e^{j112^\circ} \text{ В};\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{\text{чел}} = \frac{199,5e^{j112^\circ}}{1000} = 0,2e^{j112^\circ} \text{ А},$$

Определяем токи в фазах нагрузки:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{A1}}{\dot{Z}_A} = \frac{256e^{-j2^\circ}}{8,07e^{j0^\circ}} = 31,7e^{-j2^\circ} = 31,69 - j0,98 \text{ А},$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{B1}}{\dot{Z}_B} = \frac{210e^{-j110^\circ}}{8,47e^{j46^\circ}} = 24,8e^{-j156^\circ} = -22,6 - j10,2 \text{ А},$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{C1}}{\dot{Z}_{C1}} = \frac{199,5e^{j112^\circ}}{3,75e^{-j46,15^\circ}} = 53,2e^{j156,15^\circ} = -19,77 + j21,64 \text{ А}.$$

11. Рассчитаем токи различных коротких замыканий для заданных сопротивлений последовательностей:

$$U_\phi = E = 220 \text{ В};$$

$$\dot{Z}_0 = 8,07e^{j0^\circ} \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_1 = 8,47e^{j45,6^\circ} = 5,93 + j6,05 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_2 = 3,76e^{-j45,6^\circ} = 2,63 - j2,69 \text{ Ом}.$$

Рассчитаем однофазное короткое замыкание в фазе B . Векторная диаграмма напряжений (рис. 141) и токов (рис. 142) дана при коротком замыкании фазы B .

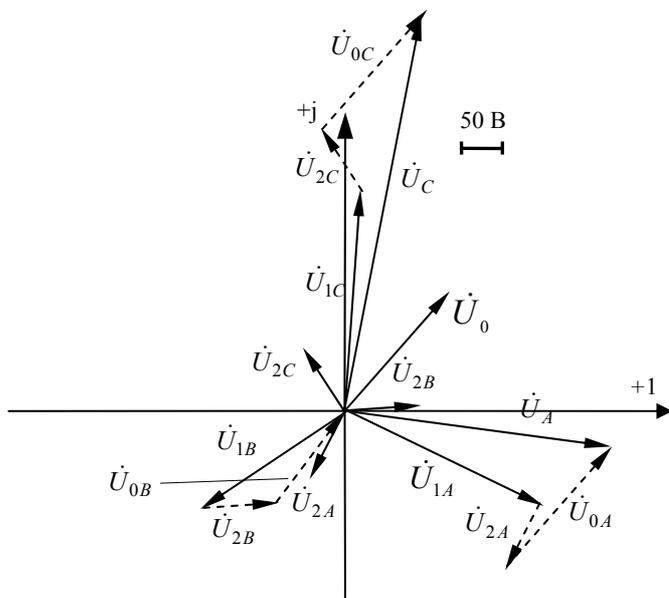


Рис. 141

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:

$$0 = I_0^{(1)} Z_0 + U_0^{(1)};$$

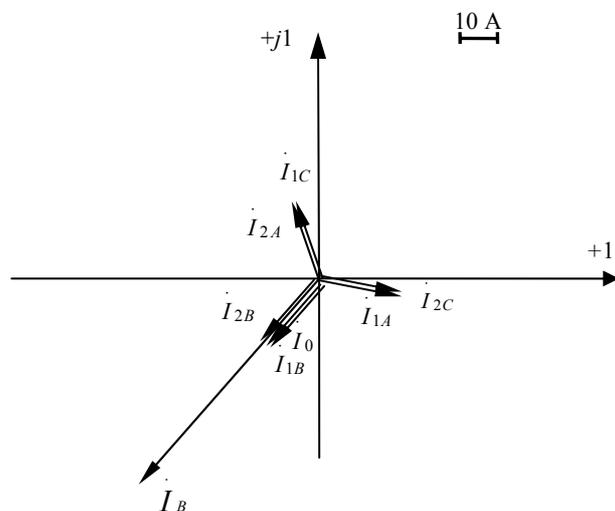


Рис. 142

$$E_1^{(1)} = I_1^{(1)} Z_1 + U_1^{(1)};$$

$$0 = I_2^{(1)} Z_2 + U_2^{(1)}.$$

Имеем
$$U_B^{(1)} = 0, I_A^{(1)} = I_C^{(1)} = 0;$$

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

$$E_B^{(1)} = \frac{1}{3} I_B^{(1)} \left(Z_0^{(1)} + Z_1^{(1)} + Z_2^{(1)} \right).$$

Значит,

$$\dot{I}_B = \frac{3 E_B^{(1)}}{\left(Z_0^{(1)} + Z_1^{(1)} + Z_2^{(1)} \right)} = \frac{3 \cdot 220 e^{-j120^\circ}}{8,07 + 5,93 + j6,05 + 2,63 - j2,69} =$$

$$= \frac{660 e^{-j120^\circ}}{16,97 e^{j11^\circ}} = 38,89 e^{-j131^\circ} \text{ A,}$$

$$I_{0B}^{(1)} = I_{1B}^{(1)} = I_{2B}^{(1)} = \frac{1}{3} I_B^{(1)} = 12,96 e^{-j131^\circ} \text{ A,}$$

$$U_{0B}^{(1)} = -I_{B1}^{(1)} Z_0^{(1)} = 8,07 \cdot (-12,96 e^{-j131^\circ}) = 104,61 e^{j49^\circ} \text{ B,}$$

$$U_{1B}^{(1)} = E_B^{(1)} - I_{B1}^{(1)} Z_1^{(1)} = 220 e^{-j120^\circ} - 12,96 e^{-j131^\circ} \cdot 8,47 e^{j46^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} -$$

$$-109,49 e^{-j85^\circ} = -119,27 - j80,93 = 144,14 e^{-j146^\circ} \text{ B,}$$

$$U_{2B}^{(1)} = -12,69 e^{-j131^\circ} \cdot 3,76 e^{-j46^\circ} = 48,66 + j2,55 \text{ B.}$$

Проверка:

$$U_B^{(1)} = U_{0B}^{(1)} + U_{1B}^{(1)} + U_{2B}^{(1)} = 0.$$

$$68,63 + j78,95 - 119,27 - j80,93 + 48,66 + j2,55 \approx 0 \text{ - верно.}$$

Фаза A:

$$U_{0A}^{(1)} = U_{0B}^{(1)} = 104,61 e^{j49^\circ} = 68,63 + j78,95 \text{ B,}$$

$$U_{1A}^{(1)} = a U_{1B}^{(1)} = e^{j120^\circ} \cdot 144,14 e^{-j146^\circ} = 144,14 e^{-j26^\circ} = 129,55 - j63,19 \text{ B,}$$

$$U_{2A}^{(1)} = \frac{1}{a} U_{2B}^{(1)} = e^{-j120^\circ} \cdot 48,73 e^{j3^\circ} = 48,73 e^{-j117^\circ} = -22,12 - j43,42 \text{ B,}$$

$$U_A^{(1)} = U_{0A}^{(1)} + U_{1A}^{(1)} + U_{2A}^{(1)} = 68,63 + j78,95 + 129,55 + j63,19 - 22,12 - j43,42 = 175,92 - j27,76 = 178,09 e^{-j9^\circ} \text{ B,}$$

Фаза C:

$$U_{0C}^{(1)} = U_{0B}^{(1)} = 104,69 e^{j49^\circ} \text{ B,}$$

$$U_{1C}^{(1)} = \frac{1}{a} U_{1B}^{(1)} = e^{-j120^\circ} \cdot 144,14 e^{-j146^\circ} = 144,14 e^{j86^\circ} = 10,05 + j143,79 \text{ B,}$$

$$U_{2C}^{(1)} = a U_{2B}^{(1)} = e^{j120^\circ} \cdot 48,73 e^{j3^\circ} = 48,73 e^{j123^\circ} = -25,54 + j40,87 \text{ B,}$$

$$U_C^{(1)} = U_{0C}^{(1)} + U_{1C}^{(1)} + U_{2C}^{(1)} = 68,63 + j78,95 + 10,05 + j143,79 -$$

$$-26,54 + j40,82 = 52,14 + j263,56 = 268,67 e^{j79^\circ} \text{ B.}$$

12. Рассчитаем двухфазное короткое замыкание между фазами A и C . Векторная диаграмма токов (рис. 143) и напряжений (рис. 144) дана при двухфазном коротком замыкании фаз A и C .

Построим векторные диаграммы. При коротком замыкании между фазами A и C : $\dot{I}_{kB}^{(2)} = 0$; $\dot{I}_{kA}^{(2)} = -\dot{I}_{kC}^{(2)}$; $\dot{U}_{kB}^{(2)} - \dot{U}_{kC}^{(2)} = 0$;
 $\dot{I}_{k0}^{(2)} = 0$.

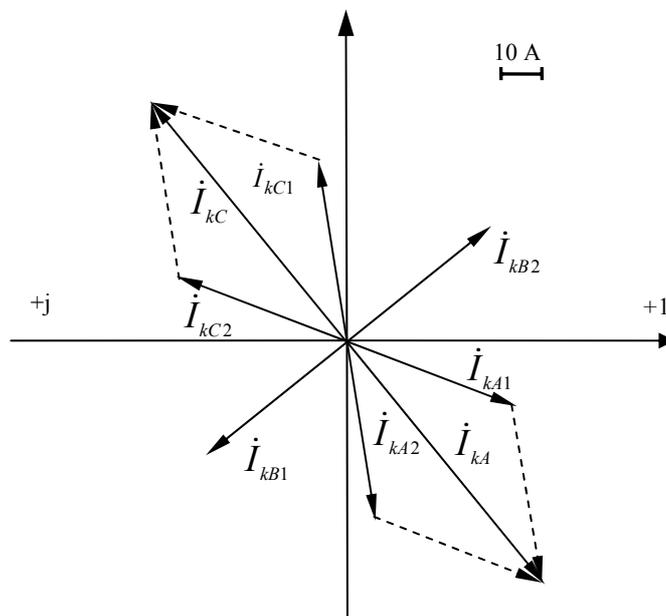


Рис. 143

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,

$$\dot{U}_{kB1}^{(2)} = \dot{U}_{kB2}^{(2)};$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kB1}^{(2)} &= \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{5,93 + j6,05 + 2,63 - j2,96} = 23,84e^{-j141^\circ} = \\ &= -18,53 - j15,00 \text{ A}, \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{kB2}^{(2)} = -\dot{I}_{kB1}^{(2)} = e^{j180^\circ} \cdot 23,84e^{-j141^\circ} = 23,84e^{j39^\circ} = 18,53 + j15,00 \text{ A}.$$

Токи в повреждённых фазах:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kC} &= -j\sqrt{3}\dot{I}_{kB1}^{(2)} = 1,73e^{-j90^\circ} \cdot 23,84e^{-j141^\circ} = 41,29e^{-j51^\circ} = \\ &= 25,98 - j32,09 \text{ A}, \end{aligned}$$

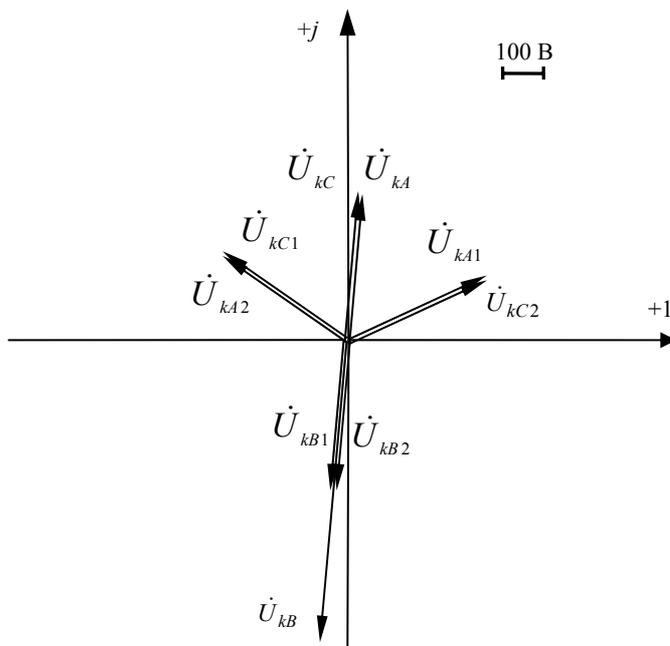


Рис. 144

$$I_{kA}^{(2)} = j\sqrt{3}I_{kB2}^{(2)} = 1,73e^{j90^\circ} \cdot 23,84e^{j39^\circ} = 41,29e^{j129^\circ} = -25,98 + j32,9 \text{ A,}$$

$$I_{kA1}^{(2)} = a I_{kB1}^{(2)} = e^{j120^\circ} 41,3e^{-j141^\circ} = 23,84e^{-j21^\circ} \text{ A,}$$

$$I_{kA2}^{(2)} = \frac{1}{a} I_{kB2}^{(2)} = e^{-j120^\circ} 41,3e^{j39^\circ} = 23,84e^{-81^\circ} \text{ A,}$$

$$I_{kC1}^{(2)} = \frac{1}{a} I_{kB1}^{(2)} = e^{-j120^\circ} 23,84e^{-j141^\circ} = 23,84e^{-j81^\circ} \text{ A,}$$

$$I_{kC2}^{(2)} = a I_{kB2}^{(2)} = e^{j120^\circ} 23,84e^{j39^\circ} = 23,84e^{j159^\circ} \text{ A,}$$

$$U_{kB1}^{(2)} = U_{kB2}^{(2)} = Z_1 I_{kB1}^{(2)} = 8,47e^{j46^\circ} \cdot 23,84e^{-j141^\circ} = 201,92e^{-j95^\circ} = -17,5 - j20,15 \text{ B.}$$

Фаза A:

$$U_{kA1}^{(2)} = a U_{kB1}^{(2)} = e^{j120^\circ} 201,92e^{-j95^\circ} = 201,92e^{j25^\circ} = 183,00 + j84,34 \text{ B,}$$

$$U_{kA2}^{(2)} = \frac{1}{a} U_{kB2}^{(2)} = e^{-j120^\circ} 201,92e^{-j95^\circ} = 201,92e^{j135^\circ} = -165,4 + j115,82 \text{ B,}$$

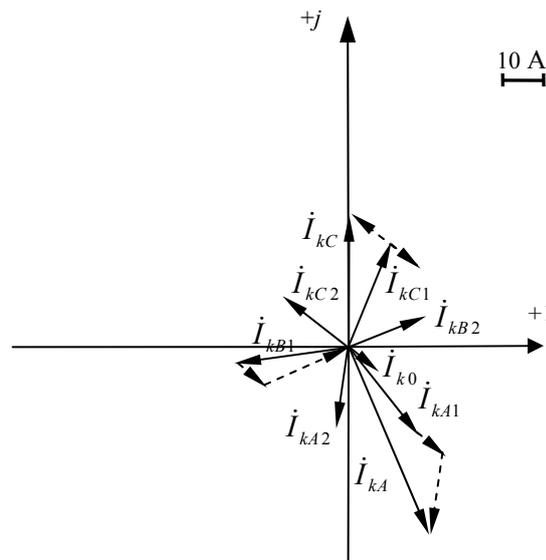
$$U_{kA}^{(2)} = U_{kA1}^{(2)} + U_{kA2}^{(2)} = 183,00 + j84,34 - 165,4 + j115,82 = 17,6 + j201,16 = 201,93e^{j85^\circ} \text{ B.}$$

Фаза C:

$$\begin{aligned}
 U_{kC1}^{(2)} &= \frac{1}{a} U_{kB1}^{(2)} = e^{-j120^\circ} 201,92 e^{-j95^\circ} = 201,92 e^{j135^\circ} = \\
 &= -165,4 + j115,82 \text{ В}, \\
 U_{kC2}^{(2)} &= a U_{kB2}^{(2)} = e^{j120^\circ} 201,92 e^{-j95^\circ} = 201,92 e^{j25^\circ} = 183 + j85,34 \text{ В}, \\
 U_{kC}^{(2)} &= U_{kC1}^{(2)} + U_{kC2}^{(2)} = -165,4 + j115,82 + 183 + j85,34 = \\
 &= 17,5 + j201,16 = 201,93 e^{85^\circ} \text{ В}.
 \end{aligned}$$

13. Рассчитаем двухфазное короткое замыкание между фазами A и C на землю. Векторная диаграмма токов (рис. 145) и напряжений (рис. 146) дана при двухфазном коротком замыкании фаз A и C .

$$\begin{aligned}
 I_{kB1}^{(2,1)} &= \frac{E^{(2,1)}}{Z_1 + \frac{Z_2^{(2,1)} Z_0^{(2,1)}}{Z_2^{(2,1)} + Z_0^{(2,1)}}} = \frac{220 e^{-j120^\circ}}{5,93 + j6,05 + \frac{8,47 e^{j46^\circ} \cdot 8,07}{2,63 - j2,69 + 8,07}} = \\
 &= \frac{220 e^{-j120^\circ}}{14,56 e^{j52^\circ}} = 15,17 e^{-j172^\circ} \text{ А},
 \end{aligned}$$



$$I_{kB2}^{(2,1)} = -I_{kB1}^{(2,1)} \frac{Z_0^{(2,1)}}{Z_2^{(2,1)} + Z_0^{(2,1)}} = -15,17 e^{-j172^\circ} \cdot \frac{8,07 e^{j0^\circ}}{11,03 e^{-j14^\circ}} = 11,1 e^{j22^\circ} \text{ А},$$

Рис. 145

$$I_{kB0}^{(2,1)} = -I_{kB1}^{(2,1)} \frac{Z_2^{(2,1)}}{Z_2^{(2,1)} + Z_0^{(2,1)}} = -15,17 e^{-j172^\circ} \cdot \frac{3,76 e^{-j46^\circ}}{11,03 e^{-j14^\circ}} = 5,17 e^{-j40^\circ} \text{ А},$$

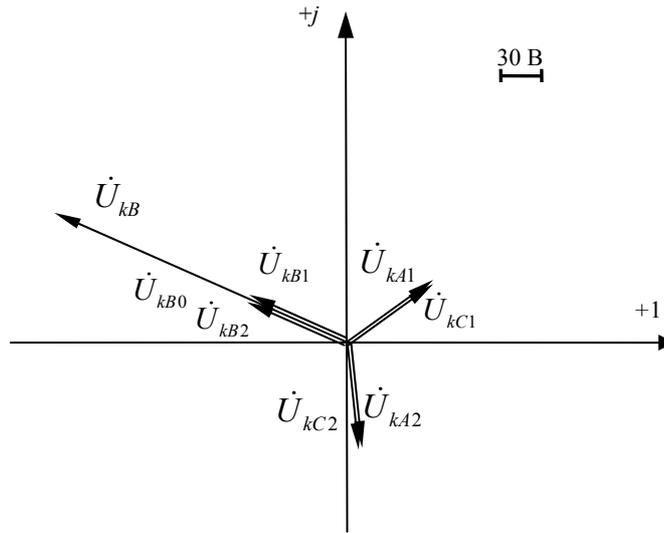


Рис. 146

$$I_{kA1}^{(2,1)} = a I_{kB1}^{(2,1)} = e^{j120^\circ} 15,17e^{-j172^\circ} = 15,17e^{-j52^\circ} \text{ A},$$

$$I_{kA2}^{(2,1)} = \frac{1}{a} I_{kB2}^{(2,1)} = e^{-j120^\circ} 11,1e^{j22^\circ} = 11,1e^{-j98^\circ} \text{ A},$$

$$I_{kC1}^{(2,1)} = \frac{1}{a} I_{kB1}^{(2,1)} = e^{-j120^\circ} 15,17e^{-j172^\circ} = 15,17e^{-j68^\circ} \text{ A},$$

$$I_{kC2}^{(2,1)} = a I_{kB2}^{(2,1)} = e^{j120^\circ} 11,1e^{j22^\circ} = 11,1e^{j142^\circ} \text{ A},$$

$$U_{kB2}^{(2,1)} = U_{kB0}^{(2,1)} = U_{kB1}^{(2,1)} = I_{kB1}^{(2,1)} \frac{Z_2 Z_0^{(2,1)}}{Z_2 + Z_0^{(2,1)}}, \quad U_{kB}^{(2,1)} = 3 U_{kB1}^{(2,1)},$$

$$U_{kB1}^{(2,1)} = \frac{3,76e^{-j46^\circ} \cdot 8,07}{11,03e^{-j14^\circ}} \cdot 15,17e^{-j172^\circ} = 41,73e^{j156^\circ} \text{ B},$$

$$U_{kC}^{(2,1)} = U_{kB0}^{(2,1)} + a^2 U_{kB1}^{(2,1)} + a U_{kB2}^{(2,1)} = 41,73e^{j156^\circ} + e^{j-120^\circ} 41,73e^{j156^\circ} + e^{j120^\circ} 41,73e^{j156^\circ} = 0 \text{ B},$$

$$U_{kA}^{(2,1)} = U_{kB0}^{(2,1)} + a U_{kB1}^{(2,1)} + a^2 U_{kB2}^{(2,1)} = 41,73e^{j156^\circ} + 41,73e^{j36^\circ} + 41,73e^{-j84^\circ} = 0 \text{ B},$$

$$U_{kA}^{(2,1)} = U_{kC}^{(2,1)} = 0.$$

14. Рассчитаем токи в несинусоидальной трёхфазной системе рис. 147).

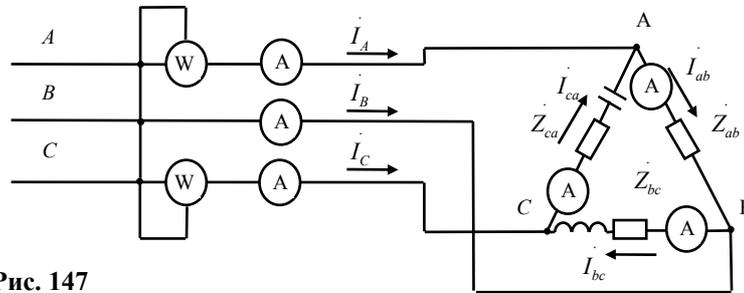


Рис. 147

$$U_{ab} = \left(220 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) - 73,35 \sin 3\omega t + 24,4 \sin \left(5\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \right) \text{ В,}$$

$$U_{ab} = \left(220 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) - 73,35 \sin 3\omega t + 24,4 \sin \left(5\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \right) \text{ В,}$$

$$U_{ab} = \left(220 \sin \left(\omega t + \frac{5\pi}{6} \right) - 73,35 \sin 3\omega t + 24,4 \sin \left(5\omega t - \frac{5\pi}{6} \right) \right) \text{ В.}$$

Произведем расчёт сопротивлений и токов первой гармоники:

$$\varphi_{ab} = \arccos(\cos \varphi_{1\text{НОМ}}) = 0^\circ,$$

$$Z_{ab} = \frac{U_{1\text{НОМ}}^2 \cos \varphi_{1\text{НОМ}}}{P_{1\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 1}{6000} = 8,07 e^{j0^\circ} \text{ Ом,}$$

$$\varphi_{bc} = \arccos(\cos \varphi_{2\text{НОМ}}) = 45,6^\circ,$$

$$Z_{bc} = \frac{U_{2\text{НОМ}}^2 \cos \varphi_{2\text{НОМ}}}{P_{2\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{4000} = 8,47 e^{j45,6^\circ} = 5,93 + j6,05 \text{ Ом,}$$

$$\varphi_{ca} = \arccos(\cos \varphi_{3\text{НОМ}}) = -45,6^\circ$$

$$Z_{ca} = \frac{U_{3\text{НОМ}}^2 \cos \varphi_{3\text{НОМ}}}{P_{3\text{НОМ}}} = \frac{220^2 \cdot 0,7}{9000} = 3,76 e^{-j45,6^\circ} = 2,63 - j2,69 \text{ Ом;}$$

$$I_{ab}^{(1)} = \frac{U_{ab}^{(1)}}{z_{ab}} = \frac{220 e^{j30^\circ}}{8,07 e^{j0^\circ}} = 27,26 e^{j30^\circ} = 23,61 + j13,63 \text{ А,}$$

$$I_{bc}^{(1)} = \frac{U_{bc}^{(1)}}{z_{bc}} = \frac{220 e^{j90^\circ}}{8,47 e^{j45,6^\circ}} = 25,97 e^{-j135,6^\circ} = -18,35 - j18,36 \text{ А,}$$

$$I_{ca}^{(1)} = \frac{U_{ca}^{(1)}}{z_{ca}} = \frac{220 e^{j150^\circ}}{3,76 e^{-j45,6^\circ}} = 58,51 e^{j104,4^\circ} = -14,15 + j56,77 \text{ А.}$$

Определим параметры трёхфазной цепи:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{6,05}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0190 \text{ Гн;}$$

$$C = \frac{1}{X_C \omega} = \frac{1}{X_C 2\pi f} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,69 \cdot 50} = 0,0011 \text{ Ф.}$$

Произведем расчёт сопротивлений и токов третьей гармоники:

$$z_{ab}^{(3)} = z_{ab}^{(1)} = 8,07 \text{ Ом,}$$

$$z_{bc}^{(3)} = R_{bc} + 3j2\pi fL = 5,93 + 3j2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0190 =$$

$$= 5,93 + j17,90 = 18,86 e^{j72,7^\circ} \text{ Ом,}$$

$$z_{ca}^{(3)} = R_{ca} + \frac{1}{3j2\pi fC} = 2,63 - \frac{1}{3j \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0011} =$$

$$= 2,63 - j0,97 = 2,8 e^{-j20,2^\circ} \text{ Ом;}$$

$$I_{ab}^{(3)} = \frac{U_{ab}^{(3)}}{z_{ab}^{(3)}} = \frac{-73,3}{8,07} = -9,08 \text{ A,}$$

$$I_{bc}^{(3)} = \frac{U_{bc}^{(3)}}{z_{bc}^{(3)}} = \frac{-73,3}{18,86e^{j71,7^\circ}} = 3,87e^{-j71,7^\circ} = 1,20 - j3,68 \text{ A,}$$

$$I_{ca}^{(3)} = \frac{U_{ca}^{(3)}}{z_{ca}^{(3)}} = \frac{-73,3}{2,8e^{-j20,2^\circ}} = 26,18e^{j20,2^\circ} = -24,6 + j8,95 \text{ A.}$$

Произведем расчёт сопротивлений и токов для пятой гармоники:

$$z_{ab}^{(5)} = z_{ab}^{(1)} = 8,07 \text{ Ом,}$$

$$z_{bc}^{(5)} = R_{bc} + 5j2\pi fL = 5,93 + 5j \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0190 = 5,93 + j29,83 = 30,41e^{j78,8} \text{ Ом,}$$

$$z_{ca}^{(5)} = R_{ca} + \frac{1}{5j2\pi fC} = 2,63 - \frac{1}{5j \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0011} = 2,63 - j1,61 = 3,09e^{-j31,6} \text{ Ом;}$$

$$I_{ab}^{(5)} = \frac{U_{ab}^{(5)}}{z_{ab}^{(5)}} = \frac{24,4e^{-j30^\circ}}{8,07e^{j0^\circ}} = 3,02e^{-j30^\circ} = 2,62 - j1,51 \text{ A,}$$

$$I_{bc}^{(5)} = \frac{U_{bc}^{(5)}}{z_{bc}^{(5)}} = \frac{24,4e^{j90^\circ}}{8,07e^{j0^\circ}} = 0,80e^{j11,2^\circ} = 0,78 + j0,02 \text{ A,}$$

$$I_{ca}^{(5)} = \frac{U_{ca}^{(5)}}{z_{ca}^{(5)}} = \frac{24,4e^{-j150^\circ}}{3,09e^{-j31,6^\circ}} = 7,90e^{-j118,4^\circ} = -3,71 - j6,98 \text{ A.}$$

Рассчитаем фазные токи для первой гармоники:

$$I_A^{(1)} = I_{ca}^{(1)} - I_{ab}^{(1)} = -14,5 + j56,77 - 23,61 - j13,63 = I_B^{(1)} = I_{ab}^{(1)} - I_{bc}^{(1)} = 23,61 + 13,63 + 18,36 + j18,36 = -37,76 + j43,14 = 57,33e^{j131,2^\circ} \text{ A,} \quad I_B^{(1)} = 41,97 + j31,99 = 52,77e^{j37,3^\circ} \text{ A,}$$

$$I_C^{(1)} = I_{bc}^{(1)} - I_{ca}^{(1)} = -18,36 - j18,36 + 14,15 - j56,77 = -4,21 - j75,13 = 75,25e^{-j94^\circ} \text{ A.}$$

Рассчитаем фазные токи для третьей гармоники:

$$I_A^{(3)} = I_{ca}^{(3)} - I_{ab}^{(3)} = 24,60 + j8,95 + 9,08 = 33,68 + j8,95 = 34,85e^{j15^\circ} \text{ A,}$$

$$I_B^{(3)} = I_{ab}^{(3)} - I_{bc}^{(3)} = -9,08 - 1,2 + j3,68 = -1,2 - j5,4 = 5,53e^{-j103^\circ} \text{ A,}$$

$$I_C^{(3)} = I_{bc}^{(3)} - I_{ca}^{(3)} = 1,20 - j3,68 - 24,60 - j8,95 = -23,40 - j12,63 = 26,59e^{-j152^\circ} \text{ A.}$$

Рассчитаем фазные токи для пятой гармоники:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{ca} - I_{ab} = -3,71 - j6,98 - 2,62 + j1,51 = \\ &= -6,33 - j5,47 = 8,37e^{-j139^\circ} \text{ A,} \end{aligned}$$

$$I_B = I_{ab} - I_{bc} = 2,62 - j1,51 - 0,78 - j0,02 = 1,84 - j1,53 = 2,39e^{-j40^\circ} \text{ A,}$$

$$I_C = I_{bc} - I_{ca} = 0,78 + j0,02 + 3,71 + j6,98 = 4,49 + j7,00 = 8,32e^{j57^\circ} \text{ A.}$$

Вычислим показания амперметров:

$$I_{ab} = \sqrt{\frac{I_{ab}^{(1)2}}{2} + \frac{I_{ab}^{(3)2}}{2} + \frac{I_{ab}^{(5)2}}{2}} = \sqrt{\frac{27,26^2}{2} + \frac{9,08^2}{2} + \frac{3,02^2}{2}} = 20,43 \text{ A,}$$

$$I_{bc} = \sqrt{\frac{I_{bc}^{(1)2}}{2} + \frac{I_{bc}^{(3)2}}{2} + \frac{I_{bc}^{(5)2}}{2}} = \sqrt{\frac{25,97^2}{2} + \frac{3,87^2}{2} + \frac{0,8^2}{2}} = 18,08 \text{ A,}$$

$$I_{ca} = \sqrt{\frac{I_{ca}^{(1)2}}{2} + \frac{I_{ca}^{(3)2}}{2} + \frac{I_{ca}^{(5)2}}{2}} = \sqrt{\frac{58,51^2}{2} + \frac{26,18^2}{2} + \frac{7,9^2}{2}} = 45,67 \text{ A,}$$

$$I_A = \sqrt{\frac{I_A^{(1)2}}{2} + \frac{I_A^{(3)2}}{2} + \frac{I_A^{(5)2}}{2}} = \sqrt{\frac{57,33^2}{2} + \frac{34,85^2}{2} + \frac{8,37^2}{2}} = 47,81 \text{ A,}$$

$$I_B = \sqrt{\frac{I_B^{(1)2}}{2} + \frac{I_B^{(3)2}}{2} + \frac{I_B^{(5)2}}{2}} = \sqrt{\frac{52,77^2}{2} + \frac{5,53^2}{2} + \frac{2,39^2}{2}} = 37,56 \text{ A,}$$

$$I_C = \sqrt{\frac{I_C^{(1)2}}{2} + \frac{I_C^{(3)2}}{2} + \frac{I_C^{(5)2}}{2}} = \sqrt{\frac{75,25^2}{2} + \frac{26,59^2}{2} + \frac{8,37^2}{2}} = 56,74 \text{ A.}$$

Вычислим показания ваттметров:

$$\Sigma P = P_1 + P_2,$$

$$\begin{aligned} P_1 &= \operatorname{Re} \left[U_{ab} I_A^* \right] = \operatorname{Re} \left[U_{ab}^{(1)} I_A^{*(1)} + U_{ab}^{(3)} I_A^{*(3)} + U_{ab}^{(5)} I_A^{*(5)} \right] = \\ &= \operatorname{Re} \left[\begin{aligned} &220e^{j30^\circ} \cdot 57,33e^{j131,2^\circ} + \\ &+ 73,3e^{-j180^\circ} \cdot 34,85e^{-j15^\circ} + \\ &+ 24,4e^{-j30^\circ} \cdot 8,37e^{-j139^\circ} \end{aligned} \right] = 4941 \text{ Вт,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= \operatorname{Re} \left[U_{cb} I_B^* \right] = \operatorname{Re} \left[U_{cb}^{(1)} I_B^{*(1)} + U_{cb}^{(3)} I_B^{*(3)} + U_{cb}^{(5)} I_B^{*(5)} \right] = \\ &= \operatorname{Re} \left[\begin{aligned} &220e^{j90^\circ} \cdot 75,25e^{94^\circ} + \\ &+ 73,3e^{j180^\circ} \cdot 26,59e^{j152^\circ} + \\ &+ 24,4e^{-j90^\circ} \cdot 8,32e^{-j57^\circ} \end{aligned} \right] = 14\,964 \text{ Вт,} \end{aligned}$$

$$\Sigma P = P_1 + P_2 = 4941 + 14\,964 = 19\,905 \text{ Вт.}$$

15. Разработаем и рассчитаем фильтр токов обратной последовательности.
Параметры фильтра:

$$M = \frac{R}{\sqrt{3}w}, \quad R = 10 \text{ Ом,}$$

$$M = \frac{R}{\sqrt{3}w} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 50 \cdot 3,14} = 0,0184 \text{ Гн.}$$

Схема фильтра (рис. 148):

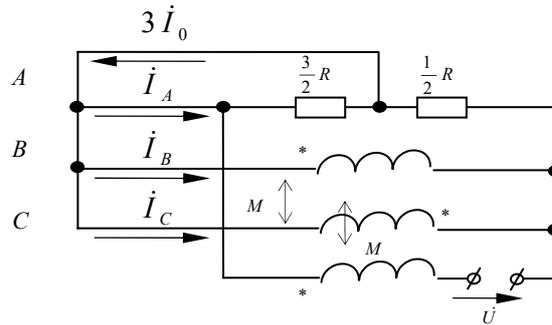


Рис. 148

Рассчитаем ток обратной последовательности, выделяемый ильтром:

$$\dot{i} = \frac{\frac{2}{3}R\dot{I}_A - \frac{1}{3}R(\dot{I}_B + \dot{I}_C) - j\omega M(\dot{I}_B - \dot{I}_C)}{2R} = \frac{1}{3}\dot{I}_A - \frac{1}{6}(\dot{I}_B + \dot{I}_C) - j\omega(\dot{I}_B - \dot{I}_C),$$

$$\begin{aligned} \dot{i} &= \frac{1}{3}27,27 - \frac{1}{6}(-25,155 - j6,471 - 56,999 + j14,561) - \\ &- j\omega \frac{0,0184}{2 \cdot 10}(-25,155 - j6,471 + 56,599 - j14,561) = \\ &= 13,632 + j4,728 = 14,429e^{j19^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

17. ТЕСТЫ

1. При вращении рамок против часовой стрелки в них индуцируются ЭДС, изображенные на рис. 149. Какие ЭДС индуцируются при вращении рамок по часовой стрелке?

- 1) Те же самые.
- 2) Знаки начальных фаз изменятся на противоположные.
- 3) Направления векторов ЭДС в рамках изменятся на противоположные.
- 4) Изменяется амплитуда ЭДС в рамках.

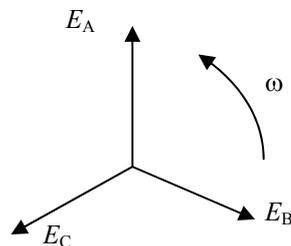


Рис. 149

2. Изменится ли действующее значение трёхфазной ЭДС при изменении направления вращения рамок?

- 1) Не изменяется.
- 2) Уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.
- 3) Увеличивается в $\sqrt{2}$ раз.
- 4) Увеличивается в $\sqrt{3}$ раз.

3. Какие характеристики ЭДС изменятся, если при прочих, равных условиях увеличить частоту вращения рамок?

- 1) Частота и начальные фазы.
- 2) Частота и амплитуда.

- 3) Амплитуда и начальные фазы.
 - 4) Амплитуда.
4. Сколько соединительных проводов подводят к генератору, обмотки которого образуют звезду?
 - 1) 6.
 - 2) 3 или 4.
 - 3) 3.
 - 4) 4.
 5. С какой точкой соединяется начало первой обмотки при включении обмоток генератора треугольником?
 - 1) С началом второй.
 - 2) С концом второй.
 - 3) С концом третьей.
 - 4) С началом третьей.
 6. Укажите правильное определение фазы.
 - 1) Фазой называется аргумент синуса.
 - 2) Фазой называют часть многофазной цепи.
 - 3) Оба определения правильны.
 - 4) Оба определения неправильны.
 7. Чему равно действующее значение векторной суммы фазных токов?
 - 1) Сумме действующих значений фазных токов.
 - 2) Меньше суммы действующих значений фазных токов в предельном случае равно ей.
 - 3) Всегда меньше суммы действующих значений фазных токов.
 - 4) Больше суммы действующих значений фазных токов.
 8. Чему равен ток в нулевом проводе при симметричной трёхфазной системе токов?
 - 1) Нулю.
 - 2) Значению, меньшему суммы действующих значений фазных токов.
 - 3) Значению, меньшему суммы амплитудных значений линейных токов.
 - 4) Значению, большему суммы действующих значений фазных токов.
 9. Всегда ли векторная сумма токов фаз равняется нулю при отсутствии нулевого провода?
 - 1) Всегда при симметричной нагрузке.
 - 2) Всегда при несимметричной нагрузке.
 - 3) Всегда.
 - 4) Никогда.
 10. Может ли ток в нулевом проводе четырёхпроводной цепи быть равен нулю?
 - 1) Может, при симметричной нагрузке.
 - 2) Не может.
 - 3) Всегда равен нулю.
 - 4) Может, при несимметричной активной нагрузке.
 11. Какой из токов в схеме линейный, какой – фазный (рис. 150)?
 - 1) Оба тока линейные.
 - 2) Оба тока фазные.
 - 3) Ток I_1 линейный, ток I_2 фазный.
 - 4) Ток I_2 фазный, ток I_1 линейный.

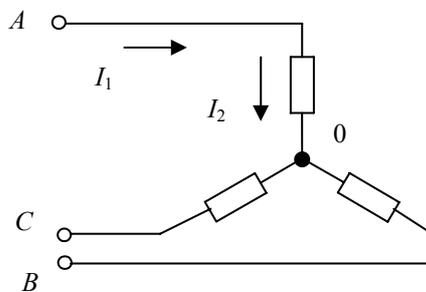


Рис. 150

12. Между различными точками схемы (рис. 151), включены вольтметры. Какой из них показывает линейное напряжение, какой – фазное?
 - 1) Напряжение U_{AO} линейное, напряжение U_{BO} фазное.
 - 2) Напряжение U_{AB} линейное, напряжение U_{BC} фазное.
 - 3) Напряжение U_{CA} линейное, напряжение U_{CO} фазное.
 - 4) Все вольтметры показывают линейное напряжение.

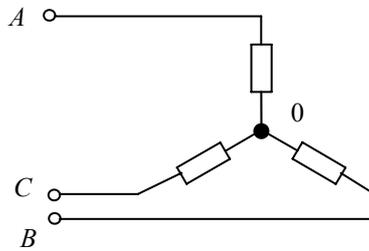


Рис. 151

13. Чему равен вектор U_{AC} , если $U_{CA} = U_C - U_A$?

- 1) $U_{AC} = -U_C - U_A$.
- 2) $U_{AC} = U_A - U_C$.
- 3) $U_{AC} = U_A + U_C$.
- 4) $U_{AC} = 0$.

14. Симметричная нагрузка соединена звездой. Линейное напряжение 380 В. Определить фазовое напряжение.

- 1) 380 В.
- 2) 250 В.
- 3) 220 В.
- 4) 127 В.

15. Будут ли меняться линейные токи при обрыве нулевого провода в случае: а) симметричной нагрузки; б) несимметричной нагрузки?

- 1) а) будут; б) не будут.
- 2) будут.
- 3) а) не будут; б) будут.
- 4) не будут.

16. Чему равна разность потенциалов точек O и O' при наличии нулевого провода с активным сопротивлением R_0 ?

- 1) 0.
- 2) $I_0 R_0$.
- 3) U .
- 4) $U - I_0 R_0$.

17. В каком случае нулевой провод, обладающий большим активным сопротивлением, обеспечит симметрию фазных напряжений при несимметричной нагрузке?

- 1) Если нагрузка активная.
- 2) Если нагрузка индуктивная.
- 3) В любом.
- 4) Не обеспечит никогда.

18. Написать уравнения, связывающие векторы линейных и фазных токов (рис. 152).

- 1) $I_A = I_{AB} - I_{CA}$; $I_B = I_{BC} - I_{AB}$; $I_C = I_{CA} - I_{BC}$.
- 2) $I_A = I_{CA} - I_{AB}$; $I_B = I_{AB} - I_{BC}$; $I_C = I_{BC} - I_{CA}$.
- 3) $I_A = I_{CA} + I_{AB}$; $I_B = I_{AB} + I_{BC}$; $I_C = I_{BC} + I_{CA}$.
- 4) $I_A = I_{CA} + I_{AB} - I_{BC}$; $I_B = I_{BC} + I_{CA} - I_{AB}$; $I_C = I_{CA} + I_{BC} - I_{AB}$.

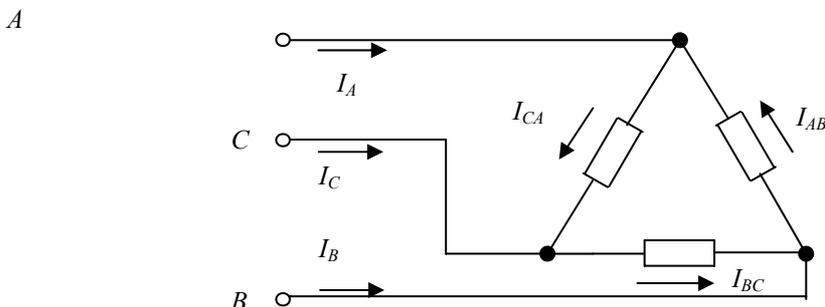


Рис. 152

19. Удовлетворяет ли приведённая диаграмма уравнениям токов для изображенной схемы (рис. 153)?

- 1) Удовлетворяет.
- 2) Удовлетворяет, если поменять местами фазные и линейные токи.
- 3) Не удовлетворяет ни в каком случае.

Удовлетворяет, если поменять местами токи I_A и I_B .

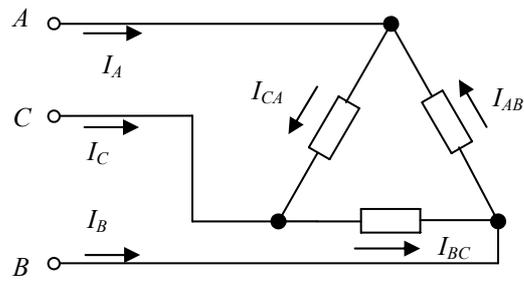
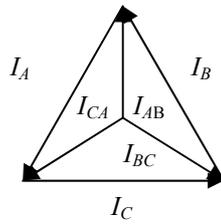


Рис. 153

20. Как соединены эти обмотки (рис. 154)?

- 1) Звездой.
- 2) Треугольником.
- 3) Звездой с нулевым проводом.
- 4) В открытый треугольник.

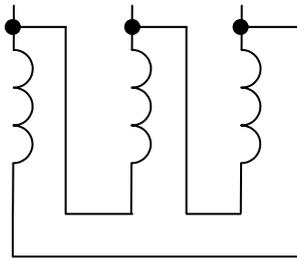


Рис. 154

21. Линейное напряжение 380 В. Определить фазное напряжение, если симметричная нагрузка соединена треугольником.

- 1) 380 В.
- 2) 220 В.
- 3) 127 В.
- 4) 660 В.

22. Линейный ток равен 2,2 А. Рассчитать фазный ток, если симметричная нагрузка соединена треугольником.

- 1) 3,8 А.
- 2) 2,2 А.
- 3) 1,27 А.
- 4) 1,1 А.

23. В симметричной трёхфазной цепи фазное напряжение равно 220 В, фазный ток 5 А, $\cos \varphi = 0,8$. Определить активную мощность.

- 1) 1,1 кВт.
- 2) 2,64 кВт.
- 3) 1,52 кВт.
- 4) 0,4 кВт.

24. В симметричной трёхфазной цепи фазное напряжение равно 220 В, фазный ток 5 А, $\cos \varphi = 0,8$. Найти реактивную мощность цепи.

- 1) 1,1 квар.
- 2) 2,64 квар.
- 3) 1,98 квар.
- 4) 0,66 квар.

25. В симметричной трёхфазной цепи линейное напряжение равно 220 В, линейный ток 5 А, коэффициент мощности 0,8. Определить активную мощность.

- 1) 1,1 кВт.
- 2) 1,14 кВт.
- 3) 1,52 кВт.
- 4) 0,88 кВт.

26. В симметричной трёхфазной цепи линейное напряжение равно 220 В, линейный ток 5 А, коэффициент мощности 0,8. Подсчитать реактивную мощность трёхфазной цепи.

- 1) 0,38 квар.

- 2) 1,14 квар.
- 3) 1,1 квар.
- 4) 1,52 квар.

27. В трёхфазной цепи линейное напряжение равно 220 В, линейный ток 2 А, активная мощность 380 Вт. Найти коэффициент мощности.

- 1) 0,86.
- 2) 0,62.
- 3) 0,54.
- 4) 0,42.

28. Лампы накаливания с номинальным напряжением 127 В включают в трёхфазную сеть с линейным напряжением 220 В. Определить схему соединения ламп.

- 1) Звездой без нулевого провода.
- 2) Звездой с нулевым проводом.
- 3) Треугольником.
- 4) Лампы нельзя включать в сеть с линейным напряжением 20 В.

29. В трёхфазную сеть с линейным напряжением 220 В включают трёхфазный двигатель, каждая из обмоток которого рассчитана на 127 В. Как следует соединить обмотки двигателя?

- 1) Звездой.
- 2) Треугольником.
- 3) Двигатель нельзя включать в эту сеть.
- 4) Можно включить и звездой, и треугольником.

30. Трёхфазный двигатель, каждая из обмоток которого рассчитана на 127 В, включают в сеть с линейным напряжением 380 В. Как нужно соединить обмотки двигателя?

- 1) Звездой.
- 2) Треугольником.
- 3) Двигатель нельзя включать в эту сеть.
- 4) Можно включить и звездой, и треугольником.

31. Лампы накаливания с номинальным напряжением 220 В включают в трёхфазную сеть с линейным напряжением 220 В. Определить схему соединения ламп.

- 1) Звездой.
- 2) Звездой с нулевым проводом.
- 3) Треугольником.
- 4) Расщеплённый треугольник.

32. В трёхфазную сеть с линейным напряжением 220 В включают трёхфазный двигатель, каждая из обмоток которого рассчитана на 220 В. Как следует соединить обмотки двигателя?

- 1) Звездой без нулевого провода.
- 2) Треугольником.
- 3) Звездой с нулевым проводом.
- 4) Двигатель нельзя включать в эту сеть.

33. Чему равен ток в нулевом проводе в симметричной трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду?

- 1) Номинальному току одной фазы.
- 2) Нулю.
- 3) Сумме номинальных токов двух фаз.
- 4) Одному линейному току.

34. Симметричная нагрузка соединена треугольником. При измерении фазного тока амперметр показал 10 А. Чему будет равен ток в линейном проводе?

- 1) 10 А.
- 2) 17,3 А.
- 3) 14,14 А.
- 4) 20 А.

35. Почему обрыв нейтрального провода четырёхпроводной трёхфазной системы является аварийным режимом?

- 1) На всех фазах приёмника энергии напряжение падает.
- 2) На одних фазах приёмника энергии напряжение увеличивается, на других уменьшается.
- 3) На всех фазах приёмника энергии напряжение возрастает.
- 4) Напряжение во всех фазах падает до нуля.

36. Какой прибор используется для измерения активной мощности потребителя?

- 1) Вольтметр.

- 2) Ваттметр.
- 3) Омметр.
- 4) Мегомметр.

37. Чем определяются начальные фазы токов в трёхфазной системе?

- 1) Характером нагрузки.
- 2) Схемой соединения нагрузки.
- 3) Схемой соединения обмоток источника.
- 4) Количеством проводников трёхфазной системы.

38. Лампы накаливания с номинальным напряжением 380 В включают в трёхфазную сеть с линейным напряжением 220 В. Определить схему соединения ламп.

- 1) Трёхпроводной звездой.
- 2) Четырёхпроводной звездой с нулевым проводом.
- 3) Нельзя соединять.
- 4) Открытым треугольником.

39. В трёхфазной цепи линейное напряжение равно 220 В, линейный ток 2 А, активная мощность 380 Вт. Найти коэффициент мощности.

- 1) 0,8.
- 2) 0,6.
- 3) 0,5.
- 4) 0,4.

40. Какое из приведенных соотношений для симметричной трёхфазной цепи содержит ошибку, если нагрузка соединена треугольником?

- 1) $U_{\phi} = U_{л}$.
- 2) $I_{\phi} = I_{л}$.
- 3) $P = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \cos \varphi$.
- 4) $I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$.

41. Линейный ток равен 2,2 А. Рассчитать фазный ток, если симметричная нагрузка соединена звездой.

- 1) 2,2 А.
- 2) 1,27 А.
- 3) 3,8 А.
- 4) 2,5 А.

42. В симметричной трёхфазной цепи фазное напряжение $U_{\phi} = 127$ В, линейный ток $I_{л} = 5$ А, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$. Определить активную мощность.

- 1) $P = 1110$ Вт.
- 2) $P = 1140$ Вт.
- 3) $P = 1524$ Вт.
- 4) $P = 880$ Вт.

43. В симметричной трёхфазной цепи фазный ток равен 1,27 А, рассчитать линейный ток, если нагрузка соединена треугольником.

- 1) 2,2 А.
- 2) 1,27 А.
- 3) 3,8 А.
- 4) 2,54 А.

44. Угол сдвига фаз между тремя синусоидальными ЭДС, образующими трёхфазную симметричную систему составляет ...

- 1) 150° .
- 2) 120° .
- 3) 240° .
- 4) 270° .

45. Линейное напряжение равно 220 В. Определить фазное напряжение, если нагрузка трёхфазной цепи соединена треугольником.

- 1) 380 В.
- 2) 127 В.
- 3) 220 В.
- 4) 600 В.

46. Симметричная нагрузка соединена звездой. При измерении фазного тока амперметр показал 10 А. Чему будет равен ток в линейном проводе?

- 1) 8,7 А.
- 2) 2,9 А.
- 3) 5 А.
- 4) 10 А.

47. Может ли ток в нулевом проводе четырёхпроводной цепи, соединённой звездой, быть равным нулю?

- 1) Может.
- 2) Не может.
- 3) Всегда равен нулю.
- 4) Никогда не равен нулю.

48. В симметричной трёхфазной цепи линейное напряжение равно $U = 220$ В, фазный ток $I = 5$ А, $\cos\varphi = 0,8$. Определить реактивную мощность трёхфазной цепи.

- 1) 1,14 квар.
- 2) 2,64 квар.
- 3) 1,98 квар.
- 4) 8,8 квар.

49. Лампы накаливания с номинальным напряжением 127 В включают в трёхфазную сеть с линейным напряжением 380 В. Определить схему соединения ламп.

- 1) Трёхпроводной звездой.
- 2) Четырёхпроводной звездой.
- 3) Треугольником.
- 4) Лампы нельзя включать в сеть с линейным напряжением 380 В.

50. Симметричная нагрузка соединена звездой. При измерении фазного тока амперметр показал 5 А. Чему будет равен ток в линейном проводе?

- 1) 8,7 А.
- 2) 2,9 А.
- 3) 5 А.
- 4) 7,07 А.

51. В каком из приведённых выражений для цепи допущена ошибка, если $u_A = U_m \sin \omega t$ (рис. 155)?

- 1) $u_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$.
- 2) $u_C = U_m \sin(\omega t - 240^\circ)$.
- 3) $u_{AB} = \sqrt{3}U_m \sin(\omega t + 30^\circ)$.
- 4) $u_{CA} = \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - 150^\circ)$.

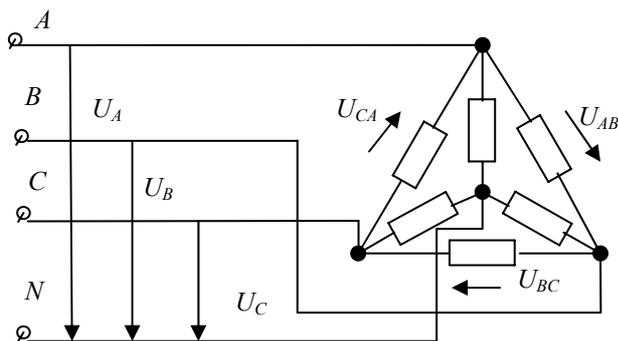


Рис. 155

52. В каком из приведённых выражений для цепи допущена ошибка, если комплексное напряжение \dot{U}_A записано в виде $\dot{U}_A = Ue^{j0^\circ}$?

- 1) $\dot{U}_C = Ue^{-j240^\circ}$.
- 2) $\dot{U}_{AB} = U_{AB}e^{-j30^\circ}$.
- 3) $\dot{U}_{BC} = U_{BC}e^{-j90^\circ}$.
- 4) $\dot{U}_{CA} = U_{CA}e^{-j210^\circ}$.

53. Какие из схем (рис. 156) представляют собой соединение потребителей треугольником? Указать правильный ответ.

- 1) Схема б.
- 2) Схемы б и в.
- 3) Схемы б, в и д.
- 4) Все схемы.

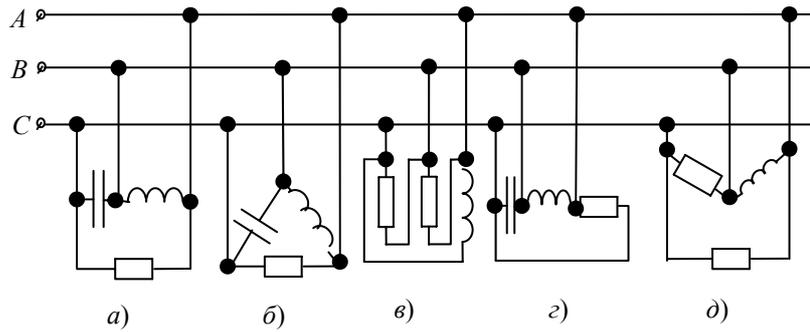


Рис. 156

54. Какие из схем (рис. 157) представляют собой соединение потребителей звездой и какие – треугольником? Указать правильный ответ.

- 1) Звездой – схемы а и б, треугольником – схема в.
- 2) Звездой – схемы в и г, треугольником – схема б.
- 3) Звездой – схема д, треугольником – схема г.
- 4) Звездой – схема а и г, треугольником в.
- 5)

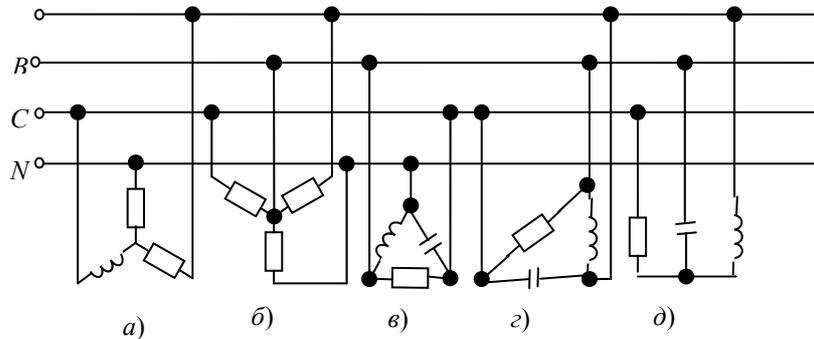


Рис. 157

55. Как следует выразить комплексные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_C, \dot{I}_N$, если комплексный ток $\dot{I}_B = I_B e^{j0^\circ}$ (рис. 158). Указать правильный ответ.

- 1) $\dot{I}_A = I_A e^{j120^\circ - \varphi_A}$.
- 2) $\dot{I}_C = I_C e^{-j120^\circ - \varphi_C}$.
- 3) $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.
- 4) $\dot{I}_C = I_C e^{-j240^\circ - \varphi_C}$.

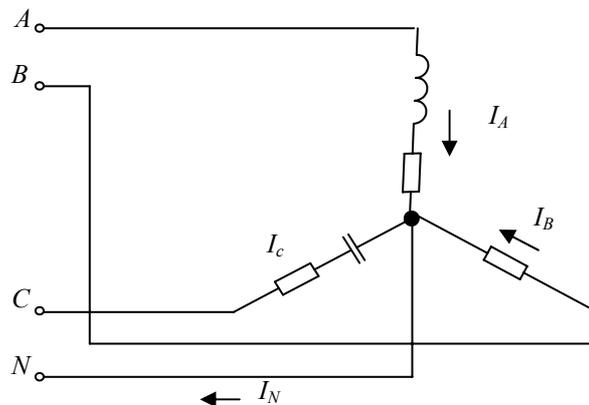


Рис. 158

56. В какой из векторных диаграмм (рис. 159) цепи допущена ошибка?

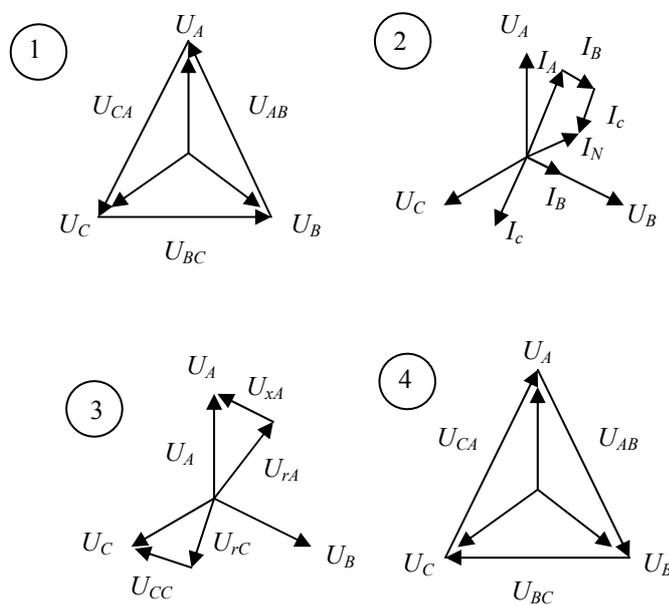
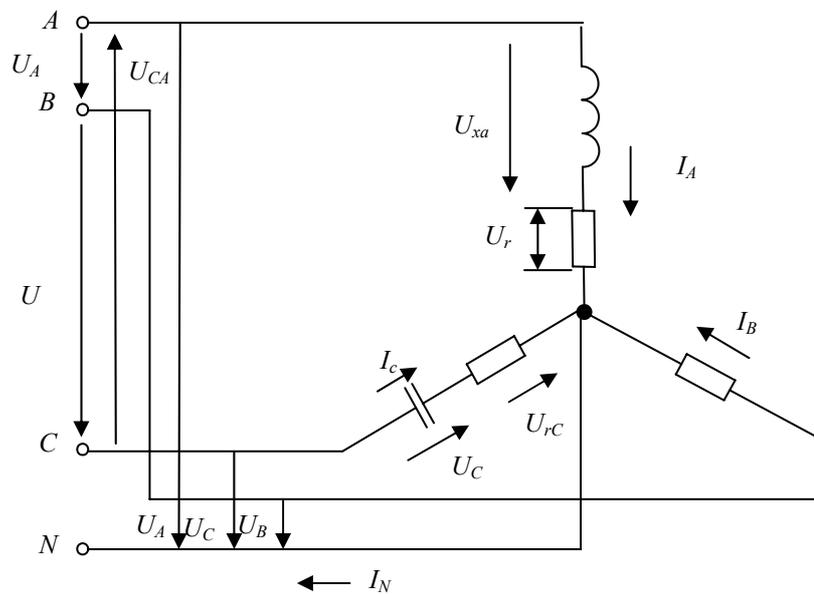


Рис. 159

58. Как изменятся токи цепи после замыкания выключателя, если $r_A = r_B = r_C = r$ (рис. 160)? Указать неправильный ответ.

- 1) I_A уменьшится.
- 2) I_B не изменится.
- 3) I_C не изменится.
- 4) I_N увеличится.

59. В электрической цепи (рис. 161) $r_B = r_C = 2r_A$. Как изменятся токи, если перегорит предохранитель ПР₁? Указать неправильный ответ.

- 1) I_B не изменится.
- 2) I_N увеличится
- 3) I_C не изменится
- 4) I_N не изменится.

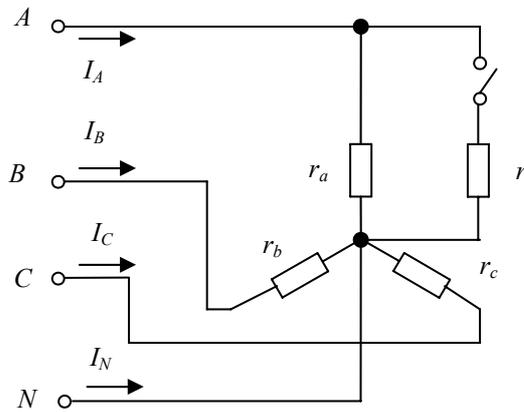


Рис. 160

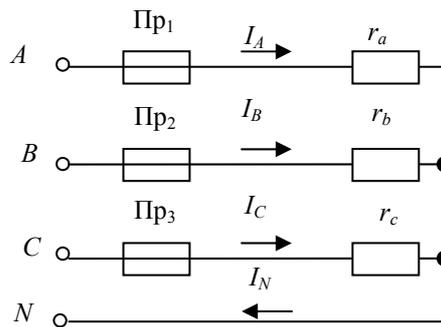


Рис. 161

60. Как изменятся токи после отключения выключателя цепи (рис. 162), если $r_1 = r_2 = r_3$? Указать неправильный ответ.

- 1) I_B не изменится.
- 2) I_C не изменится.
- 3) I_N уменьшится.
- 4) I_N не изменится.

61. Каждая фаза приемника энергии цепи (рис. 163) содержит лампы накаливания, имеющие одинаковые номинальные мощности и напряжения. Определить напряжение U_A и U_B , когда отключен выключатель и оборван нейтральный провод. Считать, что сопротивления ламп не зависят от тока. Указать правильный ответ.

- 1) $U_A = U_B = 190$ В.
- 2) $U_A = 285$ В; $U_B = 95$ В.
- 3) $U_A = U_B = 220$ В.
- 4) $U_A = 95$ В; $U_B = 285$ В.

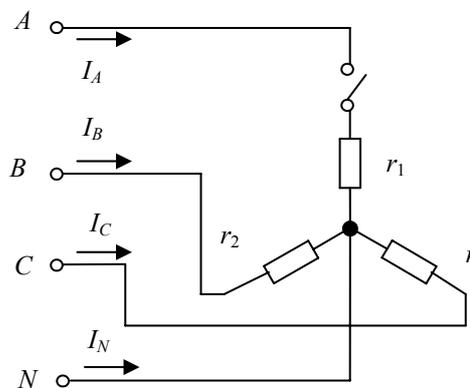


Рис. 162

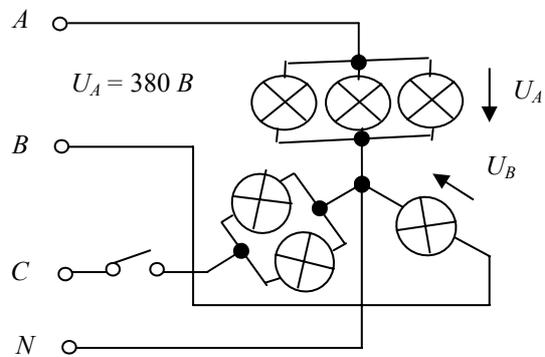


Рис. 163

62. Как измениться накал ламп групп a , b , $в$ (рис. 164), если сгорит предохранитель A ? Указать правильный ответ.

- 1) Накал всех ламп не изменится.
- 2) Накал ламп групп a , $в$ увеличится, b – уменьшится.
- 3) Накал ламп групп a , $в$ уменьшится, b – не изменится.
- 4) Накал ламп групп a , $в$ не изменится, b – увеличится.

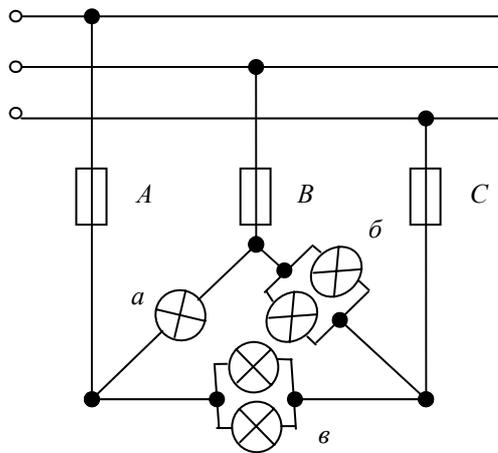


Рис. 164

63. Все лампы накаливания имеют одинаковые номинальные мощности и напряжения (рис. 165). Группа ламп $в$ отключена. Как измениться накал ламп групп a и b при обрыве нейтрального провода? Указать правильный ответ.

- 1) Накал ламп групп a и b не изменится.
- 2) Накал ламп группы a увеличится, b уменьшится.
- 3) Накал ламп групп a уменьшится, b увеличится.
- 4) Накал ламп групп a и b уменьшится.

64. Определить показания вольтметра цепи (рис. 166). Указать правильный ответ.

- 1) 127 В.
- 2) 110 В.
- 3) 63,5 В.
- 4) 190 В.

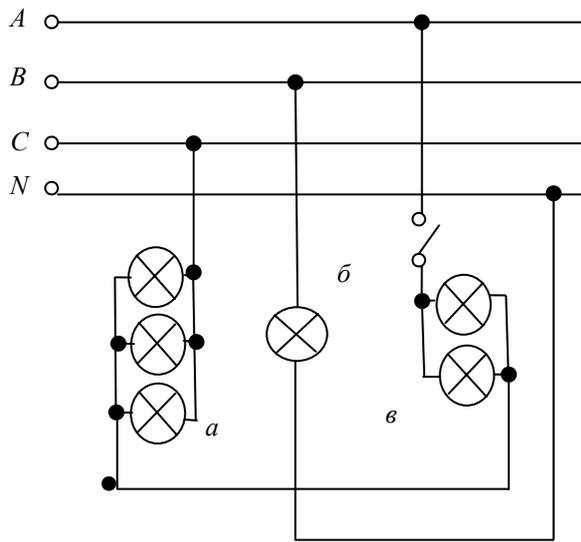


Рис. 165

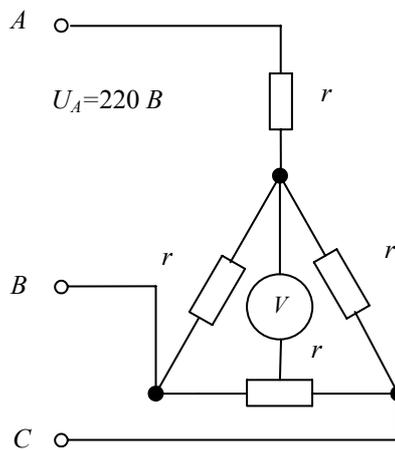


Рис. 166

65. Почему обрыв нейтрального провода в четырёхфазной системе является аварийным режимом? Указать правильный ответ.

- 1) Увеличится напряжение на всех фазах приёмника энергии, соединённого треугольником.
- 2) На одних фазах приёмника энергии, соединённого треугольником, напряжение увеличится, на других уменьшится.
- 3) На одних фазах приёмника энергии, соединённого звездой, напряжение увеличится, на других уменьшится.
- 4) На всех фазах приёмника энергии, соединённого звездой, напряжение возрастёт.

66. Как следует выразить комплексные токи \dot{I}_{BC} , \dot{I}_{CA} , \dot{I}_A , \dot{I}_C цепи (рис. 167), если $\dot{I}_{AB} = I_{AB}e^{j0^\circ}$. Указать неправильный ответ.

- 1) $\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$.
- 2) $\dot{I}_{BC} = I_{BC}e^{j(-120^\circ + \varphi_{AB} - \varphi_{BC})}$.
- 3) $\dot{I}_{CA} = I_{CA}e^{j(120^\circ + \varphi_{AB})}$.
- 4) $\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$.

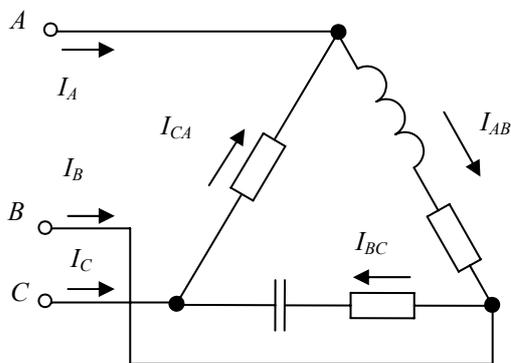


Рис. 167

67. Как изменятся токи цепи при размыкании выключателя (рис. 168)? Указать неправильный ответ.

- 1) I_A уменьшится.
- 2) I_{AB} не изменится.
- 3) I_{CA} не изменится.
- 4) I_C уменьшится.

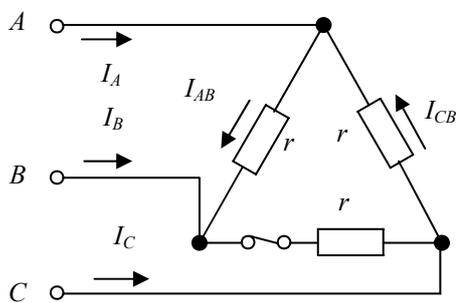


Рис. 168

68. Электрические лампы всех фаз приемника энергии имеют одинаковые значения номинальных мощностей и напряжений

(рис. 169). Определить напряжения каждой фазы потребителя U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , если сгорит предохранитель фазы C. Напряжение сети $U = 220$ В. Указать неправильный ответ.

- 1) $U_{AB} = 220$ В.
- 2) $U_{BC} = 73,5$ В.
- 3) $U_{CA} = 166,5$ В.
- 4) $U_{CA} = 147$ В.

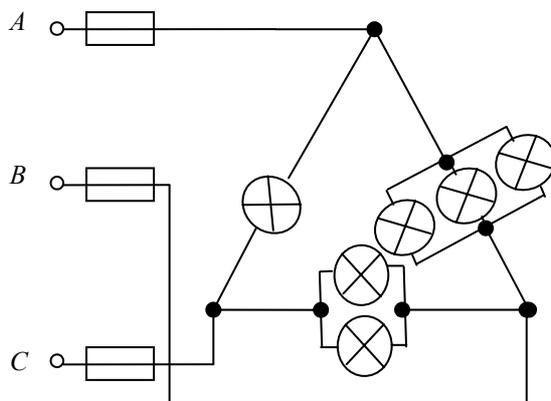


Рис. 169

69. В цепи все амперметры, кроме одного, имеют одинаковые показания (рис. 170). Указать, какой из амперметров имеет показание, отличное от остальных?

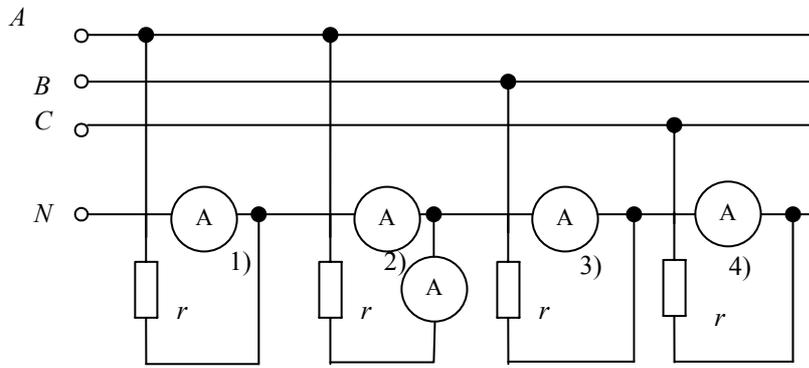


Рис. 170

71. На рис. 171 изображены возможные варианты включения однофазных (*б, з*) и трёхфазных (*а, в*) приёмников энергии в трёхфазную четырёхпроводную сеть. Однофазные приёмники имеют $r_1 > r_2 > r_3$, трёхфазные $r_1 = r_2 = r_3$. Как изменятся напряжения на фазах приёмников, если произойдёт обрыв нейтрального провода вблизи точки *N*?

- 1) Вариант *а*: $U_{r_1}, U_{r_2}, U_{r_3}$ изменятся.
- 2) Вариант *б*: $U_{r_1}, U_{r_2}, U_{r_3}$ не изменятся.
- 3) Вариант *в*: $U_{r_1}, U_{r_2}, U_{r_3}$ не изменятся.
- 4) Вариант *з*: $U_{r_1}, U_{r_2}, U_{r_3}$ увеличатся, причём $U_{r_1} < U_{r_2} < U_{r_3}$.

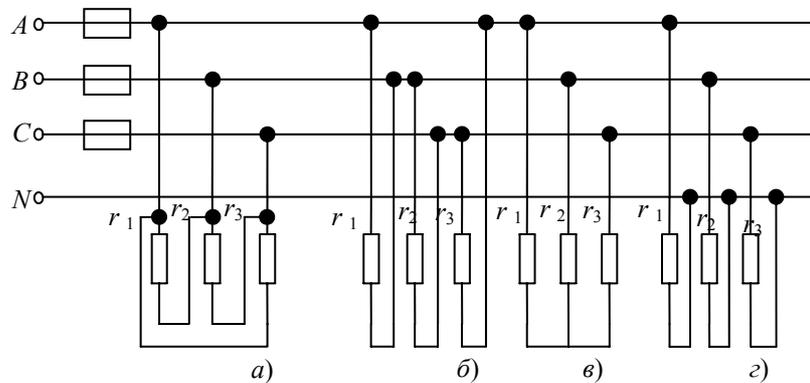


Рис. 171

72. Бытовые приёмники энергии (все они однофазные): приборы освещения, холодильники, телевизоры, пылесосы и т.д. – отдельных квартир жилого дома подключены к трёхпроводной или четырёхпроводной трёхфазной сети. В первом случае потребители соединены треугольником (рис. 172, *а*), во втором – звездой (рис. 172, *б*). В каждой квартире имеются предохранители и есть общие предохранители в начале линии в каждом линейном проводе ($ПР_A, ПР_B, ПР_C$). Естественно, что если перегорит предохранитель в какой-либо квартире, то лишится энергии только эта квартира, приёмники остальных квартир будут работать в номинальном режиме. Однако если сгорят предохранители в одном из линейных проводов или оборвётся нейтральный провод, то произойдёт изменение напряжения сразу в нескольких квартирах. Это может быть обнаружено по силе света осветительных приборов. Если во время нарушения (указанного выше) вы находились на улице и наблюдали за освещённостью квартир всего дома, то можете легко определить и схему соединения приёмников и характер повреждения. Можно наблюдать следующие случаи:

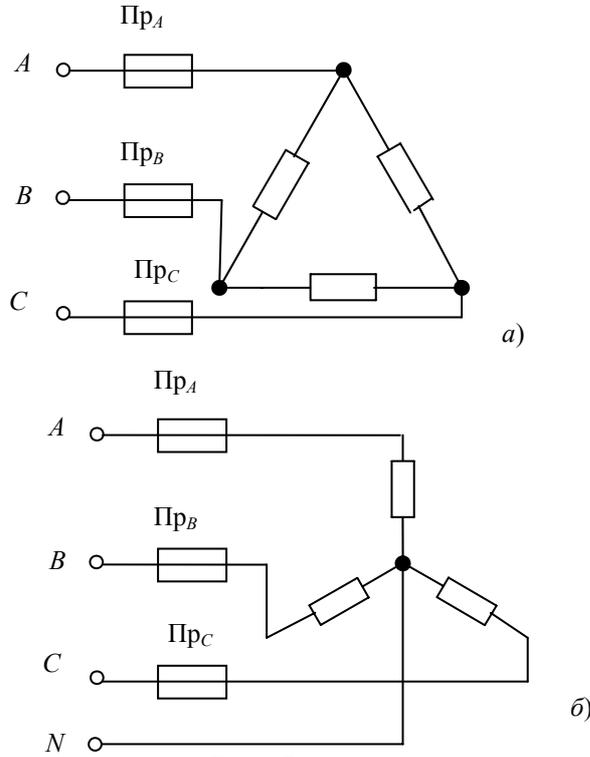


Рис. 172

1. Освещение части квартир нормальное, других квартир неодинаковое и значительно слабее нормального, причём освещённость этих квартир может иногда изменяться.

2. Часть квартир освещена ярче, чем в нормальных условиях, другая часть слабее, третья ещё слабее, причём освещённость всех квартир может иногда одновременно изменяться.

3. Две трети квартир имеют нормальное освещение, одна треть находятся без света.

Указать неправильный ответ.

1) В первом случае приёмники энергии соединены треугольником. Сгорел предохранитель в одном из линейных проводов.

2) Во втором случае приёмники энергии соединены звездой. Произошел обрыв нейтрального провода.

3) В третьем случае приёмники энергии соединены звездой. Произошел обрыв нейтрального провода и сгорел предохранитель в одном из линейных проводов.

4) В третьем случае приёмники соединены треугольником. Произошел обрыв одной из нагрузок.

71. На рис. 173 изображены возможные варианты включения однофазных (б) и трёхфазных приемников энергии (а и в) в трёхпроводную трёхфазную сеть. Однофазные приёмники имеют $r_1 > r_2 > r_3$, трёхфазные $r_1 = r_2 = r_3$. Как изменятся напряжения на фазах приёмников, если сгорит предохранитель линейного провода А? Указать неправильный ответ.

1) Вариант а: U_{r_2} не изменится, U_{r_1} и U_{r_3} уменьшатся.

2) Вариант б: U_{r_2} не изменится, U_{r_1} и U_{r_3} уменьшатся, причём $U_{r_1} > U_{r_3}$.

3) Вариант в: $U_{r_1} = 0$, U_{r_2} увеличится, U_{r_3} уменьшится.

4) Вариант в: $U_{r_1} = 0$, U_{r_2} и U_{r_3} уменьшатся.

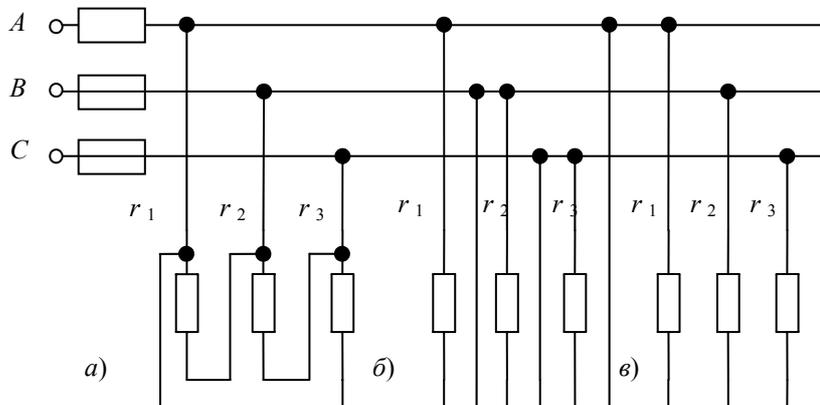


Рис. 173

72. Как изменятся линейные токи и показания ваттметров цепи после замыкания выключателя (рис. 174)? Указать неправильный ответ.

- 1) P_2 не изменится.
- 2) I_C не изменится.
- 3) P_1 не изменится.
- 4) I_B увеличится.

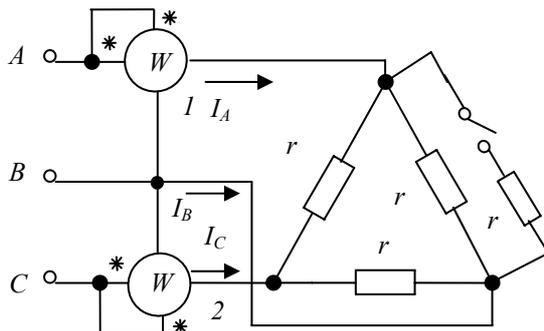


Рис. 174

73. Три приёмника энергии с одинаковыми сопротивлениями $r_1 = r_2 = r_3$ соединены треугольником и включены в трёхфазную сеть. Как изменятся линейные токи, если приёмники соединить звездой. Указать правильный ответ.

- 1) Не изменятся.
- 2) Уменьшатся в $\sqrt{3}$ раз.
- 3) Уменьшатся в 3 раза.
- 4) Уменьшатся в $\sqrt{2}$ раз.

74. В какой из векторных диаграмм (рис. 175) цепи допущена ошибка?

75. Определить показания вольтметра в цепи (рис. 176). Указать правильный ответ.

- 1) 220 В.
- 2) 110 В.
- 3) 330 В.
- 4) 190 В.

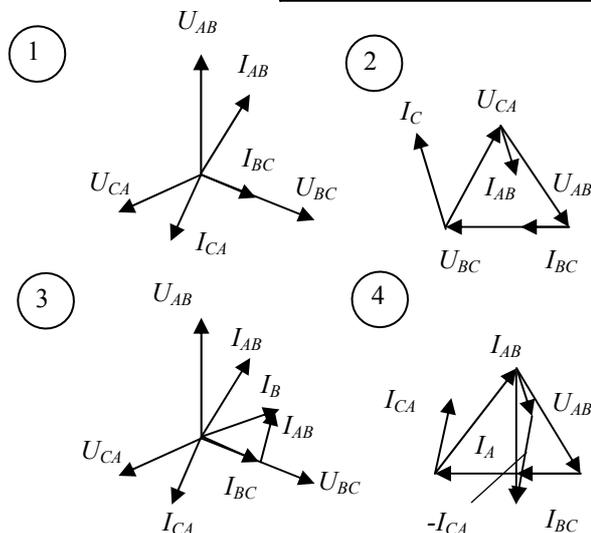
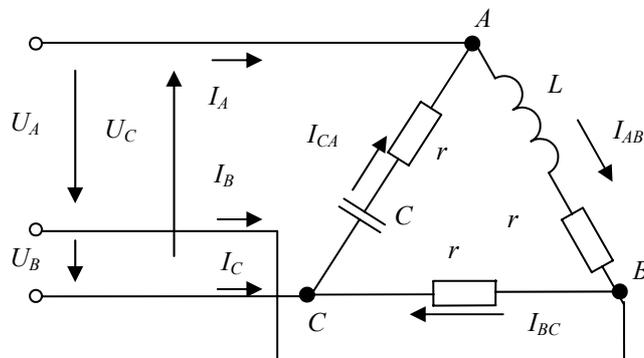


Рис. 175

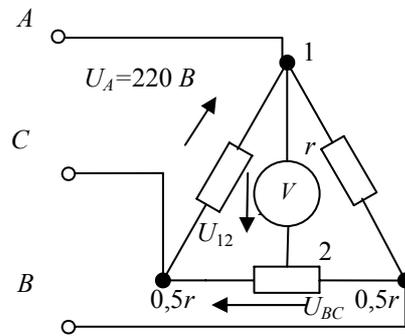


Рис. 176

76. Какая из приведённых ниже формул для трёхфазных цепей при симметричной нагрузке содержит ошибку? При соединении приёмника энергии треугольником:

- 1) $U_{\phi} = U_{л}$.
- 2) $P = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \cos \varphi$;

При соединении приемника энергии звездой:

- 3) $U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}$.
- 4) $I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$.

77. Какое из приведённых соотношений для цепи написано неправильно, если $x_L > r$ и $x_C > r$ (рис. 177)?

- 1) $i_A + i_B + i_C = 0$.
- 2) $i_A + i_B + i_C = 0$.
- 3) $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$.
- 4) $\overline{I_{AB}} + \overline{I_{BC}} + \overline{I_{CA}} = 0$.
- 5) $\overline{I_A} = \overline{I_{AB}} - \overline{I_{CA}}$.

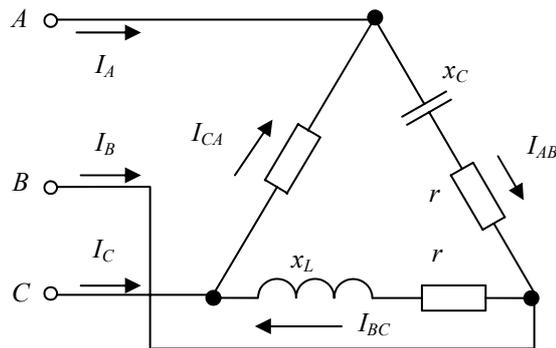


Рис. 177

78. Как изменятся токи цепи, если перегорит предохранитель ПР₁ (рис. 178)? Указать неправильный ответ.

- 1) I_B уменьшится.
- 2) I_C уменьшится.
- 3) I_{AB} не изменится.
- 4) I_{BC} не изменится.

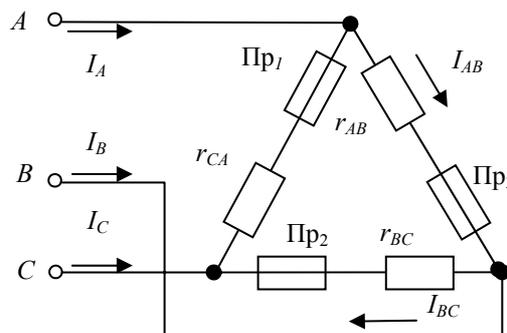


Рис. 178

79. Как изменятся токи при размыкании выключателя цепи (рис. 179)? Указать неправильный ответ.

- 1) I_{AB} уменьшится.
- 2) I_{BC} не изменится.
- 3) I_C уменьшится.
- 4) I_B не изменится.

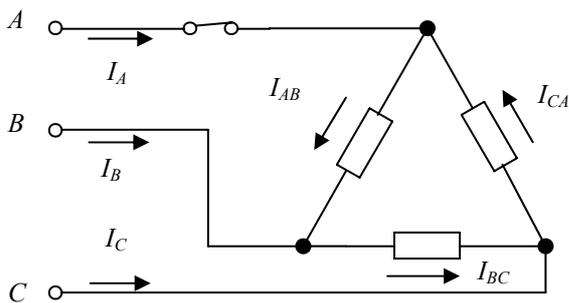


Рис. 179

80. Определить линейный ток I цепи (рис. 180). Указать правильный ответ.

- 1) $2 \cdot 220 / r\sqrt{3}$.
- 2) $220 / 2r\sqrt{3}$.
- 3) $220/r + 220 / 2r\sqrt{3}$.
- 4) $220 / r\sqrt{3} + \sqrt{3} \cdot 220 / r$.

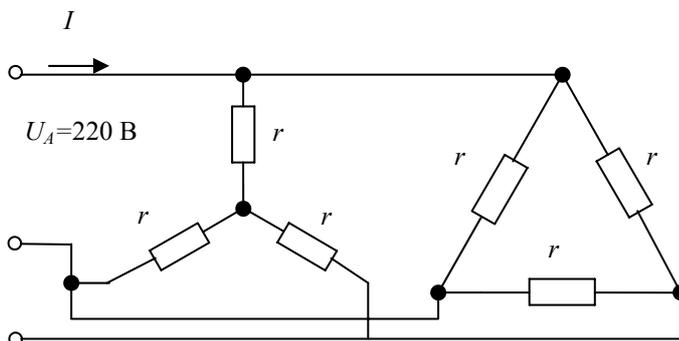


Рис. 180

81. Три одинаковых конденсатора с ёмкостями $C = 30$ мкФ соединены звездой (рис. 181). Определить значение ёмкости $C_{эк}$ эквивалентного треугольника. Указать правильный ответ.

- 1) 90 мкФ.
- 2) 60 мкФ.
- 3) 20 мкФ.
- 4) 10 мкФ.

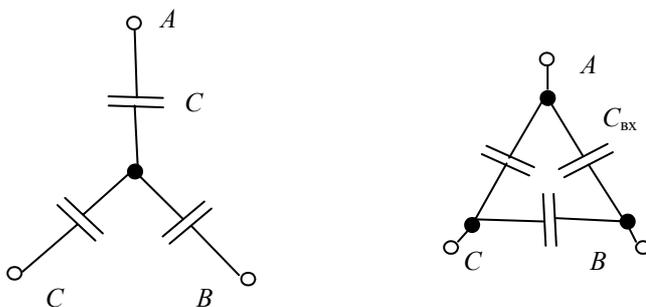


Рис. 181

82. В каком соотношении будут находиться фазные напряжения при обрыве нейтрального провода, если приёмник энергии соединен звездой, нагрузка активная и $r_A > r_B > r_C$? Указать правильный ответ.

- 1) $U_A < U_B < U_C$.
- 2) $U_A > U_B > U_C$.
- 3) $U_A > U_B < U_C$.
- 4) $U_A < U_B > U_C$.

83. Определить сопротивления r_{CA} и x_{CA} цепи, если $I_{AB} = 8$ А, $I_{BC} = 6$ А, $I_{CA} = 10$ А, $r_{AB} = 5$ Ом, $r_{BC} = 10$ Ом (рис. 182). Активная мощность приёмника энергии $P = 2680$ Вт, реактивная мощность фазы CA $Q_{CA} = 1600$ вар. Указать правильный ответ.

- 1) $r_{CA} = 5$ Ом, $x_{CA} = 10$ Ом.
- 2) $r_{CA} = 12$ Ом, $x_{CA} = 8,64$ Ом.
- 3) $r_{AC} = 20$ Ом, $x_{CA} = 16$ Ом.
- 4) $r_{CA} = 10$ Ом, $x_{CA} = 9,96$ Ом.

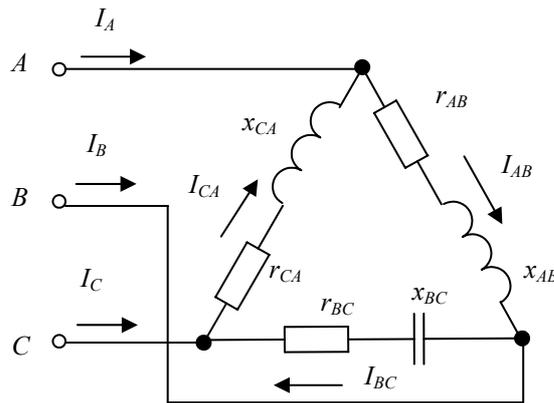


Рис. 182

84. Активная мощность приёмника энергии цепи (рис. 183) $P = 4950$ Вт, напряжение сети $U = 380$ В, $I_A = 10$ А, $I_B = 5$ А, коэффициент мощности фаз $A \cos \varphi_A = 1$, $B \cos \varphi_B = 0,5$, $C \cos \varphi_C = 0,5$. Определить ток I_C , сопротивления r_C и r_L , а также реактивные мощности фаз B и C . Указать неправильный ответ.

- 1) $r_C = 5,5$ Ом.
- 2) $r_L = 9,5$ Ом.
- 3) $Q_B = 750$ вар.
- 4) $Q_C = 3800$ вар.

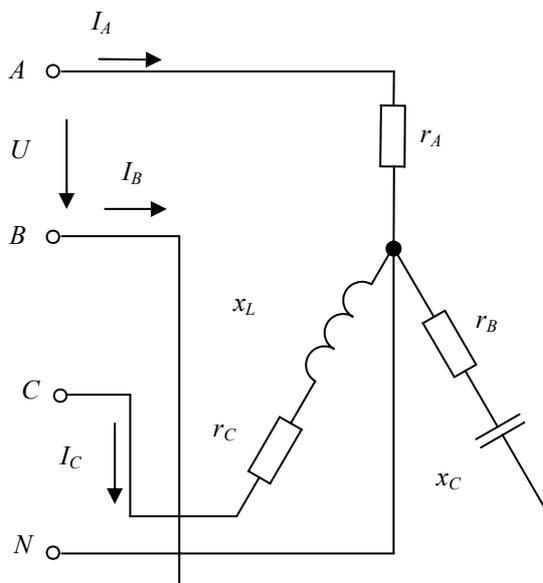


Рис. 183

85. В каком соотношении находятся показания ваттметров цепи (рис. 184), если $r = x$? Указать правильный ответ.

- 1) $P_1 = P_2$.
- 2) $P_1 > P_2$.
- 3) $P_1 < P_2$.
- 4) $P_1 + P_2 < P_1 - P_2$.

5)

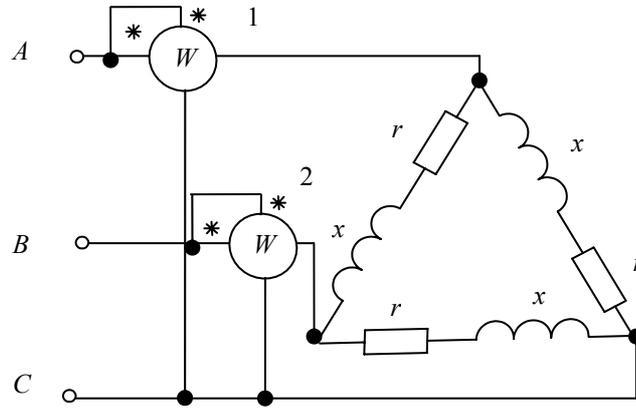


Рис. 184

86. Определить показания вольтметра в цепи (рис. 185), если $x_L = x_C = r$, напряжение сети $U = 220$ В. Указать правильный ответ.

- 1) 110 В.
- 2) 220 В.
- 3) 380 В.
- 4) 127 В.

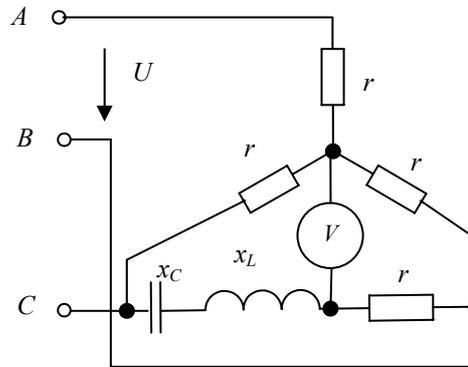


Рис. 185

87. Определить показания вольтметра в цепи (рис. 186), если $r = x_C$ и напряжение сети $U = 380$ В. Указать правильный ответ.

- 1) 220 В.
- 2) 300 В.
- 3) 110 В.
- 4) 80 В.

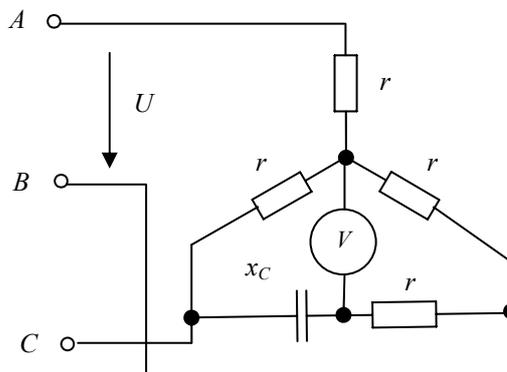


Рис. 186

88. В трёхфазной цепи (рис. 187) $I_1 = I_2 = 10$ А. Определить линейный ток I . Указать правильный ответ.

- 1) 20 А.
- 2) 17,3 А.
- 3) 10 А.
- 4) 19,3 А.

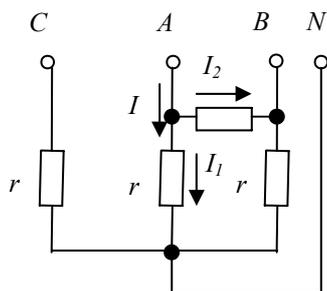


Рис. 187

89. Ток в трёхфазной цепи (рис. 188) $I_1 = I_2 = 10$ А. Определить линейный ток I . Указать правильный ответ.

- 1) 10 А.
- 2) 20 А.
- 3) 17,3 А.
- 4) 19,3 А.

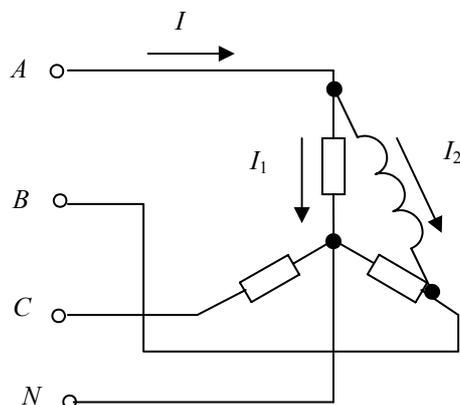


Рис. 188

90. Определить показание вольтметра в цепи (рис. 189), если $x_L = x_C = r$, напряжение сети $U = 220$ В. Указать правильный ответ.

- 1) 0.
- 2) 220 В.
- 3) 200 В.
- 4) 275 В.

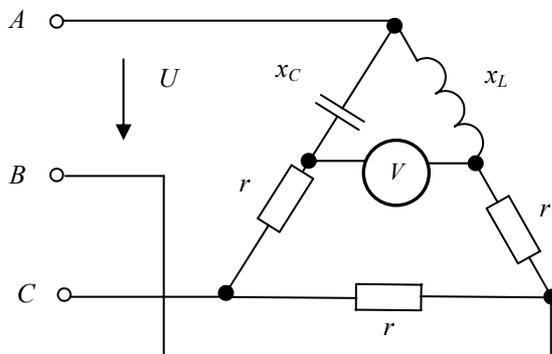


Рис. 189

91. Установка трёхфазного тока (рис. 190) состоит из приёмников энергии b и c и конденсаторной батареи a , служащей для улучшения коэффициента мощности установки. Приёмники b и c имеют симметричную нагрузку каждой фазы индуктивного характера. Мощности приёмников $P_b = 173$ кВт, $P_c = 110$ кВт, коэффициенты мощности $\cos\varphi_b = 0,8$; $\cos\varphi_c = 0,7$.

Определить ёмкость конденсаторов одной фазы конденсаторной батареи, при которой $\cos\varphi$ установки будет равен единице, $f = 50$ Гц, $U = 380$ В. Указать правильный ответ.

- 1) 48,5 мкФ.
- 2) 66 мкФ.
- 3) 1800 мкФ.
- 4) 1980 мкФ.

92. Электрическая цепь (рис. 191) имеет следующие параметры: $Z_{AB} = 4 + j3$ Ом, $Z_{BC} = 8 + j6$ Ом, $Z_{CA} = 10$ Ом.

Напряжение сети $U = 380$ В. Определить показания ваттметров W_1 , W_2 и активную мощность цепи. Указать правильный ответ.

- 1) $W_1 = 30\ 500$ Вт, $W_2 = 18\ 500$ Вт, $P = 49\ 000$ Вт.
- 2) $W_1 = 18\ 500$ Вт, $W_2 = 30\ 500$ Вт, $P = 49\ 000$ Вт.
- 3) $W_1 = 30\ 500$ Вт, $W_2 = 18\ 500$ Вт, $P = 12\ 000$ Вт.
- 4) $W_1 = 30\ 500$ Вт, $W_2 = 18\ 500$ Вт, $P = 24\ 000$ Вт.

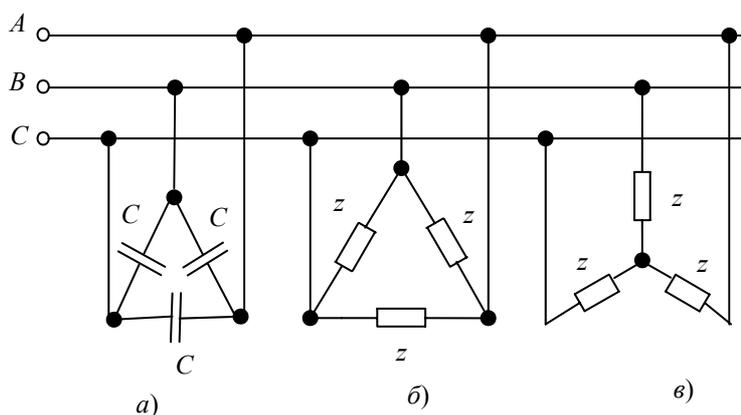


Рис. 190

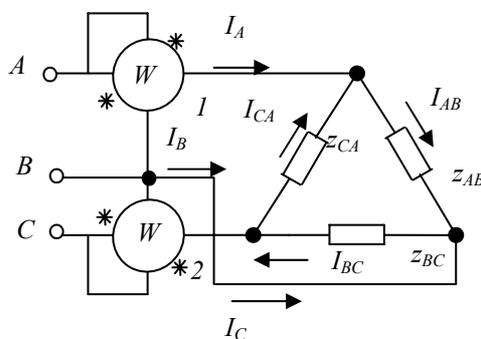


Рис. 191

93. В каком из приведённых выражений для цепи (рис. 192) допущена ошибка, если $U_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$?

- 1) $U_A = U_m \sin(\omega t - 240^\circ)$.
- 2) $U_{CA} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + 150^\circ)$.
- 3) $U_{AB} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + 30^\circ)$.
- 4) $U_{BC} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t - 90^\circ)$.

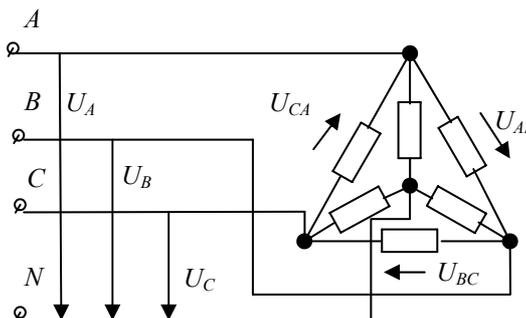


Рис. 192

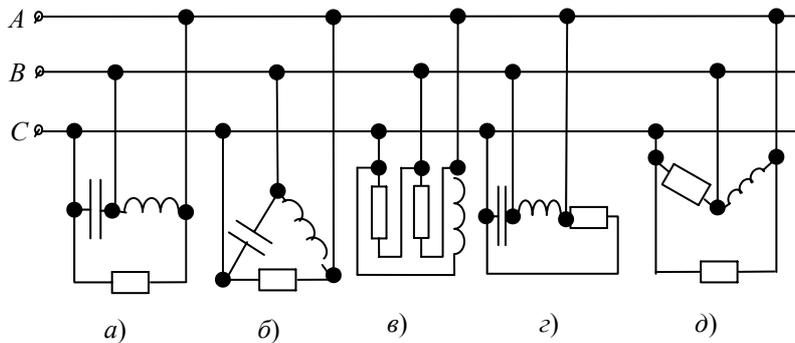


Рис. 193

94. Как изменятся напряжения цепи (рис. 194) после замыкания выключателя, если $r_A = r_B = r_C = r$? Указать правильный ответ.

- 1) U_{AB} уменьшится.
- 2) U_{BC} не изменится.
- 3) U_B не изменится.
- 4) U_C не изменится.

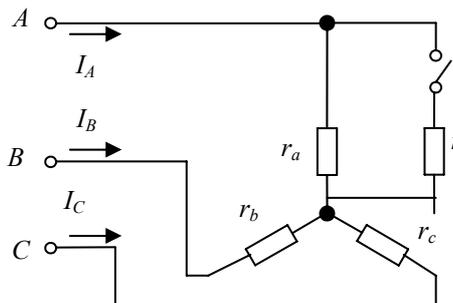


Рис. 194

95. Какое определение неверно для обозначений на представленной схеме (рис. 195)?

- 1) I_A – фазный ток.
- 2) U_{CA} – линейное напряжение.
- 3) I_N – линейный ток.
- 4) U_B – фазное напряжение.

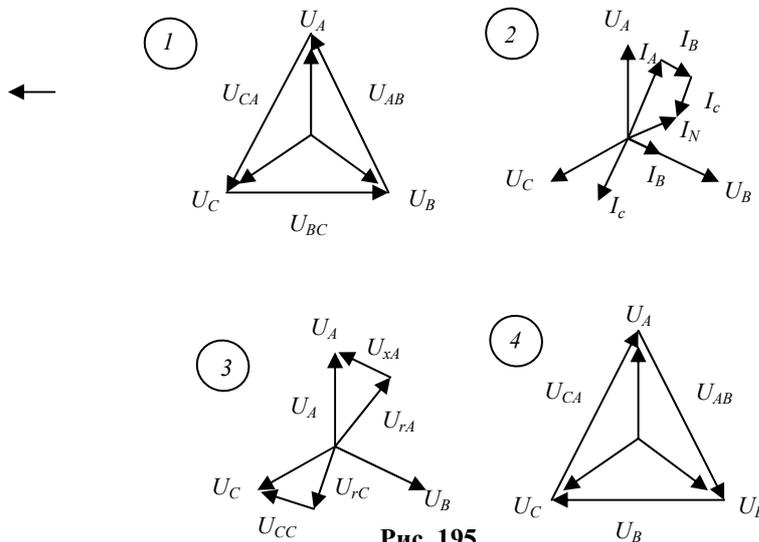
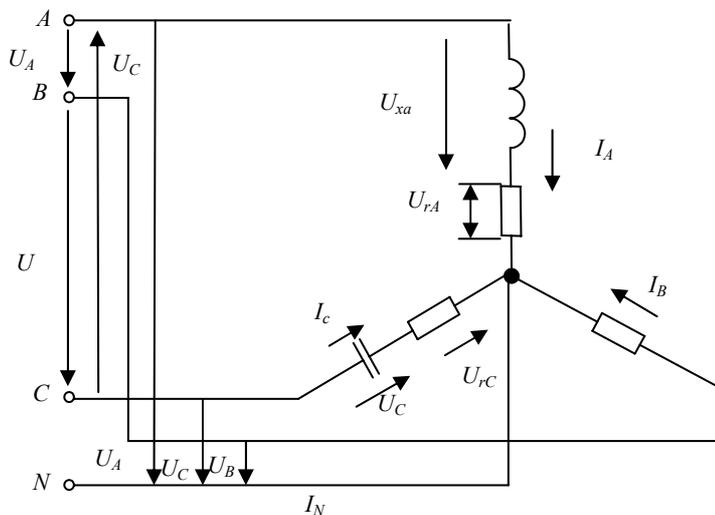


Рис. 195

96. Как изменятся токи цепи (рис. 196), если перегорит предохранитель ПР₂? Указать правильный ответ.

- 1) I_{AB} уменьшится.
- 2) I_B уменьшится.
- 3) I_C увеличится.
- 4) I_A увеличится.

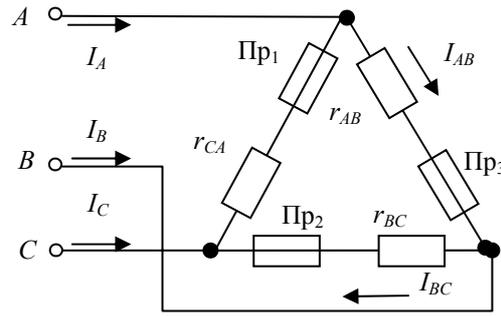


Рис. 196

98. Как изменятся токи при замыкании выключателя цепи рис. 197)? Указать правильный ответ.

- 1) I_{AB} уменьшится.
- 2) I_{BC} не изменится.
- 3) I_C уменьшится.
- 4) I_{CA} уменьшится.

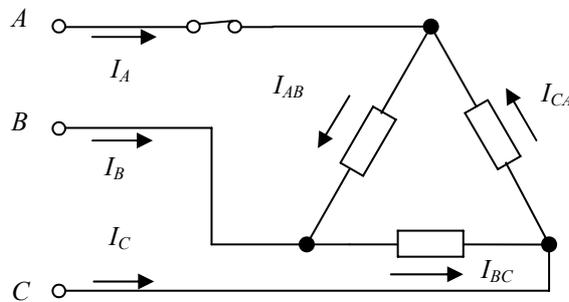


Рис. 197

99. В каком соотношении находятся показания ваттметров цепи (рис. 198), если $r = x$ и нагрузка BC оборвана? Указать правильный ответ.

- 1) $P_1 = P_2$.
- 2) $P_1 > P_2$.
- 3) $P_1 < P_2$.
- 4) $P_1 + P_2 < P_1 - P_2$.

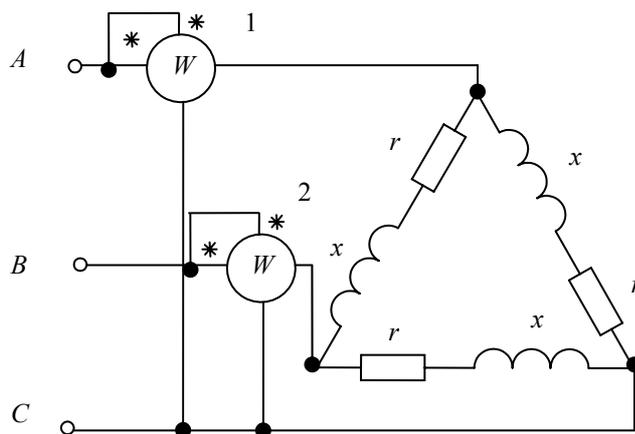


Рис. 198

100. В каком соотношении будут находиться показания ваттметров (рис. 199), если нагрузка симметрична, но оборвано питание фазы B? Указать правильный ответ.

- 1) $P_1 = P_2$.
- 2) $P_1 > P_2$.
- 3) $P_1 < P_2$.
- 4) $P_2 + P_1 > P_2 - P_1$.

5)

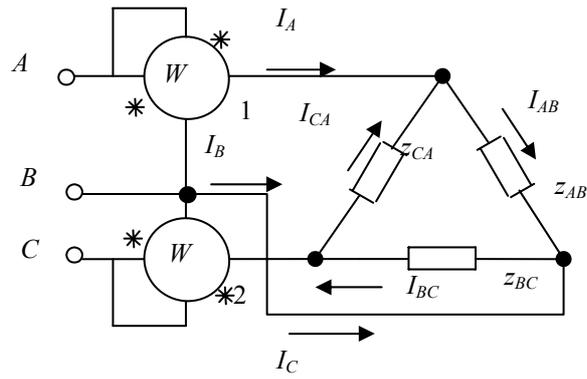


Рис. 199

КЛЮЧ ОТВЕТОВ НА ТЕСТЫ

<u>100</u>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	<u>1</u>	2	1	2	2	2	3	2	1	1
1	1	3	3	2	3	3	2	4	1	2
2	2	1	3	2	4	3	2	1	2	1
3	3	3	2	2	2	2	2	1	3	3
4	2	1	3	1	2	3	4	1	1	4
5	3	4	2	4	3	2	4	1	2	3
6	4	3	3	3	3	2	1	3	2	4
7	2	3	3	3	3	4	4	3	1	4
8	4	4	2	3	4	2	4	2	4	3
9	3	3	1	1	3	2	3	2	2	3

Правила пользования ключом ответов на тесты: первая цифра номера вопроса – первый столбец таблицы; вторая цифра номера вопроса – первая строка таблицы; на пересечении номер ответа; сотый номер вопроса и ответ подчёркнуты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Просмотр и изучение студентами учебного пособия в рамках образовательных программ высшего профессионального образования не ограничивает их познания в области трёхфазного электрооборудования и даёт возможность более глубоко изучить специальную литературу в этом направлении.

В последние годы велась активная учебно-методическая работа на кафедре "Электрооборудование и автоматизация" Тамбовского государственного технического университета по созданию именно учебно-методических комплексов по важным разделам теоретических основ электротехники. Один из них - по трёхфазным электрическим цепям сформулирован на основе уже имеющихся методических пособий и указаний, рекомендованных Учёным советом университета. От знакомства до воспроизведения и умения применять полученные знания на практике - задача данного учебного пособия, и применение его в учебном процессе даёт положительные результаты.

Авторы будут благодарны за советы, предложения и рекомендации по содержанию и оформлению учебного пособия.

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. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТРЁХФАЗНЫМ ЦЕПЯМ	72
Лабораторная работа 1. Измерение мощности в однофазных и трёхфазных цепях переменного тока	72
Лабораторная работа 2. Исследование трёхфазных цепей при соединении приёмников звездой	77
Лабораторная работа 3. Исследование трёхфазных цепей при соединении приёмников треугольником	82
Лабораторная работа 4. Высшие гармоники в трёхфазной цепи ...	85
Лабораторная работа 5. Режим нейтрали источников и приёмников электрической энергии	90
Лабораторная работа 6. Определение статических характеристик $P(U)$, $Q(U)$ активной, индуктивной, ёмкостной нагрузок	98
Лабораторная работа 7. Определение статических характеристик $P(U)$, $Q(U)$ осветительной и выпрямительной нагрузок	106
Лабораторная работа 8. Определение статических характеристик $P(U)$, $Q(U)$ асинхронной нагрузки	112
Лабораторная работа 9. Исследование защитного заземления в электроустановках напряжением до 1 кВ	120
Лабораторная работа 10. Исследование защитного зануления	127
Лабораторная работа 11. Анализ опасности поражения электрическим током в трёхфазных электрических сетях напряжением до 1 кВ	131
Лабораторная работа 12. Исследование характеристик устройства защитного отключения на соответствие требованиям электробезопасности	139
13. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ	143
14. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ	182
15. ЗАДАНИЕ ДЛЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	187
16. ПРИМЕРНЫЙ ВАРИАНТ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	194
17. ТЕСТЫ	219
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	257
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	259