УДК

ББК

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензенты: доктор физико-математических наук,

профессор Федоров Виктор Александрович

доктор технических наук, профессор Глинкин Евгений Иванович

Режимы работы трехполюсников в электрооборудовании: Учебное пособие/В.Ф. Калинин, В.М. Иванов, Е.А. Печагин. Тамбов: Издательство Тамбовского Государственного Технического Университета, 2010. 112 с.

В работе обобщены сведения о свойствах и методах анализа трехфазных электрических цепей. Большое внимание уделяется синтезу и диагностике данных цепей с наперед заданными характеристиками и способам экспериментального определения параметров реального промышленного электрооборудования.

Пособие имеет достаточное количество разнообразных задач по данному направлению с решениями, что дает возможность его использования при обучении не только электроэнергетических, но и других инженерных специальностей.

**ВВЕДЕНИЕ**

Жизнь современного человека и, тем более, цивилизованной страны немыслима без электричества. Потоки электроэнергии, рождаясь на электростанциях, растекаются к городам и заводам, разбиваясь на ручьи, проникают в каждый дом, достигая самых удаленных электроприемников.

Устойчивость в работе энергосистем, надежность 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 трехфазных электропередач стоял М.О.Доливо-Добровольский - русский инженер, ученый, 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 трехфазного тока.

Следует отметить, что знакомство электротехников с трехфазной системой проходило не без затруднений. Было непонятно, как это по трем 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 1200 (), алгебраическая сумма трех токов или напряжений в каждый момент времени равняется нулю.

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

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

Достоинство трехфазной 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 протяженность 170 км и была выполнена на деревянных опорах высотой 8-10 м, со средним пролетом 60 м. По линии передавалась мощность около 220 кВт при напряжении 15 кВ. Фактический к.п.д. линии составил 0,75. Позже были проведены повторные испытания линии при напряжении 28,3 кВ. Испытания подтвердили, что при увеличении напряжения к.п.д. линии возрастает.

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

**ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ**

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ**

Трехфазная электрическая цепь может быть представлена как совокупность трех однофазных цепей, в которой действуют ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга на одну треть периода или, что тоже самое, на угол 2π/3.

Эти три составные части трехфазной цепи называются фазами и им будем приписывать буквенные обозначения А, В, С. Таким образом, термин «фаза» в электротехнике обозначает два понятия: угол, определяющий стадию периодического процесса, и составную часть трехфазной цепи.

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

*U*A

*U*B

*U*C

*i*A

*i*B

*i*C

*z*

*z*

*z*

**Рис. 1**

Фазы А, В, С изображены под углом 1200 для того, чтобы подчеркнуть, что напряжения источников uА, uВ , uС  сдвинуты относительно друг другу на одну треть периода. Следовательно,

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

При равенстве амплитуд Um напряжений и одинаковых сопротивлениях нагрузки *z* в фазах токи *i*А, *i*B, *i*С также равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на одну треть периода, образуя так называемый трехфазный ток. Сумма этих токов в любой момент времени равна нулю: *i*А+ *i*B +*i*С = 0

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 трехфазной цепью исключаются потери мощности от токов *i*А, *i*B, *i*С  в обратном проводе.

Трехфазная цепь рис. 3, фазы которой соединены электрически, представляет одну из разновидностей так называемых связанных трехфазных цепей.

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

Обмотки трехфазного генератора могут быть соединены либо звездой, либо треугольником. При соединении звездой концы обмоток соединяют в общую точку, которую называют нейтральной. Начало обмоток обозначают А, В, С, концы - х, у, z (рис. 4, а). Начала обмоток соединяют с нагрузкой линейными проводами, по которым идут линейные токи.

# **Рис.2**

*U*

*ωt*

*U*A

*U*A

*U*C

*U*B

# **Рис.3**

z

x

y

N







A

B

C

N







B

C

A

300







***а)***

***б)***

*U*A

*U*B

*U*C

*z*

*z*

*z*

N

N’

*i*A

*i*B

*i*C

# **Рис. 4**

Будем в дальнейшем пользоваться следующей терминологией: ЭДС, индуктируемые в обмотках генератора или трансформатора, напряжения на зажимах обмоток и токи в них называть фазными ЭДС, напряжениями и токами, а напряжения между линейными проводами и токи в них - линейными напряжениями и токами. На схеме (рис. 4, а) *UФА ,UФВ ,UФС*- комплексы фазных напряжений генератора, *UАВ ,UВС ,UСА*- комплексы линейных напряжений. Абсолютные значения этих напряжений являются их модулями, т.е.

|UФА|=|UФВ|=|UФС|=UФ,

|UАВ|=|UВС|=|UСА|=UЛ.

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

*UАВ =UА-UВ , UВС =UВ-UС , UСА =UС –UА.*

## На рис. 4, б приведена топографическая векторная диаграмма линейных и фазных напряжений генератора.

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

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



Действительно из треугольника (рис. 4, б) следует:



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

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

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

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

y

Uвc

Uав

Uca

z

x

B

C

A

A

B

C

Uав

Uвc

Uca

600

600

600

***а)***

***б)***

# **Рис. 5**

**СИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ**

Трехфазные цепи представляют собой разновидность цепей синусоидального тока и поэтому расчет и исследование их производятся теми же методами, что и для однофазных цепей. Расчет трехфазной цепи, так же, как и расчет всякой сложной цепи, ведется обычно в комплексной форме. Ввиду того, что фазные ЭДС и напряжения генератора сдвинуты относительно друг друга на 1200, для краткости математической записи применяются фазовый оператор – комплексная величина:



Умножение вектора на оператор *a* означает поворот вектора на 1200 в положительном направлении (против хода часовой стрелки), соответственно умножение вектора на *а*2 означает поворот вектора на 2400 в положительном направлении или, что то же самое, поворот вектора на 1200 в отрицательном направлении:



Три вектора: 1, *а* и *а*2 образуют симметричную трехфазную систему векторов. При этом: 1+*а*+*а*2 =0.

При помощи оператора *а* можно, например, записать напряжения фаз трехфазной системы как

*UФА , UФВ =а2 UФА , UФС =а UФА.*

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

На рис. 6, а показано соединение нагрузки звездой. На схеме обозначены: *IА, IВ, IС -* линейные токи, *UА, UВ, UС*– 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.

*UФА =UА , UФВ =UВ , UФС =UС.*

Iв

Iа

Iс

А

В

С

z

z

z

Uв

Uc

Uа

***а)***

***б)***

Uc

Uв

Uа

Iа

Iв

Iс



φ

φ

N’

# **Рис. 6**

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

,

где, R и X - активное и реактивное сопротивления фаз.

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



Соответственно токи в фазах В и С выражаются через ток IA

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

Линейное напряжение определяется как разности соответствующих фазных напряжений. Например:



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

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



т.е. линейный ток IА отстаёт по фазе на 300 от тока IАВ, причем модуль его в раз больше фазного тока IАВ.

Iв

Iа

Iс

А

В

С

z

z

z

Iвc

Uвc

Uca

Uав



Iав

*а)*

*б)*

Uca

Iса

Uвc

Uав

Iав

Iа

Iвc

Iв

Iс



φ

φ

Re

Im

# **Рис. 7**

Таким образом, при симметричном режиме работы цепи имеет место, следующее соотношение:



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



Активная мощность симметричной трехфазной цепи равна



При соединении нагрузки звездой:  *IФ =IЛ*.

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



При соединении нагрузки треугольником: *UФ =UЛ*, 

Активная мощность трехфазной цепи будет такой же:



Следовательно, независимо от схемы соединения нагрузки



Аналогично, реактивная мощность



И полная мощность симметричной треугольной цепи



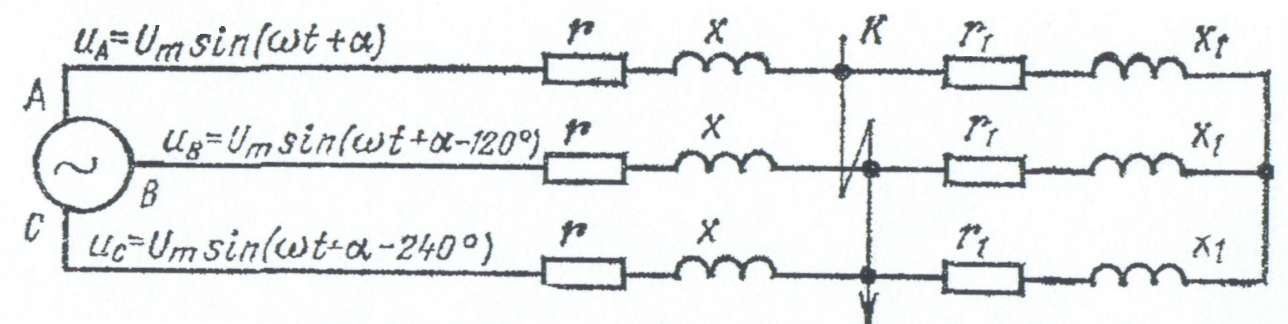
При этом коэффициент мощности определяется из соотношения



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

**КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В СИММЕТРИЧНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ**

**ЦЕПИ**

****

**Рис. 8.** Трехфазное короткое замыкание электрической сети

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

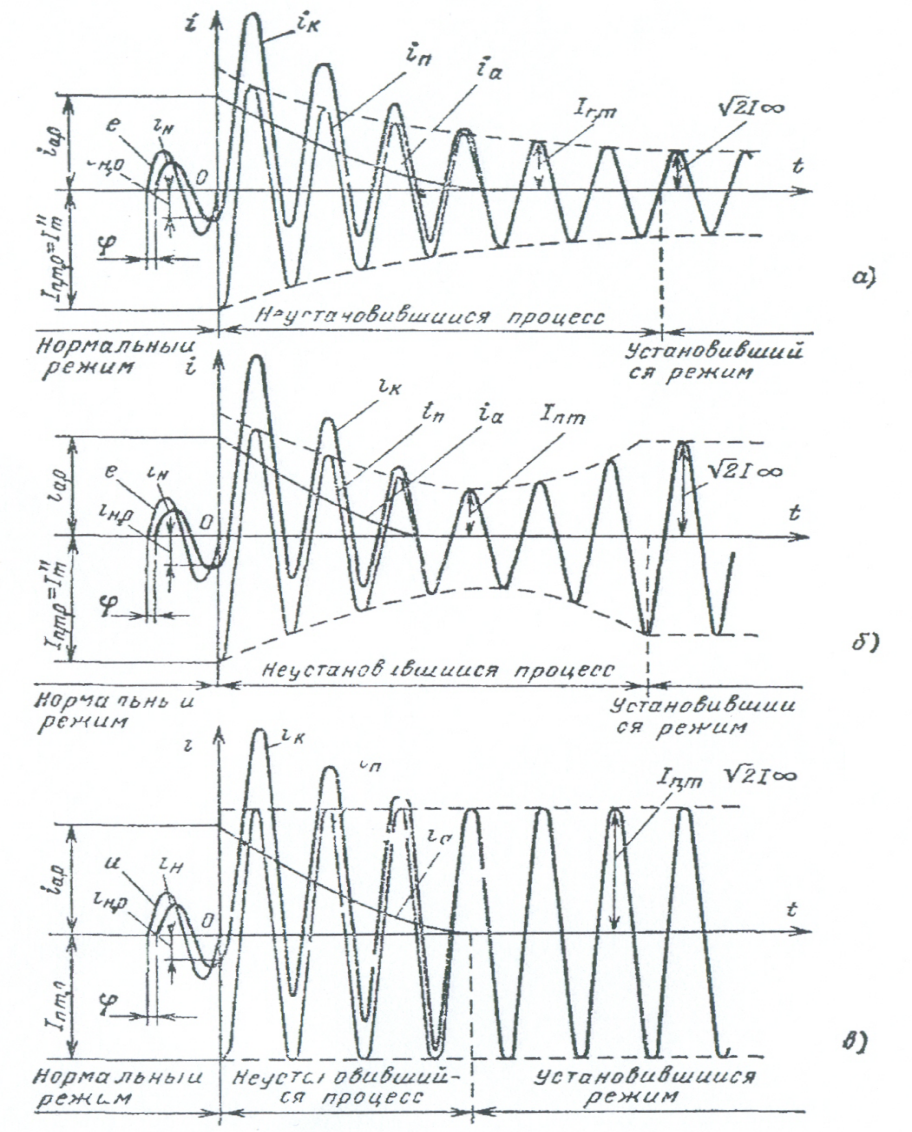
В левой части графиков изображены кривые токов предшествующего нагрузочного режима. Пересечение оси токов *i* с осью времени *t* соответствует моменту возникновения к. з. В правой части графика показаны кривые токов , и . Кривая изображает ток к. з., фактически протекающий по цепи, или полный ток к.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

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

Для генератора без АРВ, как видно, из рис. 9, а с исчезновением апериодической слагающей неустановившийся процесс не заканчивается, так как изменение периодической слагающей тока к. з. происходит более длительно. При этом амплитуды периодической слагающей уменьшаются от максимального начального , до некоторого установившегося значения =.

Благодаря магнитной связи между обмотками статора и ротора синхронной машины при возрастании периодического тока статора в момент возникновения к. з. в обмотке ротора наводится апериодический индукционный ток, по направлению совпадающий с током обмотки возбуждения ; в результате в начальный момент к. з. результирующий магнитный поток обмотки возбуждения и э. д. с. (или ) машины остаются без изменения.

Далее, с затуханием апериодического тока в обмотке возбуждения результирующий магнитный поток, постепенно уменьшаясь, доходит до установившегося значения; одновременно уменьшается э. д. с. и амплитуда периодической слагающей тока к.з. При достижении периодической слагающей тока к. з. установившегося значения неустановившийся процесс заканчивается. Длительность его определяется затуханием апериодического тока в обмотке возбуждения и при к. з. выводах генератора составляет примерно 3 – 5 с.



**Рис 9.** *Кривые изменения тока трехфазного КЗ*

*а – в цепи синхронного генератора без АРВ, б – вцепи синхронного генератора с АРВ, в – в цепи питающейся от энергосистемы*

Отличие процессов к. з. для генераторов с АРВ (рис. 9, б) от рассмотренного случая (рис. 9, а) состоит в том, что снижение напряжения на выводах генератора при к. з. 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 к. з., подобный изменению периодической слагаемой для генератора без АРВ. Повышение возбуждения приводит к возрастанию э. д. с. генератора и росту периодической слагающей тока статора вплоть до установившегося значения.

**НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ**

Несимметричный режим работы трехфазной цепи имеет место в том случае, когда комплексные сопротивления отдельных фаз нагрузки не равны между собой, т.е. *ZА ≠ ZВ ≠ ZС*.

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

# **Рис. 10**

UA

UB



N'

N

UФА

UФВ

UФС

IA

IB

IC

zA

zB

zC

UN

A

B

C

A

B

C

N'

N

UA

UB

UC

UФА

UФВ

UN

UФС

*а)*

*б)*

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



Или, обозначив

*UФА =UФ , UФВ =а2 Uф , UФС =а UФ ,*

получим

 (1)

Уравнение (1) позволяет по заданным фазным напряжениям генератора и сопротивлениям приемника  определить напряжение смещения, нейтрали *UN ,* зная которое, легко найти напряжения на зажимах приемников и вычислить ток в каждом из них.

Имеем:

*UА =UФА –UN , UВ =UФВ –UN , UС =UФС –UN* . (2)

На рис. 10, б приведена топографическая диаграмма напряжений для некоторых конкретных значений *ZА , ZВ  , ZС .*

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

Если заданы линейные напряжения *UАВ , UВС , UСА*на зажимах нагрузки, то целесообразно пользоваться формулами, полученными подстановкой (1) в уравнения (2).

Имеем:



 (3)



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

*P=PA +PB +PC*

Аналогично, реактивная мощность равна сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

*Q = QA +QB +QC*

Поэтому полная или кажущаяся мощность трехфазной цепи может быть определена как

. (4)

и коэффициент мощности

 (5)

Здесь *SА , SВ , SС* - полные комплексные мощности отдельных фаз.

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



Исключая один из токов, например, из условия



получим



или

 (6)

Уравнение (6) справедливо и для нагрузки, соединенной в треугольник, так как оно определяется линейными напряжениями *UАВ*и *UВС*. Круговой заменой индексов А, В, С 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 выравнивать фазные напряжения потребителей. Из схемы (рис. 11) следует:

*UА =UФА , UВ =UФВ , UС =UФС ,*

Т.е. фазные напряжения источника равны фазным напряжениями нагрузки (потребителя).

# **Рис. 11**

UA

UB



N'

N

UФА

UФВ

UФС

IA

IB

IC

zA

zB

zC

IN

A

B

C

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

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

**ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ**

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



Если нагрузка симметрична, достаточно произвести измерение одним ваттметром:

*P=3PW.*

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



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

Показания ваттметров следующие:





Мощность всей трехфазной цепи



т.е. сумме показаний отдельных ваттметров.

# **Рис. 12**

Нагрузка

*W1*

*W2*

*İА*

*İB*

*İC*

*A*

*B*

*C*











*İC*

*İB*

*İА*

*W1*

*W2*

*W3*

*N*

Нагрузка

# **Рис. 13**

Измерение реактивной мощности в трехфазных цепях производится с помощью специальных измерителей реактивной мощности, подобных по устройству ваттметрам. В симметричной трехфазной цепи измерение реактивной мощности может быть произведено, кроме того, с помощью ваттметров активной мощности. В этом случае ваттметр может быть включен в схему, как показано на рис. 14.

Поскольку при симметричной нагрузке как при соединении треугольником, так и при соединении звездой угол между линейным напряжением UBC и линейным током IА равен 900 -ϕ, то показание ваттметра будет



**Рис. 14**

*A*

*B*





*İА*

*İB*

*İC*

*W1*

*С*

Нагрузка

Для получения суммарной реактивной мощности показание ваттметра нужно умножить на :



где



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

**ТРЕХФАЗНОЕ ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

Большим достоинством трехфазных систем является легкость получения вращающегося магнитного поля. Это дает возможность создания большого класса трехфазных электрических машин переменного тока - генераторов и двигателей.

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

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

Условимся круговым вращающимся магнитным полем называть магнитное поле, ось которого равномерно вращается, причем значение магнитной индукции на этой оси неизменно. Легко убедится 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



то магнитная индукция запишется как



где,  – 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, что бы их оси были сдвинуты друг относительно друга в пространстве на угол 1200 (рис. 16, а) и подключим эти катушки к симметричной трехфазной цепи. Тогда через катушки будут протекать токи

Направлениям токов *iA , iB , iC*, 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:

# **Рис. 15**

BA

BB

BC

*i*A

*i*B

*i*C

+1

+*j*

-*j*





















*а)*

*б)*

B





*i*

**Рис. 16**



где, *Вт* – амплитуда индукции на оси каждой из катушек.

Заменяя косинусоидальные функции на экспоненциальные, получим



 (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 *ВВ* и *ВС* в комплексной форме:

  (8)

Тогда, с учетом (7) и (8), получим:







Результирующий вектор индукции находится сложением векторов *ВА , ВВ , ВС .*

В силу того, что сумма трех единичных векторов 1,  равна нулю, результирующая индукция принимает вид

 (9)

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

На рис. 16, б показано положение результирующего вектора для различных моментов времени.

Для изменения направления вращения поля достаточно поменять местами токи в каких-нибудь двух катушках, например, токи *iВ* и *iC*  .

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 600 (заявка на изобретение № 2633114/07 от 16 июня 1978 г.)

При подведении к схеме рис. 17 трехфазной системы напряжений возникают токи *i1* и *i2 ,* создающие магнитные поля, индукции которых соответственно равны:





Результирующий вектор индукции находится сложением векторов:



# **Рис.17**

С

*+j*

*+1*

А

*i*1





B

*i*2

600

и



После простых преобразований получим

 (10)

Это выражение показывает, что результирующий вектор магнитной индукции вращается с угловой скоростью ω, причем значение индукции на оси неизменно равно  , т.е. получается круговое магнитное вращающееся поле.

**НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ**

Если в трех одинаковых фазах обмотки трехфазного генератора переменного тока индуктируются одинаковые несинусоидальные напряжения, например, содержащие третью гармонику, то напряжение фазы А можно представить в виде



Напряжения во второй и третьей фазах получаются путем замены в этом уравнении *ωt* соответственно на  и . Это дает





Таким образом, в то время как основные гармоники смещены по фазе друг относительно друга на 1200 , высшие гармоники во всех трех 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.

**Рис. 18**

U3A

U3B

U3C

N'

N

U3ФА

U3ФВ

U3ФС

I3A

I3B

I3C

zA

zB

zC

A

B

C

UN

## Здесь



При этом легко показать, что *i3A* = *i3B = i3C=*0*.*

Поэтому *u3A= u3B =u3C=*0.

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 создает в фазах нагрузки падение напряжения утроенной частоты и, таким образом, делает несинусоидальным также напряжение на нагрузке.

**МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ**

**ДЛЯ РАСЧЁТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ**

Запишем действующие значения симметричной системы ЭДС



Обозначим , тогда



Симметричную трехфазную систему ЭДС можно записать в виде:

 ; 

Как видно из рис. 19 ЭДС в фазах проходит через максимум в алфавитном порядке фаз (A, B, C, A, B, C, …). 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, …) можно записать в виде:

; ; 

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

































**Рис. 19**

Любую несимметричную трехфазную систему ЭДС, напряжений или токов, например, , ,  можно представить в виде суммы трех симметричных трехфазных систем: нулевой (;;), прямой (;;) и обратной (;;) последовательности, которые называют симметричными составляющими данной несимметричной трехфазной системы (рис 20).

 (11)

Из уравнения (11) можно выразить ,  и  через ,  и , если учесть, что

; ; .

Для получения  следует сложить равенства (11) и разделить полученную сумму три.

Для получения  следует, оставив первое равенство без умножения, умножить второе равенство на  и третье – на , затем сложить три полученных равенства и разделить сумму на три.













































**Рис. 20**

Для получения  следует, оставив первое равенство (11) без умножения, умножить второе равенство на  и третье – на , затем сложить три полученных равенства и разделить сумму на три.

 (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 рис. 21, а показан участок сети с указанием положительных направлений линейных *UCA, UAB, UВС,* и фазных *UА, UВ, UС* напряжений, а на рис. 20, б представлена векторная диаграмма линейных напряжений.





*A*

*U*A

*U*B

*U*C

*a)*

*N*

*B*

*C*

*б)*

*-1*

*+1*







*-j*

*+j*

*α*

*β*

**Рис. 21**

Примем следующие обозначения:

Тогда, на основании метода симметричных составляющих для обратной последовательности напряжения *UAB* можем записать

 (13)

где,   фазный множитель.

Перепишем уравнение (13):



Можно показать, что модуль этого комплекса равен

 (14)

Так как сумма комплексов линейных напряжений получена из рассмотрения треугольника на рис. 22.

# **Рис. 22**

*-U*CA

*U*BC

*π-(α-β)*

*U*ABC

*π-β*

*π-α*

*α*

*β*

*α-β*

*U*CA

Из треугольника по теореме косинусов имеем:

 (15)

 (16)

 (17)

Следовательно, можем записать



 (18)

По теореме синусов



Или



Таким образом, с учетом (15) имеем

 (19)

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

 (20)

Аналогично можно найти уравнение для напряжения прямой последовательности.

Действительно,



Квадрат модуля этого комплекса равен

 (21)

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

 (22)

Уравнения (20) и (22) являются основными для расчета 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 найдем из выражений

 .

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

Запишем фазные напряжения в комплексной форме:

*γ*

*θ*

*+1*

*+j*

*ŮB*

*ŮC*

*-1*

*-j*

*ŮA*

*ψ*

# **Рис. 23**

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

*UAB = UA – UB , UBC = UB – UC , UСA = UC – UA .*

Причем

*UAB + UBC + UСA =* 0

На основании метода симметричных составляющих утроенное напряжение нулевой последовательности равно:

**

Модуль последнего выражения после простых преобразований будет выглядеть так:

 (23)

С другой стороны, линейное напряжение *UAB* , выраженное через фазные напряжения *UА* и *UВ*, можно записать:

 (24)

Его модуль



Таким образом,

 (25)

Аналогично получим уравнения для линейных напряжений *UBC* и*UCA* :

, (26)

. (27)

Подставляя уравнения (25)-(27) в (23), имеем:

.

И окончательно искомое напряжение нулевой последовательности фазных напряжений будет определяться формулой

. (28)

В частном случае, когда система линейных напряжений симметрична, т. е. *UAB =UBC =UCA =UЛ* , из (28) получим

. (29)

На рис. 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 *Zab* и *Zbc* элементов этой цепи, причем полное сопротивление амперметра обозначим через *Zса* . На основании законов Кирхгофа имеем:

, , ,

откуда

.

Так как составляющая нулевой последовательности системы линейных токов по условию равна нулю, то, выражая токи *Iс* и *Iа*  через составляющие прямой и обратной последовательностей *I1* и *I2* , получим

*Ia = I1 + I2 , Ic = aI1 + a2 I2*

и, подставив эти значения в выражение для *Iса* , найдем



**Рис. 24**

*A*

*B*

*C*

*İC*

*İB*

*İA*

*İaв*

А

*İвc*

*İc*

*İa*

*İca*

*Zca*

*Zca*

*Zвc*

Из этого выражения следует, что ток *Ica* , проходящий через амперметр, не зависит от состоящей обратной последовательности и пропорционален составляющей прямой последовательности, если выполнены условия

*Zab + a2 Zbc* = 0,

или

, (30)

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

*Zab + aZbc* = 0,

или

.

Фильтр для выделения составляющей прямой последовательности логично получить при

, .

Нетрудно показать, что равенство (30) будет выполняться при

, .

На рис. 25, а показана схема, в которой реализуются указанные условия.

Фильтр для выделения составляющей обратной последовательности получим, взяв

, .

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

, .

На рис. 25,б показана схема для выделения составляющей обратной последовательности.

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

. (31)

Это соотношение используется при измерении напряжения нулевой последовательности. Три однофазных трансформатора напряжения соединяются, как показано на рис. 26, причем 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:

*UV =Ua +Ub +Uc ,*

а при соответствующей градуировке его можно использовать для измерения напряжения нулевой последовательности: *UV* ≡ *U0.*

*A*

*B*

*C*

*R*

А



** 

*İ1*

*а)*

*A*

*B*

*C*

*R*

А



** 

*İ2*

*б)*

**Рис. 25**

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 трем фазам линии. Общая точка звезды подсоединена через вольтметр к нейтрали. Напряжение на вольтметре *UV*  можно определить из следующих соотношений:

,

,

.

Сложив эти уравнения и учтя, что

, ,

получим

.

Напряжение  определяется асимметрией фазных напряжений источника питания линии. Эта система, как правило, симметрична. Поэтому показание вольтметра равно напряжению нулевой последовательности *UV =U0* .

Аналогично (31) ток нулевой последовательности можно представить в виде:

, (32)

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

*I = Ia + Ib + Ic*,

и, следовательно, его можно отградуировать на показание тока нулевой последовательности, т. *I* ≡ *I0* .

*ŮB*

*ŮC*

*ŮA*

*A*

*B*

*C*

*N*

V

*Ůв*

*Ůc*

*Ůa*

*ŮV*

**Рис. 26**

*A*

*B*

*C*

*N*

*ŮV*

V

*Z*

*Z*

*Z*

*ŮB*

*ŮC*

*ŮA*

**Рис. 27**

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

*I = Ia + Ib + Ic*,

и, следовательно, его можно отградуировать на показание тока нулевой последовательности, т. *I* ≡ *I0* .

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 трех фаз *IA, IB, IC .* Поэтому ЭДС, индуктируемая вторичной обмоткой кольцевого трансформатора, пропорциональна результирующему магнитному потоку Ф, а показание амперметра, как и в схеме рис. 28, а, пропорционально току нулевой последовательности.

*A*

*B*

*C*

А

*İA*

*İB*

*İC*

*İa*

*İc*

*İв*

*İ*

*A*

*B*

*C*

А

*İA*

*İB*

*İC*

*İ*

*Ф*

***а)***

***б)***

**Рис. 28**

**ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В МЕСТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ**

Для расчётов указанных величин предварительно должны быть составлены схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности, и определены результирующие сопротивления ,, и результирующая э. д.с. *E*.

В качестве положительного принимаем направление токов к месту короткого замыкания.

*Двухфазное к. з.* Двухфазное к. з. между фазами В и С (рис. 29) характеризуется следующими условиями:

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

произведём разложение тока фазы А на симметричные составляющие:

Откуда

Исходя из условия , и рассматривая его совместно с системой (11) можно убедиться в том, что

Из (11), того что и вытекает равенство:

Заменив в котором на , согласно (33) получим расчётное выражение для определения тока при двухфазном к. з.:

Комплексная форма выражения (35) означает, что ток отстаёт от фазной э.д.с. на угол 90° (деление на *j*) и по абсолютному значению равен:

Токи в повреждённых фазах В и С находим по (11) и (33):

Абсолютное значение полного тока при двухфазном к. з. н определяется из (36) – (38):

На основании (39) для момента возникновения к. з.

где - сверхпереходная междуфазная э. д. с.

В случае питания к. з. от энергосистемы

С

В

А

***а)***

***б)***

**Рис. 29**

С

В

А

***а)*** ***б)***

**Рис. 30**

На рис. 29, б произведено построение симметричных составляющих и полных токов для двухфазного к. з. В – С.

При определении напряжений в месте к. з. следует учесть следующее: для систем с заземлённой нейтралью, когда сопротивление имеет конечное значение, напряжение при на основании также равно нулю; для систем с изолированной нейтралью, когда и – неопределённость, короткие замыкания не влияют на смещение нейтрали системы относительно земли и в уравнениях напряжений не рассматриваются.

Симметричные составляющие напряжений и можно определить:

(42)

(43)

(44)

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

*Однофазное к. з.* на землю одной из фаз, например фазы А (рис. 30), определяется следующими условиями:

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

где, , , , , , – векторы симметричных составляющих и фазных величин.

равны:

Выражая напряжение через симметричные составляющие и их значения в (42) – (44), получим:

и далее:

откуда

Абсолютное значение полного тока к. з. равно:

для начального момента времени

где - сверхпереходная междуфазная э. д. с.

При питании от энергосистемы

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

*Несимметричные к.з. за трансформаторами.* При переходе через трёхфазные трансформатор (или трёхфазную группу однофазных трансформаторов) в нормальном режиме токи и напряжения в общем случае изменяется по значению и фае, зависящей от группы соединения обмоток трансформатора. В частных случаях возможна трансформация только по значению и фазе, зависящей тот группы соединения обмоток трансформатора. В частных случаях возможно трансформация только по значению или по фазе, например для трансформаторов с соединением обмоток Υ/Υ-12 и для трансформаторов с соединением обмоток Υ/∆ и коэффициентом *n*=1 трансформации соответственно.

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

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

Для понижающего трансформатора

Для повышающего трансформатора

Где и – 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 использования метода симметричных составляющих, достаточно задать коэффициенты трансформации по (49) и углы поворота этих систем, приведены ниже, чтобы получить действительные значения и угловые смещения токов и напряжений при переходе через трансформатор.

Смещение систем прямой и обратной последовательности по углу при трансформации со стороны звезды на сторону треугольника производится поворотом векторов прямой последовательности на угол 360°-30°∙N , векторов обратной последовательности на угол –(360°-30°∙N). При трансформации от треугольника к звезде знаки углов поворота меняются на обратные соответственно: -(360°-30°∙N) и 360°-30°∙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 к. з.;

затем для конкретных условий вычисляется токов месте к. з., 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 к. з. за трансформаторами.

На рис. 31-33 приведены векторные диаграммы токов к. з. для трансформаторов с наиболее распространёнными группами соединения обмоток Υ/∆–11 и Υ₀/∆–11 и коэффициентом трансформации *n*=1. Для такого рода трансформаторов число витков в обмотках соединённых в треугольник, в раз превышает число витков обмоток, соединённых в звезду:

/

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

*Двухфазное к.з. на стороне треугольника* (рис. 31). Рассмотрение начнем с места к.з.

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

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

Токи к.з. протекают по всем трем фазам треугольника, поскольку распределяется между одной фазой и двумя обратно пропорционально их сопротивлениям – как и . На стороне звезды изменения систем токов по фазе не происходит, но по значению токи возрастают в раз за счет соотношения витков .

В результате трансформации в фазах звезды будут протекать токи (рис. 31, г): в фазе С и в фазах А и В .

При к.з. между фазами СА и АВ максимальное значение тока к.з. со стороны звезды будет циклически перемещаться в фазы А и В. Токи к.з. со стороны звезды при равных сопротивлениях в схемах прямой и обратной последовательности соответствуют току трехфазного к.з. в одной фазе

где, и – соответственно действующие значения периодической слагающей тока двухфазного и трехфазного к.з. для t=0.

и половине этого тока в двух других фазах.



*Двухфазное к.з. на стороне звезды.* Системы токов прямой и обратной последовательности (рис. 32, б и в) при трансформации со стороны звезды в фазы треугольника уменьшаются в раз за счет большего в раз числа витков в обмотках, соединенных в треугольник.

Ток к.з. 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°, токов обратной последовательности (рис. 32, в) на угол -30°.

Аналогично предыдущему случаю к.з. токи в линейных проводах треугольника (рис. 32, г) составляют: в фазе В , в фазах А и С , и при циклическом изменении фаз к.з. максимальное значение тока также перемещается. Если сопротивления схем прямой и обратной последовательности равны, то ток в одной из фаз со стороны треугольника составит , в двух других .

*Однофазное к.з. на стороне звезды* (рис. 33). Системы токов прямой, обратной и нулевой последовательности (рис. 33, б, в, г) трансформируются в фазы треугольника без изменения направления, уменьшаясь в раз (см. предыдущий случай к.з.).

Ток к.з. протекает только в одной фазе треугольника, соответствующей фазе к.з.

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

Результирующие токи в линейных проводах треугольника (рис. 33, д) протекают по двум фазам, А и С, и равны . При циклическом изменении фазы к.з. протекание токов в линейных выводах треугольника изменяется аналогично.

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

**б)**

**a)**

**C’**

**B’**

**c**

**b**

**a**

**y**

**z**

**x**

**y**

**z**

**x**

**A**

**B**

**C**

**г)**

**в)**

**Рис. 31*.*** *Двухфазное к. з. на стороне треугольника за трансформатором с группой соединения обмоток Υ/Δ-11. а – исходная схема; векторные диаграммы: токов прямой последовательности (б); обратной последовательности (в); полных токов к. з. (г).*

**y**

**z**

**x**

**A’**

**C’**

**B’**

**B**

**A**

**C**

**y**

**z**

**x**

**c**

**b**

**a**

**a)**

**б)**

**г)**

**в)**

**Рис. 32.** *Двухфазное к. з. на стороне звезды за трансформатором с группой соединения обмоток Υ/Δ-11. а – исходная схема; векторные диаграммы: токов прямой последовательности (б); обратной последовательности (в); полных токов к. з. (г).*

**0**

**y**

**z**

**x**

**A’**

**C’**

**B’**

**B**

**A**

**C**

**y**

**z**

**x**

**c**

**b**

**a**

**б)**

**а)**

**в)**

**г)**

**д)**

**Рис. 33.** *Однофазное к. з. на стороне звезды за трансформатором с группой соединения обмоток Υ0/Δ-11. а – исходная схема; векторные диаграммы: токов прямой последовательности (б); обратной последовательности (в); нулевой последовательности(г); полных токов к. з. (д).*

, (50)

где, – коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от вида к.з. (для трехфазного к.з. , для двухфазного к.з. , для однофазного к.з. ); – ток прямой последовательности для данного вида к.з.

В общем виде выражение для определения тока можно записать как

, (51)

где, x1,Σ – сопротивление прямой последовательности для данного вида к.з., характеризующее удаленность точки короткого замыкания; – дополнительное индуктивное сопротивление, зависящее от вида к.з. (для трехфазного к.з. , для двухфазного к.з. , для однофазного к.з. ).

На основании (51) ток прямой последовательности определяется как ток трехфазного к.з. в точке, удаленной от действительной точки к.з. на дополнительное сопротивление .

*Соотношение токов двухфазного и трехфазного к.з. для начального момента времени и ударный ток двухфазного к.з.* На практике, как правило, принимают x1,Σ =x2,Σ\*. После замены x2,Σ на x1,Σ выражения (40) и (41) для определения тока двухфазного к.з. в начальный момент времени приобретут следующий вид:

 (52)

Обозначив начальное значение тока через и поделив (52) на (50), а также (53) на (52), получим искомое соотношение токов для двухфазного и трехфазного к.з.

где, и – соответственно действующие значения периодической слагающей тока двухфазного и трехфазного к.з. для t=0.

## **РАБОТА РАЗЛИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ СОЕДИНЕННЫХ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА**

Рис 13.wmf

**Рис.34**

**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, 36, 37.

В нормальном режиме (если он симметричный)  **(**практически из–за погрешностей трансформаторов тока проходит небольшой ток – ток небаланса).

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

*Трехфазное КЗ*





**Рис. 35.**

*Двухфазное КЗ*

Рис 20.wmf

**Рис.36.**

*Однофазное КЗ*

Рис 21.wmf



**Рис. 37**

Для каждой схемы соединений можно определить отношение тока в реле Iр к току в фазе Iф, это отношение называется *коэффициентом схемы* , для данной схемы kсх=1.

### ***Соединение трансформаторов тока и обмоток реле в неполную звезду.***

Схема соединения представлена на рис. 38, векторные диаграммы иллюстрирующие работу схемы на рис. 38.

3 – фазное КЗ: токи проходят по обоим реле и в обратном проводе: 

2 – фазное КЗ: токи проходят в одном или двух реле в зависимости от того, какие фазы повреждены.



**Рис. 38**

Схема неполной звезды реагирует не на все случаи однофазного КЗ и применяется только для защиты от междуфазных КЗ в сетях с изолированными нулевыми точками: kсх=1.

Рис 23.wmf

**Рис. 39**

*Однофазное КЗ фазы В: токи в схеме защиты не появляются* (рис. 40).

Рис 24.wmf

**Рис. 40**

***Соединение трансформаторов тока в треугольник, а обмоток реле в звезду.***

Схема соединения представлена на рис. 41.

При трехфазном КЗ при симметричной нагрузке в реле проходит линейный ток в **** раз больше тока фазы и сдвинутый относительно него по фазе на 30°.

Особенности схемы:

1) токи в реле проходят при всех видах КЗ, защиты построенные по такой схеме реагируют на все виды КЗ;

2) отношение тока в реле к фазному току зависит от вида КЗ;

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.

Рис 25.wmf

**Рис. 41**

Коэффициент схемы: .

### ***Включение реле на разность токов 2 – фаз (схема восьмерки).***

Схема соединения представлена на рис. 42, векторные диаграммы иллюстрирующие работу схемы на рис. 43, 44.

При трехфазном КЗ (симметричная нагрузка) .

Рис 26.wmf

**Рис. 42**

*Двухфазное КЗ АС*

Рис 14_1.wmf

Iр=2Iф.

**Рис. 43**

*Двухфазно КЗ АВ или ВС*

Рис 15.wmf

Iр=Iф.

**Рис. 44**

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

Однофазное КЗ фазы В: ток в реле равен нулю.

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

Коэффициент схемы .

### ***Соединение трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности.***

Схема соединения представлена на рис. 45.

. Ток в реле появляется только при одно –и двухфазных КЗ на землю.

Схема применяется в защитах от замыканий на землю.

При нагрузках трехфазных и двухфазных КЗ IN=0.

Рис 16.wmf

**Рис. 45**

Однако из–за погрешности трансформаторов тока в реле появляется ток небаланса Iнб.

## **Схемы соединений трансформаторов напряжения.**

### ***Схема соединения трансформаторов напряжения в звезду.***

Схема предназначена для получения напряжения фаз относительно земли и линейных напряжений.

Заземление нейтрали первичной обмотки ТН 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.

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

На рис. 46: F – плавкий предохранитель; FA – плавкий предохранитель в цепях релейной защиты.

Рис 90.wmfРис 87.wmf

**Рис. 46 Рис. 47**

Рассмотренная схема соединений может быть выполнена посредством трех однофазных ТН или одного трехфазного пятистержневого ТН. Трехфазные трехстержневые ТН не применяются, так как в их магнитопроводе нет пути для замыкания магнитных потоков нулевой последовательности Ф0, создаваемых током I0 в первичных обмотках при замыкании на землю в сети. Поток Ф0 замыкается через воздух, это резко увеличивает IНАМ, вызывая недопустимый нагрев трансформатора.

Возможна дополнительная обмотка на основных или дополнительных стержнях для получения напряжения нулевой последовательности (рис. 48).

### ***Схема соединения обмоток трансформаторов напряжения в открытый треугольник.***

Рисунок_632.wmf

**Рис. 48**

***Рис 89.wmf***Два однофазных ТН включены на два междуфазных напряжения. Между проводами вторичной цепи включаются реле. Схема позволяет получить 3 междуфазных напряжения (Рис. 49).

***Схема соединения трансформаторов напряжения в разомкнутый треугольник.***

Схема соединения, показанная на рис. 47, позволяет получить напряжение нулевой последовательности:

 (55)

В нормальном режиме UP=0.

Необходимым условием работы схемы является заземление нейтрали первичной обмотки ТН.

**Рис. 49**

При отсутствии заземления напряжение на реле будет отсутствовать. Для вторичной обмотки принимается UНОМ=100 В – для сетей с заземленной нейтралью и 100/3 В –для изолированной.

Практически в нормальных условиях напряжение на реле составляет Uнб = 0,5...2 В.

При однофазном КЗ в сети с заземленной нейтралью:

UA=0; UB+UC=UФ=UP.

В сети с изолированной нейтралью: UP=3UФ**,** поэтому у ТН, предназначенных для таких сетей, вторичные обмотки имеют увеличенный в 3 раза коэффициент трансформации (например: 6000/100/3).

Напряжение нулевой последовательности может быть получено и от специальных обмоток трехфазных ТН (рис. 48). Чаще всего применяются ТН с двумя вторичными обмотками. Одна соединяется по схеме звезды, а вторая – разомкнутым треугольником.

Вторичные обмотки ТН 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 ТН, не должно быть коммутационных и защитных аппаратов.

## ***Контроль за исправностью цепей напряжения.***

Повреждения во вторичных цепях ТН (КЗ и обрывы) могут вывести из строя оборудование релейной защиты или привести к неправильным её действиям.

При КЗ 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 КЗ в сети. Для предотвращения ложных действий предусматриваются специальные устройства (блокировки).

Одна из простейших схем сигнализации обрыва в цепях ТН приведена на рис. 50.

Рисунок_641.wmf

**Рис. 50**

На рис. 51 изображена принципиальная схема блокировки защиты при повреждении в цепях ТН типов КРБ–11 и КРБ–12.

Рисунок_642.wmf

**Рис. 51**

В нормальном режиме напряжение на реле KV0 отсутствует. При обрыве одной или двух фаз возникает U0, 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 КЗ на землю в первичной сети; чтобы предотвратить блокирование защиты при этом, ставится реле KVА, реагирующее на появление тока I0 в первичной сети.

## **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 КЗ при всех возможных случаях и видах повреждений и чтобы к нему подводилась наибольшая мощность SР:

SP= UPIPsin(α–ϕР), (56)

где, α – угол внутреннего сдвига реле.

Мощность SP может быть недостаточна для действия реле, при КЗ близких к месту установки реле снижается напряжение UP или при неблагоприятном значении угла ϕР – sin(α–ϕР) ≈ 0. Отсюда вытекают следующие требования к схемам включения

1. Реле должно включаться на такое напряжение, которое при близких КЗ не снижается до нуля.

2. UP и IP, подводимые к реле, должны подбираться так, чтобы угол сдвига между ними ϕР в условиях КЗ не достигал значений, при которых SP на зажимах реле ≈ 0.

### ***90° и 30° схемы.***

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

Рисунок_741_a.wmf

Рисунок_741_b.wmf

Рисунок_741_c.wmf

**Рис. 52**

На рис. 52 приведена принципиальная схема максимальной направленной защиты с двумя пусковыми органами: тока и минимального напряжения и однофазными реле направления мощности, включенными по 90° схеме.

На рис. 53 представлена принципиальная схема максимальной направленной защиты с токовым пусковым органом и трехфазным реле направления мощности, включенным по 30° схеме.

Таблица 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Реле | 90° схема | | 30° схема | |
| IP | UP | IP | UP |
| 1 | IA | UBC | IA | UAC |
| 2 | IB | UCA | IB | UBA |
| 3 | IC | UAB | IC | UCB |

На рис. 54 и 55 представлены векторные диаграммы для 90° и 30° схемам соответственно.

Названия схем условны – их именуют по углам ϕР между UP и IP в симметричном трехфазном режиме при условии, что угол сдвига фаз между фазными током и напряжением равен нулю:  (чисто активная нагрузка).

### ***Работа реле, включенных по 90° и 30° схемам.***

Рассмотрим работу 90° схемы. (Анализ работы 30° должен быть выполнен студентами самостоятельно)

ϕреле= – 30°,

α=90°+ϕР=90–30=60°,

МЭ=kUPIPcos(ϕP+30°),

IP=IA, UP=UBC**.**

Трехфазное КЗ на линии. Ток IA отстает от UА на ϕk – определяется активным и реактивным сопротивлением линии от шин до точки КЗ и влиянием активного сопротивления дуги, (рис. 56):

и  – два предельных положения векторов тока;

 – ток КЗ через дугу в начале линии;

 – ток при КЗ за чисто реактивным сопротивлением.

Угол ϕP= – (90° – ϕk) – его предельные значения колеблются от 0 до 90°.

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

Величина электромагнитного момента максимальна: МЭ.макс при ϕP= – 30° (ϕk = 60°). При ϕP =0 величина электромагнитного момента составляет 0,86 от МЭ.макс, при ϕP = –90° величина момента составляет 0,5 от МЭ.макс.

Из анализа векторной диаграммы можно сделать вывод, что работа реле при трехфазном КЗ в зоне и вне зоны действия будет правильной и величина электромагнитного момента МЭ вполне достаточной для действия реле.

С точки зрения величины UP, 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 α=45°.

Выводы по схеме:

1. Знак момента реле при всех видах КЗ в зоне положителен, а вне зоны – отрицателен.

2. Величина электромагнитного момента МЭ в диапазоне возможных изменений угла ϕP остается значительной и достаточной для действия реле.

Рисунок_742_a.wmf

Рисунок_742_b.wmf

Рисунок_742_c.wmf

**Рис. 53**

Рисунок_743.wmf

**Рис. 54**

Рисунок_744.wmf

**Рис. 55**

Рисунок_745.wmf

**Рис. 56**

Рисунок_746.wmf

**Рис. 57**

3. Напряжение UP при симметричных КЗ имеет максимально возможное значение, обеспечивающие минимальную величину *мертвой зоны* (при близких КЗ UP=0 – реле не срабатывает).

Недостаток 90° схемы:

Возможность неправильной работы однофазных реле направления мощности KW при КЗ за силовым трансформатором с соединением обмоток Y/Δ. (Чисто теоретическая возможность: КЗ должно произойти через дугу с большим сопротивлением, на практике подобные происшествия не зафиксированы.) Трехфазные реле в подобных случаях должны действовать правильно.

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

30° схема

Используется, в основном, для реле косинусного типа. Реле, включенные по такой схеме, ведут себя правильно при всех видах КЗ. Недостаток аналогичен реле, включенным по 90° схеме: – возможность отказа при КЗ за трансформатором Y/Δ.

## ***Блокировка максимальной направленной защиты при замыканиях на землю.***

Для отключения однофазных КЗ 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 КЗ на землю защита блокируется. Пример выполнения блокировки показан на рис. 58.

## **Выбор уставок защиты**

### ***Ток срабатывания пусковых реле***

Ток срабатывания пусковых реле выбирается исходя из двух условий:

1. Отстройка от токов нагрузки:

 (57)

2. Отстройка от токов, возникающих в неповрежденных фазах при КЗ на землю в сети с глухозаземленной нейтралью.

Анализ работы защит показал, что реле направления мощности, включенные на ток неповрежденных фаз, могут действовать неправильно. Рассмотрим токораспределение при однофазном КЗ (рис. 59).

Реле KW, включенные в фазы А и В линии w1, могут разрешить защите отключить неповрежденную линию. Ток срабатывания защиты должен быть отстроен от тока неповрежденной фазы:

IС.З=kНIН.Ф, (58)

где, IН.Ф – ток в неповрежденной фазе;

kН=1,15...1,3;

IН.Ф=IН+kIК, (59)

где, k – коэффициент, учитывающий долю тока IК, замыкающегося по неповрежденной фазе, k <1;

IН – ток нагрузки.

Для защит в сети с малым током замыкания на землю и защит, блокируемых при замыканиях на землю, ток срабатывания IС.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).

Пояснение к рисунку

Рассмотрим действие защит в представленной сети при КЗ в точке К1:  отсюда следует, что IKB>>IKA. Короткое замыкание должно быть устранено срабатыванием защит 1 и 6. Однако действие защит будет *каскадным*. IKB>IС.З.1,IKA<IС.З.6 вначале сработает защита 1, после отключения выключателя 1 ток IKA резко возрастет, превысив IС.З.6 – сработает защита 6.

IС.З.6<IС.З.4< IС.З.2 (60)

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

Рисунок_751_a.wmf

Рисунок_751_b.wmf

**Рис. 58**



**Рис. 59**

Рисунок_762.wmf

**Рис. 60**

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ АВАРИЙ И ОТКАЗОВ В РАБОТЕ ОБОРУДОВАНИЯ**

Замыкание фазы на землю в сетях, работающих с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов

В трехфазной электрической сети, работающей с изолированной нейт­ралью, о замыкании фазы на землю узнают по показаниям вольтметров контроля изоляции. Вольтметры под­ключаются к зажимам основной вторичной обмотки трехфазного трехобмоточного 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 напряжения поврежденной фа­зы сети оказывается замкнутой накоротко, и показание ее вольтметра сни­зится до нуля. Две другие фазы будут находиться под линейным напряжени­ем. Индукция в магнитопроводах этих фаз возрастет в 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 емкостных токов неповрежден­ных фаз:

 (61)

где,  ток замыкания на землю, А; *С* — емкость сети, Ф;  — угло­вая частота, с-1.

Чем протяженнее сеть, тем больше ее емкость 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 емкостном токе приводит к тепловому эффекту и значительной ионизации окружающего пространст­ва, что создает благоприятные усло­вия для возникновения междуфазных КЗ. Прерывистый характер горения заземляющей дуги приводит к опас­ным перенапряжениям (до 3,2 UФ), 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 перенапряжении само по себе повышение до линейно­го напряжения двух фаз уже может привести к пробою 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 емкостные токи замыкания на землю не превы­шали следующих значений:

Напряжение сети, кВ 6 10 20 35

Емкостный ток, А 30 20 15 10

Эти токи соответствуют требовани­ям ПТЭ. Однако опыт показывает, что для обеспечения надежного самопогасания дуги в сетях 6 и 10 кВ ем­костные 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) емкостный ток че­рез место повреждения до минималь­ных значений.

Индуктивный ток дугогасящего реактора Iр возникает в результа­те воздействия на него напряже­ния смещения нейтрали , появляющегося на нейтрали при за­мыкании фазы на землю. Ток равен:



где, LP и LT — индуктивности дугога­сящего реактора и трансформатора соответственно, Гн; UФ — фазное на­пряжение.

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

**Выбор настройки дугогасящих ре­акторов.**

При  емкостная 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 (),если реактивная составляющая тока замыкания на землю не более 5 А, а степень расстройки  не превышает 5%.

Настройка с недокомпенсацией ()может применяться в ка­бельных и воздушных сетях, если лю­бые аварийно возникшие несимметрии емкостей фаз не приводят к появле­нию напряжения смещения нейтрали, превышающего 0,7UФ.

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 2,7UФ.

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 емкостей фаз относительно земли, зависящая от расположения проводов на опорах и распределения по фазам конденсаторов связи. Это вызывает появление на нейтрали не­которого напряжения несимметрии UНС.

Степень несимметрии  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 U0, 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 приведет к искажению фазных напряжений и да­же появлению сигнала "земля в сети", хотя замыкание на землю в это время отсутствует. Расстройкой дугогасящего реактора удается отойти от точки резонанса (колебательный контур образуется индуктивностью ре­актора и суммарной емкостью фаз сети), снизить напряжение смещения нейтрали и выровнять показания вольт­метров. При отсутствии замыкания на землю в сети смещение нейтрали допускается не более 0,15UФ. Одна­ко с точки зрения гашения дуги оп­тимальной все же является резонанс­ная настройка. Всякая расстройка ком­пенсации ведет 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 емкостей в се­ти. В кабельных сетях применяется исключительно резонансная настройка, так как емкости фаз кабелей симмет­ричны и напряжение несимметрии там практически отсутствует.

**Рис. 61.** *Замыкание фазы на землю в сети с изолированной нейтралью (а) и с компенсацией емкост­ных токов (б):*

3

0

0’

0

0’

На сигнал

+1

+j

-j

+KV

На сигнал

+KV

1

2

**а)**

1

2

**б)**

+1

+j

-j

*1 - трансформатор, питающий сеть; 2 - измерительный трансформатор напряжения; 3 - дугогасящий реактор; KV - реле напряжения*

**ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

**Пример 1.** Генератор трехфазного тока питает нагрузку через соединительную линию (рис. 63). Даны активное и реактивное сопротивления фазы генератора, линии и нагрузки, а также фазная э. д. с. генератора: , , , , , , .

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

**Рис. 62**

**Решение.** Полное сопротивление одной фазы

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

Фазное напряжение нагрузки

где – полное сопротивление фазы нагрузки, равное

Линейное напряжение в конце линии (на зажимах нагрузки)

Фазное напряжение в начале линии

где – полное сопротивление фазы нагрузки вместе с фазой линии,

Линейное напряжение в начале линии (на зажимах генератора)

Полезная мощность

или, что то же,

**Пример 2.** В качестве примера применения формул (4) рассмотрим схему фазоуказателя, используемую для определения чередования фаз по времени (рис. 63). Емкостное сопротивление конденсатора берется равным по величине сопротивлению лампы, т.е. XC =R. Тогда

Пусть *UВС =а2 UAB, UCA =a UAB*

## Из (3) получим

Отношение модулей этих комплексов дает:



Следовательно, лампа, присоединенная к фазе В, будет светить ярко, а лампа, присоединенная к фазе С, - тускло.

A

B

C

R

R

C

# **Рис. 63**

**Пример 3**. Определить активное сопротивление кабеля (на фазу) при передаче активной мощности при к. п. д. , линейном напряжении и .

**Решение.** Ток в кабеле

Потери в кабеле на одну фазу

Активное сопротивление кабеля

**Пример 4**. Нагрузка, соединенная в звезду с нулевым проводом, к которой приложено напряжение симметричной трехфазной системы, представлена на рис. 64. Линейное напряжение UЛ =380 В, R=22 Ом.

Требуется:

а) определить линейные токи и ток в нулевом проводе,

б) построить векторную диаграмму напряжений и токов.

**Решение.** Выбираем положительные напряжения для токов и фазных напряжений и отмечаем их стрелками на расчетной схеме рис. 64.

*L*

*R*

*C*





*A*

*B*

*C*

*N*

**Рис. 65**

*ŮC*

*-j*

*+*1*j*

*ŮB*

*ŮC*

*+j*

*ŮA*

*30º*

*İА*

*İN*

*İC*

*İB*

*İC*

*İN*

*İB*

*İА*

*İB*

**Рис. 64**

Принимаем, что

находим комплексы линейных токов:







Находим ток в нулевом проводе:



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

**Пример 5.** В цепь трехфазного тока включена равномерная нагрузка, соединенная в треугольник с сопротивлением каждой фазы, .

Сопротивлением линии ввиду незначительности его можно пренебречь. Линейное напряжение .

Определить токи в фазах и линии при обрыве фазы BC (рис. 66). Построить векторную диаграмму токов.

***C***

***B***

***A***

**Рис. 66**

**Решение.** Линейные напряжения

, ,

Тогда токи в фазах AB и CA будут равны

Токи в линии

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

0

+*j*

+1

***C***

***B***

***A***

**Рис. 67**

**Пример 6.** В цепь трехфазного тока с линейным напряжением включена равномерная нагрузка, соединенная в звезду, с сопротивлением каждой фазы .

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

**Решение.** Расчет нормального режима

Фазное напряжение

Сопротивление фазы нагрузки

Фазный и линейный токи

Потребляемая мощность

Потребляемая мощность

Проверка

Расчет ненормальных режимов

1) Обрыв фазы B. При обрыве фазы B фазы A и C тем самым включаются последовательно на линейное напряжение, поэтому

Фазное напряжение

Потребляемая мощность в фазах A и C

2) Короткое замыкание фазы A. Неповрежденные фазы B и C находятся под полным линейным напряжением:

; .

Токи при коротком замыкании

Согласно первому закону Кирхгофа

или при равномерной нагрузке

Потребляемая мощность короткого замыкания

**Пример 7.** Напряжение симметричной трехфазной системы приложены к нагрузке, соединенной звездой без нулевого провода (рис. 68). Линейное напряжение UЛ =380 В, R=20 Ом, XL =40 Ом, XC =30 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 расчетной схеме рис. 68, а.

**Рис. 68**

*L*

*R*

*C*





*A*

*B*

*C*

*-j*

*+*1*j*

***б)***

*+j*

*İC*

*İB*

*İА*



*N’*

*A*

*B*

*C*

*N’*

*N*















***а)***

Определяем напряжение смещения нейтрали:



но так как

то



и окончательно

Находим линейные токи:







**Пример 8.** Для заданной схемы рис. 69, а сопротивления лучей звезды равны. и , причем .

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

C

r

L

C

***C***

***A***

***B***

**Рис. 69, а**

**Решение.** Заданные сопротивления указывают на неравномерную нагрузку.

Используется формула напряжения смещения нейтрали

т. е. нейтральная точка перемещается в точку C.

300

**Рис. 69, б**

Фазные напряжения

Токи в фазах и линии

где

но

т. е. , так как .

Векторная диаграмма напряжений и токов построена на рис. 68, б.

**Пример 9.** В схеме (рис. 70, а) дано R=22 Ом, XL =19 Ом, XC =19 Ом, UЛ =380 В.

Требуется:

а) определить линейные токи,

б) определить фазные токи,

в) построить векторную диаграмму фазных токов и напряжений.

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

**Рис. 70**

*R*

*C*

*A*

*B*

*C*

*-j*

*+*1*j*

***б)***

*L*

*İC*

*İB*

*İА*

*İAB*

*İBC*

*İC*

*İCA*

*İCA*

*İА*

*İAB*

*İB*

*İBC*

**





***а)***

Определяем фазные токи:







Определяем линейные токи:



(А)

(А)

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

**Пример 10.** В цепь трехфазного тока включена равномерная нагрузка, соединенная в треугольник, причем сопротивление фазы нагрузки и линии соответственно равны и . Параллельно с нагрузкой включены в звезду конденсаторы (рис. 71).

Определить емкость конденсаторов, необходимую для достижения полной компенсации сдвига фаз между линейными напряжениями и током в начале линии, если частота напряжения . Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

***B***

***A***

***C***

**Рис. 71**

**Решение.** Преобразование треугольника нагрузки в эквивалентную звезду:

Параллельное соединение одной фазы звезды вместе с конденсатором:

Эквивалентное сопротивление на фазу

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

Решая квадратное уравнение, находим, что наибольшее значение , удовлетворяющее уравнению, равно 6,59 (Ом), т. е. ,

откуда

**Пример 11.** Определить показание ваттметра, включенного по схеме, представленной на рис. 72. Вычислить активную и реактивную мощность всех фаз нагрузки при и линейном напряжении .

***C***

***B***

***A***

**Рис. 72**

**Решение.** Ваттметр, включенный по данной схеме, покажет мощность, равную произведению , а это есть, реактивная мощность, так как (рис. 73).

Фазное напряжение

**Рис. 73**

Ток в фазе и в линии

Угол сдвига фаз

Показание включенного в схему ваттметра

Потребляемая нагрузкой активная мощность

Проверка:

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

Такой генератор с фазным напряжением, равным , питает через линию равномерную нагрузку, соединенную в звезду, причем сопротивление фазы нагрузки равно , а сопротивление фазы линии .

Определить токи в линии при наличии и отсутствии нейтрального провода.

**Решение.**

0

600

600

**Рис. 74**

1) Расчет схемы при наличии нейтрального провода.

Согласно условию фазное напряжение равны

Сопротивления одной фазы

Токи в линии

Ток в нейтральном проводе

2) Расчет схемы при отсутствии нейтрального провода. Напряжение смещение нейтрали

Фактические фазные напряжения на зажимах генератора

Линейные токи

Проверка:

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

Определить фазные токи, а также ток на различных участках нейтрального провода, если число ламп в группах составляет и ламп.

Сопротивление каждой лампы можно принять равным приблизительно , а линейное напряжение .

**Решение.** Фазные напряжения

Сопротивления каждой группы ламп

Токи фазные и линейные

Токи в нейтральном проводе согласно первому закону Кирхгофа на участке

на участке

на участке

**Рис. 75**

0

C

B

A

Проверка

**Пример 14.** В цепь трехфазного тока с линейным напряжением включена неравномерная нагрузка, соединенная в звезду: , , .Определить токи, фазные напряжения и напряжение смещения, а также потребляемую мощность.

Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

**Решение.** Задача решается методом определения напряжения смещения нейтрали звезды

Фазные напряжения

Фазные проводимости

Фазные напряжения на зажимах нагрузки

Токи в фазах нагрузки и линии

Проверка:

Потребляемая мощность

**Пример 15.** Определить симметричные составляющие для заданной системы фазных напряжений: ; ; .

**Решение.** Системы заданных фазных напряжений

Напряжение нулевой последовательности

Напряжение обратной последовательности

Напряжение прямой последовательности

Проверка:

**Пример 16.** Рассчитать токи короткого замыкания представленной на рис. 75 трехфазной цепи.





















**Рис. 76**

**Решение.** Симметричная система фазных ЭДС: ; ;  имеет нейтральную точку, соединенную с землей через  и эквивалентные сопротивления . Ввиду того, что реакция ротора на цепь статора, питающего генератора, для прямой и обратной последовательности различна, потоки, созданные токами нулевой последовательности, одновременно во всех трех фазах направлены к ротору или от него и вынуждены замыкаться от ротора к статору по воздуху в торцевых частях машины, т.е.  существенно отличается от  и  (см. рис. 32).

Так как у места К.З. ; ; ; ; ;  несимметричны, то, разложив их на симметричные составляющие ; ;  и ; ; , можно записать:

; ;  (58)

Пренебрегая токами нормальной нагрузки по сравнению с токами короткого замыкания, имеем: ; ; .

А так как , то, суммируя (58), получим



Приняв во внимание, что при 

, (59)

найдем , (60)

 (61)

; (62)

; (63)

, (64)

после чего легко определяются  и (рис 77)

**Примечание:** Сопротивления , ,  рассчитываются по конструктивным параметрам электрической машины, которые для большинства оборудования являются справочными величинами.













































**Рис. 77.** Векторные диаграммы в месте однофазного К.З. фазы .

**Пример 17.** Доказать, что для трехфазной 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

Составляющая нулевой последовательности

Составляющая обратной последовательности

Составляющая прямой последовательности

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

**Решение.** Из условий задачи несимметричная трехфазная система напряжений была представлена соотношениями

Симметричные составляющие напряжений:

1) нулевая последовательность

2) прямая последовательность

3) обратная последовательность

Проверка:

Симметричные составляющие линейных токов:

1) нулевая последовательность

2) прямая последовательность

3) обратная последовательность

Линейные токи

**Пример 19.** Определить токи в месте двухфазного К.З. фаз В и С. Построить векторную диаграмму.

**Решение.**Двухфазное К.З. между фазами и  характеризуется следующими условиями:

; ; . (65)

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

Произведем разложение тока фазы на симметричные составляющие:

,

откуда

. (66)

Исходя из условия  и рассматривая его совместно с системой (11), можно убедиться в том, что

 (67)

Исходя из (67) запишем равенство

,

Согласно (66) по­лучим расчетное выражение для определения тока при двухфазном К.З:

 (68)

Комплексная форма выражения (68) означает, что ток отстает от фазной э. д. с. на угол 90° (деление на *j*) и по абсолютному значению равен:

 (69)

Токи в поврежденных фазах *В* и *С* находим по (11) и (39):

 (70)

 (71)

Абсолютное значение полного тока при двухфазном к.з. определится из равенств (69) – (71):

. (72)

На основании (72) для момента возникновения к.з.

, (73)

где  — сверхпереходная междуфазная э.д.с.

В случае питания к. з. от энергосистемы

 (74)

На рис. 78, б произведено построение симметричных составляющих и полных токов для двухфазного к.з. *В-С.*





























а)

б)

**Рис. 78.** *Двухфазное К.З. (а) и векторная диаграмма токов*

*в месте повреждения (б).*

**Пример 20.** Определить токи в месте однофазного К.З. фазы *A.* Построить векторную диаграмму.

**Решение.**Однофазное К.З. на землю одной из фаз, например фазы *А* (рис. 79), определяется следующими условиями:

; ; .

Так как токи в двух фазах отсутствуют, то, очевидно, что симметричные составляющие поврежденной фазы *А* в соответствии с (12) равны:

.

Выражая напряжение  через симметричные со­ставляющие, получим:



и далее

,

откуда

. (75)

Абсолютное значение полного тока К.З. равно:

. (76)

Для начального момента времени

. (77)

где  — сверхпереходная междуфазная э.д.с.

При питании от энергосистемы

=. (78)



















C







**a)**

**б)**



**Рис. 79.** *Однофазное К.З. (а) и векторная диаграмма токов*

*в месте повреждения (б).*

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

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

C

A

B

**Рис. 80**

**Рис. 81**

Так как то и составляющие нулевой последовательности из рассмотрения исключаются.

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

–j

+j

**Рис. 82**

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

**Решение.**

а) однофазное короткое замыкание в фазе В.

Так как у места короткого замыкания , , , , , – несимметричны, то разложив их на симметричные составляющие , , , и , , , то можно записать:

Имеем: ;

Значит:

Проверка:

– верно.

Фаза А.

Фаза C.

б) двухфазное короткое замыкание между фазами А и С

Построить векторные диаграммы.

При к.з. между фазами A и C: ; ; ; .

Произведем разложение фазы B на симметричные составляющие

а значит

Токи в повреждённых фазах:

Фаза A:

Фаза C:

в) двухфазное короткое замыкание между фазами А и С на землю.

2 А



20 B



**Рис. 83, 84.** *Векторная диаграмма напряжений и токов при коротком замыкании фазы В.*

20 В



4 A



|  |  |
| --- | --- |
| **Рис. 85.** *Векторная диаграмма токов при двухфазном коротком замыкании фаз A и C.* | **Рис. 86.** *Векторная диаграмма напряжений при двухфазном коротком замыкании фаз A и C.* |

4 А



**Рис. 87.** *Векторная диаграмма токов при двухфазном коротком замыкании фаз A и C на землю.*

20 В



**Рис. 88.** *Векторная диаграмма напряжений при двухфазном коротком замыкании фаз A и C на землю.*

**Пример 23.** Известно, что обмотки трехфазных генераторов и трансформаторов могут быть соединены «звездой» или «треуголь­ником». При соединении «звездой» для получения системы симметрич-ных линейных напряжений, одноименные 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 одноименных 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 трехфазным 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 трехфазного генератора подсое­динены к выводам клеммной коробки (рис. 89).

2

3

6

5

4

1

**Рис. 89.** *Выводы клеммной коробки*

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

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

**Решение.** Показания вольтметра отличны от нуля, когда он подсое­динен 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 220В. Эти обмотки пронумеруем цифрами I, II, III (рис. 90). Анализ по­казаний вольтметра после соединения выводов 1, 3, 4 между собой показывает, что выводы 1 и 4 обмоток I и III одно­именные, а вывод 3 обмотки II — разноименный. Это ясно из рассмотрения двух вариантов топографических диаграмм фазных и линейных напряжений, соответствующих условию задачи (рис. 91). Следовательно, одноименными зажимами обмоток, являются зажимы 1, 4, 6 и 2, 5, 3.

**Рис. 90.** *Нумерация обмоток генератора.*

4

2

3

2

5

6

II

III

I

1

2

6

6

5

5

I

I

II

II

III

III

**Рис. 91.** *Топографическая диаграмма фазных и линейных напряжений.*

1

2

3

6

5

4

1

2

3

6

5

4

**Рис. 92.** *Выводы клеммной коробки при соединении обмоток «звездой».*

**Рис. 93.** *Выводы клеммной коробки при соединении обмоток «треугольником».*

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

Для определения последовательности фаз следует соб­рать схему фазоуказателя (рис. 94). Подключив эту схему к выводам генератора, соединенного, например, «звездой», вольтметром измеряют напряжения на резисторах фазоуказателя. При этом, если считать фазой А ту, к которой под­соединен конденсатор фазоуказателя, то фазой В — будет та, к которой подсоединен резистор, напряжение на котором больше.

Покажем это, определив напряжения на резисторах фазоуказателя в рассматриваемом случае, ори XС =R .

Напряжение между нейтральными точками фазоуказателя и генератора

XC

R

R

**Рис. 94.** *Схема фазоуказателя.*



Напряжение на резисторах фазоуказателя:





Таким образом напряжение на резисторе, подключенном к фазе B составляет 329 В, а на резисторе, подключенном к фазе С — 87,8 В.

**Пример 24.** Важным показателем качества электроэнергии является симметрия линейных напряжений трехфазных систем элект­роснабжения. Обычно неcимметрия 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, индуктирует в роторе вихревые токи значительной величины, которые и вызывают повышенный нагрев ротора.

Несимметрия напряжений оценивается величиной коэф­фициента несимметрии:



где, , ,  — комплексы линейных напряжений;  — номинальное значение линейного напряжения в симметрич­ном режиме.

 — фазный множитель.

Согласно ГОСТ 13109-67 «Нормы качества электрической энергии» коэффициент несимметрии не должен превышать 2%.

Условие

Из-за неправильного соединения обмоток трехфазного трансформатора диаграмма линейных напряжений имеет вид, показанный на рис. 92. Определить величину коэффициента

несимметрии линейных напряжений при UАВ=UВС=220 В, UСА=380 В.

30°

30°

B

A

O

C







**Рис. 95.** *Векторная диаграмма линейных напряжений*

Запишем комплексы линейных напряжений, приняв ; тогда

В; В,

Тогда КНСМ равен



**Пример 25.** Из-за неправильного подключения обмоток трехфазного трансформатора с фазным напряжением Uф = 220 В, питаю­щего асинхронный двигатель, система линейных напряжений на зажимах двигателя имеет вид, показанный на рис. 95. Определить фазные токи двигателя при соединении его обмо­ток звездой, если сопротивление токам прямой последова­тельности Z1=j3 Ом, сопротивление токам обратной после­довательности Z2=j1 Ом. Каковы будут токи при правиль­ном соединении обмоток трансформатора?

**Решение** В. При этом В, В.

Фазные напряжения прямой последовательности

В

Напряжения обратной последовательности

В.

Симметричные составляющие фазных токов

А,

А.

Фазные токи

А,

А,

А.

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

А,

А,

А.

Векторная диаграмма токов при неправильном и правиль­ном соединении обмоток приведена на рисунке 96.













**Рис. 96.** *Векторная диаграмма токов.*

**Пример 26**. Определить ток трёхфазного к. з. в точке к за реактором отходящей линии 6,3 кВ схемы рис. 97, а для начального момента времени.

**Решение.** За основную ступень трансформации принимаем =6,3 кВ.

По формулам:

определяем сопротивления энергосистемы, трансформатора и двигателей.

400 А

0,35 Ом

630 А

0,4 Ом

630 А

0,4 Ом

6,3 кВ

115 кВ

25 МВА

***а)***

*К*

*К*

***б)***

**Рис. 97.** *а – расчетная схема сети; б – схема замещения.*

Обозначив сопротивления схемы замещения порядковыми номерами получим:

для энергосистемы

для трансформатора 25 МВА

для синхронных двигателей

Сопротивление цепи к. з. от энергосистемы до шин 6,3 кВ

То же для синхронных двигателей:

Результирующее сопротивление цепи к. з.

Эквивалентная э. д. с. по (21)

Эквивалентная э. д. с. система – генератор Г – 2 определяется по (21):

Ток за реактором отходящей линии 6,3 кВ по (52)

В случае уравнения э. д. с. электродвигателей с э. д. с. системы погрешность в расчёте в сторону уменьшения тока составляет 1,67.

115 км

ВЛ 12 км

x1=0,4 Ом/км

x0=1,4 Ом/км

2x16 МВА

UK=10,5 %

115 км

2x7,5 МВА

6,3 км

6,3 км

*К*

*К*

*К*

***а)***

***б)***

***в)***

**Рис. 98.** *а – расчетная схема сети, б, в – схемы замещения.*

**Пример 27**. Определить ток к. з. в начальный момент времени для трёхфазного, двухфазного и однофазного к. з. в точке К (рис. 98, а).

На шинах 115кВ связи энергосистемой заданы токи трёхфазного к.з. А и однофазного к. з. А.

**Решение.** Решение начинаем с составления схем замещения.

Схема замещения прямой последовательности составляется аналогично схемам замещения для расчета токов трёхфазного к. з. и дополнительных пояснений не требует. Так как в данном случае для всех элементов принято, что , схема замещения обратной последовательности по сопротивлениям получается такой же, как и схема прямой последовательности, но только не содержит э. д. с. Обе схемы на рис. 98, б условно совмещены.

В каждом трансформаторе 16 МВА токи нулевой последовательности замыкаются в обмотке, соединённой в треугольник, так, что в цепи генераторов токи нулевой последовательности не проходят, и сопротивления генераторов в схему нулевой последовательности не вводятся.

Заданный ток со стороны энергосистемы свидетельствует о том, что в системе также имеются трансформаторы с заземлёнными нейтралями, которые (т. е. нейтрали) удалены от точки к. з. на суммарное сопротивление системы и ВЛ .

Таким образом, по числу заземлённых нейтралей – трансформаторов 16 МВА и энергосистемы – в схеме нулевой последовательности получим три ветви, объединённые в точке к. з. (рис. 98, в).

За расчётную ступень напряжения принимаем кВ.

Для упрощения из-за малой мощности генераторов () принимаем их приведённые э. д. с. равными напряжению энергосистемы.

На схемах замещения проставляем значения сопротивлений в соответствии со следующими подсчётами.

Схема замещения прямой (обратной) последовательности:

Схема замещения нулевой последовательности. Поясним, как определяется сопротивление нулевой последовательности системы:

Трехфазное к. з. Сопротивление цепи энергосистемы до точки к. з.

Сопротивление цепи генераторов до точки к. з.

Результирующее сопротивление схемы

Ток трёхфазного к. з. в точке К составит:

Двухфазное к. з. На основании (104) ток двухфазного к. з. в точке К

Однофазное к. з. Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности

Расчетное сопротивление для определения тока

Ток однофазного к. з. в точке К составит:

**Пример 28***.* На втулках 115 кВ трансформатора отпаечной подстанции в точке К (рис. 99, а) произошло однофазное к. з. Требуется определить ток к. з. для начального момента времени.

**Решение.** Сопротивления схем замещения (рис. 99, б, в) таковы:

Прямой(обратной) последовательности:

Нулевой последовательности:

В соответствии с:

;  
;

Получаем:

Результирующее сопротивление схемы прямой (обратной) последовательности

**Рис. 99.** *а – расчетная схема сети; б, в – схемы замещения: прямой (обратной) и нулевой последовательностей. Штрихами помечены доли сопротивления поврежденной ВЛ и взаимоиндукции между ВЛ*.

III

II

I

48 кВ

24 кВ

24 кВ

2х40 МВА

115 кВ

*К*

*К*

***а)***

***б)***

***в)***

*К*

Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности

Расчётное сопротивление для определения тока

Ток в месте повреждения

**Пример 29.** Исходные данные:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| UСЕТИ=220(В) | Однофазный  приёмник №1 | Однофазный  приёмник №2 | Однофазный  приёмник №3 |
| UНОМ (В) | 220 | 220 | 220 |
| PНОМ (кВт) | 6 | 4 | 9 |
| QНОМ (кВАР) | - | - | - |
| cosφном | 1 | 0,7 | 0,7 |
| Род нагрузки | акт | инд | емк |

**Задание:** определить токи в ветвях для разных случаев работы трехфазной цепи.

**Решение.** Фазные и линейные напряжения:

а) Схема соединения приемников в треугольник, с обрывом фазы С рис. 100.

ZCA

ZBC

ZAB



**Рис. 100**

Определим сопротивления элементов схемы замещения приемников:

;

;

.

В комплексной форме:

Определяем фазные токи приемников:

Определяем линейный ток приемников:

0

+1

*+j*

В

А

25 В

10 А

**Рис. 101.** *Векторная диаграмма схемы соединения приемников в треугольник, с обрывом фазы С.*

б) Схема соединения приемников в треугольник, с обрывом нагрузки АВ рис. 102.

ZBC

ICA

ZCA



IBC

**Рис. 102**

Определяем фазные токи:

Определяем линейный ток:

0

+1

*+j*

**С**

**В**

**А**

25 В

10 А

**Рис. 103.** *Векторная диаграмма токов и напряжений схемы соединения приемников в треугольник, с обрывом нагрузки АВ.*

в) Соединить приемники в звезду с нулевым проводом рис. 104. Определить ток через человека при соприкосновении с фазой С и нулевым проводом. Построить векторные диаграммы. Сопротивление человека принять равным .

Определяем сопротивление элементов схемы замещения приёмников.



**Рис. 104**

В комплексной форме:

Сопротивление фазы C с учетом человека:

Определяем фазные и линейные токи приемников:

Определяем ток нейтрального провода:

г) Соединить приемники в звезду без нулевого провода рис. 105. Определить ток через человека при соприкосновении с фазой С и нулевой точкой нагрузки. Построить векторные диаграммы. Сопротивление человека принять равным .



**Рис. 105**

Определяем напряжения в фазах нагрузки:

Определяем токи в фазах нагрузки:

0

+1

*+j*

**С**

**В**

**А**

25 В

10 А

**Рис. 107.** *Векторная диаграмма* с*оединения приемников в звезду без нулевого провода.*

0

+1

*+j*

**С**

**В**

**А**

25 В

10 А

**Рис. 106.** *Векторная диаграмма соединения приемников в звезду с нулевым проводом.*

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

**Задача 1.** При производстве работ электромонтер повредил кабель трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью с линейным напряжением UAB=UBC=UCA=UЛ=380 В при частоте f=50 Гц и коснулся инструментом одной из фаз. Емкость каждой фазы кабеля относительно земли С = 0,1 мкФ. Определить ток, протекающий по телу электромонтера, приняв сопротивление его тела R=1000 Ом (Рис. 108).

**Задача 2.** При ревизии электрооборудования электромонтер, находясь на земле, коснулся линейного провода с линейным напряжением UAB=UBC=UCA=UЛ1 ном=380 В. Сопротивление

**Рис. 108**

*N*

*Uc*

*UB*

*UA*

*UBC*

*UAB*

*A*

*B*

*C*

*UCA*

*R3*

*Ih*

*R2*

*R1*

*Rh*

*N*

*Uc*

*UB*

*UA*

*UBC*

*UAB*

*A*

*B*

*C*

*UCA*

*C*

*Ih*

**Рис. 109**

изоляции проводов R1=R2=R3=10 кОм. Определить ток, протекающий по телу человека, сопротивление которого Rh=1000 Ом. Емкость проводов относительно земли пренебречь ввиду их малой напряженности (Рис. 109).

**Задача 3.** Определить ток Ih, протекающий по телу человека в аварийном режиме в трехфазной симметричной трехпроводной электрической цепи с изолированной нейтралью при замыкании фазы С на землю через небольшое активное сопротивление заземления Rзм=100 Ом и прикосновении человека к исправной фазе А с фазным напряжением U1ф ном=220 В. Сопротивления изоляции проводников R1=R2=R3=10 кОм, Rh=1 кОм (Рис. 110).

**Задача 4.** Три группы осветительных ламп мощностью P=100 Вт каждая с номинальным напряжением Uном=220 В соединены по схеме «звезда» с нейтральным проводом. При этом в фазе А включено параллельно n1=6 ламп, в фазе В – n2=4 лампы, в фазе С - n3=2 лампы. Линейное симметричное напряжение источника питания Uл=380 В.

*N*

*Uф*

*Uф*

*Uф*

*UЛ*

*UЛ*

*A*

*B*

*C*

*R3*

*Ih*

*R2*

*R1*

*Rh*

*Rзм*

*UЛ*

**Рис. 110**

Определить фазные сопротивления ZФ и фазные токи Iф потребителя электроэнергии. Построить векторную диаграмму токов и напряжений, определить ток IN в нейтральном проводе (Рис. 111).

**Задача 5.** Определить ток трехфазного К.З. на выводах генератора. Sном= 15.

**Задача 6.** Определить токи в линии до и после обрыва нейтрального провода с замыканием в фазе а) А, б) В. Построить векторные диаграммы, если  Ом,  Ом,  Ом,  В (Рис. 112).

*C*

*B*

*A*

*N*

*n*

*a*

*b*

*c*

*IA*

*Uл*

*IN*

*IB*

*IC*

**Рис. 111**

**Задача 7.**  Ом,  Ом,  Ом (Рис. 113). Определить токи в линии до и после обрыва линейного провода В, построить векторные диаграммы, при В, при  В.

**Задача 8.** По условию задачи 7 найти потребляемую приемником мощность двумя способами: по показаниям двух ваттметров и по мощности каждой фазы.

**Задача 9.** Определить токи в линии и построить векторную диаграмму, если  Ом,  Ом,  Ом,  В,  Ом (Рис. 114).

**Задача 10**. Определить фазные и линейные токи до и после обрыва нагрузки в фазах AB;

BC; CA, при условии, что  Ом,  Ом,  Ом,  В (Рис. 115).

**Задача 11.** По условию задачи 10 определить суммарную активную мощность нагрузки при помощи двух ваттметров.

**Задача 12.** Определить токи в линии, если  Ом,  Ом,  Ом,  Ом,  (Рис. 116).

**Задача 13.** Доказать, что данные схемы можно использовать в качестве фазоуказателя.

 Ом,  Ом,  Ом,  (Рис. 117).

ZA

ZB

ZC

A

B

C

N

**Рис. 112**

ZA

ZB

ZC

A

B

C

**Рис. 113**

ZA

ZB

ZC

A

B

C

N

ZN

ZAB

ZBC

ZCA

B

C

А

**Рис. 114 Рис. 115**

ZAB

ZBC

ZCA

A

ZA

ZB

ZC

B

C

**Рис. 116**

ZA

ZB

ZC

A

B

C

ZA

ZB

ZC

A

B

C

**Рис. 117**

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ**

В трёхфазную сеть большой мощности включены однофазные и трёхфазные приёмники. По указанным в таблице их параметрам выполнить следующее:

1. Составить схему включения приёмников и ваттметров для измерения суммарной активной мощности всех приёмников.

2. Определить сопротивление элементов схемы замещения приёмников.

3. Определить фазные и линейные токи приёмников.

4. Построить в масштабе на комплексной плоскости совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений.

5. Определить показания ваттметров.

6. Соединить однофазные приёмники звездой без нулевого провода и рассчитать в них токи.

7. Построить в масштабе на комплексной плоскости совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений приёмников.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 3-фазный симметричный приемник №4 | Род нагрузки | 23 | емк | инд | инд | инд | емк | емк | емк | емк |  | инд | инд |  | инд | емк |  | емк | инд |
|  | 22 | 0,85 | 0,78 | 0,95 | 0,87 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1 | 0,85 | 0,5 | 1 | 0 | 0,85 | 1 | 0 | 0,7 |
|  | 21 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 36 |  |  | 26 |  |
|  | 20 | 12 | 62 | 45 | 7 | 57 | 20 | 10 | 11 | 9 | 14 | 45 | 15 |  | 14 | 8 |  | 32 |
|  | 19 | 380 | 220 | 220 | 127 | 380 | 220 | 220 | 220 | 127 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| Однофазный приемник №3 | Род нагрузки | 18 | инд | емк |  | инд | инд | инд | емк |  | емк | инд |  | емк | инд | инд | емк | емк | емк |
|  | 17 | 0,7 | 0 | 1 | 0,25 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 1 | 0,7 | 0,7 | 1 | 0,8 | 0 | 0,7 | 0,2 | 0 | 0,85 |
|  | 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 12 |  |  | 12 |  |
|  | 15 | 25 | 8 | 16 | 30 | 20 | 11 | 10 | 7 | 4 | 9 | 15 | 8 |  | 9 | 4 |  | 5 |
|  | 14 | 380 | 127 | 127 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 |
| Однофазный приемник №2 | Род нагрузки | 13 |  |  | инд |  |  | инд |  | инд | инд | инд | инд | емк | емк |  |  | емк | инд |
|  | 12 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0,7 | 1 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0 | 0,6 | 0,6 | 1 | 1 | 0,6 | 0 |
|  | 11 |  |  | 11 |  |  |  |  |  |  |  | 7 |  |  |  |  |  | 4 |
|  | 10 | 18 | 14 |  | 20 | 15 | 11 | 15 | 3 | 7 | 7 |  | 5 | 10 | 2 | 12 | 10 |  |
|  | 9 | 380 | 127 | 127 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 |
| Однофазный приемник №1 | Род нагрузки | 8 | емк | инд | емк |  | емк |  | инд | емк | емк |  | емк |  |  | емк | инд |  |  |
|  | 7 | 0 | 0,8 | 0,92 | 1 | 0 | 1 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 1 | 0,8 | 1 | 1 | 0,8 | 0,8 | 1 | 1 |
|  | 6 | 0,9 |  |  |  | 5 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 5 |  | 6 | 15 | 12 |  | 10 | 20 | 5 | 5 | 6 | 10 | 3 | 15 | 3 | 10 | 15 | 12 |
|  | 4 | 220 | 127 | 127 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 |
| Напряжение в сети, В | | 3 | 380 | 127 | 220 | 220 | 380 | 380 | 220 | 220 | 220 | 380 | 380 | 220 | 380 | 220 | 380 | 380 | 380 |
| Количество проводов | | 2 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Номер варианта | | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 23 | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд |
| 22 | 0,75 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0,85 | 0,52 | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,6 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,4 | 1 | 0 |
| 21 |  |  | 20 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 30 |
| 20 | 15 | 92 |  | 42 | 12 | 8 | 34 | 16 | 2 | 15 | 10 | 10 | 40 | 20 | 7 | 24 | 17 | 9 | 5 | 10 | 6 | 7 | 12 |  |
| 19 | 127 | 220 | 220 | 220 | 220 | 127 | 127 | 220 | 127 | 380 | 127 | 380 | 220 | 220 | 127 | 380 | 220 | 220 | 220 | 127 | 380 | 220 | 127 | 220 |
| 18 | емк |  |  | инд | емк | емк | емк | инд | емк | инд |  | инд | емк |  | инд | инд | инд | емк |  | инд | емк |  | емк | инд |
| 17 | 0,8 | 1 | 1 | 0,87 | 0,7 | 0 | 0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 1 | 0,6 | 0 | 1 | 0,3 | 0,9 | 0,6 | 0,5 | 1 | 0,8 | 0,7 | 1 | 0,7 | 0 |
| 16 |  |  |  |  |  | 4 | 15 |  |  |  |  |  | 10 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 10 |
| 15 | 7 | 14 | 16 | 30 | 18 |  |  | 5 | 14 | 6 | 17 | 14 |  | 10 | 16 | 8 | 10 | 7 | 9 | 6 | 9 | 7 | 5 |  |
| 14 | 220 | 220 | 380 | 220 | 380 | 127 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 380 | 127 | 127 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 |
| 13 | емк | емк | инд | емк | инд | емк | емк | емк |  | емк | инд |  |  | инд |  |  | инд |  | инд | емк | инд | инд | емк | емк |
| 12 | 0 | 0 | 0,75 | 0,8 | 0 | 0,8 | 0,4 | 0 | 1 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0 | 0,7 | 0,5 |
| 11 | 4 | 12 |  |  | 13 |  |  | 4 |  |  |  |  |  | 8 |  |  |  |  |  |  |  | 5 |  |  |
| 10 |  |  | 16 | 2 |  | 15 | 18 |  | 12 | 5 | 12 | 12 | 10 |  | 14 | 12 | 16 | 7 | 3 | 5 | 4 |  | 6 | 7 |
| 9 | 220 | 220 | 380 | 220 | 380 | 127 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 380 | 127 | 127 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 |
| 8 |  | инд | емк | инд | инд |  | инд |  |  |  |  | емк | инд | емк |  | емк | емк | инд | емк | инд |  | емк |  |  |
| 7 | 1 | 0,85 | 0,75 | 0 | 0,87 | 1 | 0,6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,9 | 1 | 0 | 0,7 | 0,6 | 0,9 | 1 | 0,7 | 1 | 1 |
| 6 |  |  |  | 12 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 3 |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 | 4 | 10 | 16 |  | 9 | 3 | 10 | 1 | 5 | 4 | 7 | 10 | 6 | 14 | 16 | 6 |  | 15 | 4 | 4 | 6 | 9 | 4 | 6 |
| 4 | 220 | 220 | 380 | 220 | 380 | 127 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 380 | 127 | 127 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 |
| 3 | 220 | 220 | 380 | 380 | 380 | 220 | 220 | 220 | 220 | 380 | 220 | 380 | 220 | 220 | 220 | 380 | 380 | 220 | 220 | 220 | 380 | 380 | 220 | 380 |
| 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 |
| 1 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 3-фазный симметричный приемник №4 | Род нагрузки | 23 | инд | инд | емк | емк |  | инд | емк | инд | емк |  | инд | емк | инд | емк | инд | емк | инд | инд |
|  | 22 | 0,7 | 0,7 | 0,4 | 0,8 | 1 | 0,9 | 0 | 0,8 | 0,7 | 1 | 0,7 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,9 |
|  | 21 |  |  |  |  |  |  | 27 | 60 | 40 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 20 | 10 | 12 | 18 | 12 | 6 | 8 |  | 1 | 2 | 16 | 40 | 17 | 4 | 14 | 4 | 16 | 60 | 50 |
|  | 19 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 220 | 127 | 220 | 127 | 380 | 127 | 380 | 220 | 220 |
| Однофазный приемник №3 | Род нагрузки | 18 | емк | емк |  | инд | емк | емк | емк |  | инд | емк | емк | инд | емк | инд |  | инд | емк |  |
|  | 17 | 0,7 | 0,6 | 1 | 0,7 | 0,3 | 0 | 0 | 1 | 0,7 | 0,6 | 0 | 0,7 | 0,9 | 0,6 | 1 | 0,7 | 0 | 1 |
|  | 16 |  |  |  |  |  | 3 | 12 |  |  |  | 16 |  |  |  |  |  | 10 |  |
|  | 15 | 3 | 7 | 19 | 8 | 4 |  |  | 14 | 30 | 12 |  | 6 | 16 | 4 | 14 | 7 |  | 20 |
|  | 14 | 380 | 220 | 380 | 127 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 380 | 127 | 127 |
| Однофазный приемник №2 | Род нагрузки | 13 | инд | емк | инд |  |  | емк | емк | емк | емк | инд | емк | емк |  | емк | инд | инд |  | инд |
|  | 12 | 0 | 0 | 0,8 | 1 | 1 | 0,8 | 0,7 | 0 | 0,6 | 0 | 0,5 | 0 | 1 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 1 | 0 |
|  | 11 | 4 | 4 |  |  |  |  |  | 12 |  | 14 |  | 4 |  |  |  |  |  | 13 |
|  | 10 |  |  | 17 | 4 | 10 | 15 | 9 |  | 4 |  | 16 |  | 10 | 6 | 10 | 40 | 17 |  |
|  | 9 | 380 | 220 | 380 | 127 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 380 | 127 | 127 |
| Однофазный приемник №1 | Род нагрузки | 8 |  |  | емк | емк | инд |  |  | инд | инд | инд | инд |  |  |  |  | емк | инд | емк |
|  | 7 | 1 | 1 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1 | 1 | 0,8 | 0 | 0,8 | 0,6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,7 | 0,6 | 0,9 |
|  | 6 |  |  |  |  |  |  |  |  | 10 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 5 | 12 | 4 | 16 | 5 | 7 | 3 | 12 | 10 |  | 6 | 7 | 2 | 6 | 4 | 7 | 14 | 10 | 19 |
|  | 4 | 380 | 220 | 380 | 127 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 380 | 127 | 127 |
| Напряжение в сети, В | | 3 | 380 | 220 | 380 | 220 | 380 | 220 | 380 | 220 | 380 | 380 | 220 | 220 | 220 | 380 | 220 | 380 | 220 | 220 |
| Количество проводов | | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| Номер варианта | | 1 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 23 |  | емк | емк | емк | емк |  | инд | инд | инд | инд | инд |  | инд | инд | инд |  |  |  |  | инд | емк | емк | емк | инд |
| 22 | 1 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,6 | 1 | 0,9 | 0,6 | 0,7 | 0 | 0,9 | 1 | 0 | 0,7 | 0,8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,9 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0 |
| 21 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 38 |  |  | 9 |  |  |  | 20 |  |  |  |  |  |  | 6 |
| 20 | 10 | 20 | 24 | 14 | 15 | 12 | 18 | 45 | 12 |  | 17 | 14 |  | 40 | 14 | 96 |  | 42 | 41 | 4 | 7 | 9 | 14 |  |
| 19 | 127 | 380 | 220 | 220 | 220 | 127 | 380 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 | 220 | 220 | 127 | 127 | 220 | 127 | 380 |
| 18 | инд | инд | инд | емк |  | инд | емк |  | емк | инд | инд | емк | емк | емк | емк |  |  | инд | инд | инд |  | инд | инд |  |
| 17 | 0,3 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 1 | 0,6 | 0,7 | 1 | 0,8 | 0 | 0,7 | 0,3 | 0 | 0,9 | 0,6 | 1 | 1 | 0,7 | 0,4 | 0 | 1 | 0,7 | 0,3 | 1 |
| 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 14 |  |  | 12 |  |  |  |  |  |  | 8 |  |  |  |  |
| 15 | 36 | 24 | 14 | 14 | 10 | 7 | 12 | 16 | 12 |  | 12 | 6 |  | 9 | 7 | 16 | 19 | 4 | 6 |  | 6 | 5 | 6 | 5 |
| 14 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 380 | 220 | 380 | 127 | 220 | 127 | 220 | 220 |
| 13 |  |  | инд |  | инд | инд | инд | инд | емк | емк |  |  | емк | инд | емк | емк | емк |  | емк | инд | инд |  |  | емк |
| 12 | 1 | 1 | 0,6 | 1 | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 0 | 0,7 | 0,6 | 1 | 1 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,6 | 1 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 1 | 1 | 0,7 |
| 11 |  |  |  |  |  |  |  | 10 |  |  |  |  |  | 6 | 7 | 12 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10 | 24 | 19 | 12 | 16 | 6 | 10 | 6 |  | 8 | 9 | 6 | 4 | 14 |  |  |  | 19 | 4 | 5 | 8 | 9 | 6 | 10 | 5 |
| 9 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 220 | 127 | 220 | 220 |
| 8 | инд | инд | инд | инд | емк | емк |  | емк |  |  | емк | инд |  |  |  | инд | емк | инд | инд |  | емк | инд | инд | инд |
| 7 | 0,9 | 0 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,5 | 1 | 0,7 | 1 | 1 | 0,8 | 0,7 | 1 | 1 | 1 | 0,9 | 0,8 | 0 | 0,7 | 1 | 0,6 | 0,3 | 0,9 | 0,6 |
| 6 |  | 7 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 14 |  |  |  |  |  |  |
| 5 | 17 |  | 14 | 20 | 9 | 10 | 9 | 14 | 6 | 16 | 6 | 14 | 16 | 12 | 6 | 14 | 16 |  | 12 | 6 | 7 | 6 | 10 | 12 |
| 4 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 380 | 220 | 380 | 127 | 220 | 127 | 220 | 220 |
| 3 | 220 | 380 | 380 | 220 | 220 | 220 | 380 | 380 | 220 | 380 | 220 | 380 | 380 | 380 | 220 | 220 | 380 | 380 | 380 | 220 | 220 | 220 | 220 | 380 |
| 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 |
| 1 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 3-фазный симметричный приемник №4 | Род нагрузки | 23 | инд | инд | емк | инд | емк | инд |  |  | емк |  |  | инд | емк | инд |  | инд | емк |
|  | 22 | 0,3 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,4 | 0 | 1 | 1 | 0,7 | 1 | 1 | 0,7 | 0 | 0,5 | 1 | 0,2 | 0,9 |
|  | 21 |  |  |  |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  | 9 |  |  |  |  |
|  | 20 | 7 | 15 | 7 | 12 | 18 |  | 17 | 42 | 41 | 42 | 62 | 4 |  | 10 | 12 | 24 | 41 |
|  | 19 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 380 | 220 | 220 | 220 | 127 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 380 |
| Однофазный приемник №3 | Род нагрузки | 18 |  |  | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд | инд |  |  | инд | емк | инд | инд | емк |
|  | 17 | 1 | 1 | 0,4 | 0,2 | 0,9 | 0,1 | 0,7 | 0,1 | 0,4 | 0,5 | 1 | 1 | 0,7 | 0,8 | 0 | 0,4 | 0,2 |
|  | 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 20 |  |  |
|  | 15 | 10 | 14 | 12 | 7 | 12 | 10 | 14 | 24 | 15 | 24 | 7 | 12 | 16 | 19 |  | 21 | 26 |
|  | 14 | 220 | 380 | 127 | 127 | 220 | 380 | 380 | 220 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 380 | 127 | 220 | 220 |
| Однофазный приемник №2 | Род нагрузки | 13 | инд | емк | инд |  |  | инд | емк | емк | емк | инд | емк | емк | инд | инд | инд | емк | емк |
|  | 12 | 0,3 | 0,7 | 0,7 | 1 | 1 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,5 |
|  | 11 | 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 21 |  | 4 |  |
|  | 10 |  | 10 | 7 | 5 | 6 | 7 | 19 | 15 | 24 | 41 | 14 | 21 | 15 |  | 12 |  | 10 |
|  | 9 | 127 | 380 | 127 | 127 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 |
| Однофазный приемник №1 | Род нагрузки | 8 | емк | инд | емк | инд | емк | емк |  | емк | инд | емк | емк | емк | инд | инд | инд | емк | емк |
|  | 7 | 0,5 | 0 | 0,3 | 0,4 | 0 | 0,1 | 1 | 0,6 | 0,7 | 0 | 0,7 | 0,2 | 0,3 | 0,9 | 0,6 | 0,7 | 0,4 |
|  | 6 |  | 4 |  |  | 10 |  |  |  |  | 12 |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 5 | 6 |  | 6 | 14 |  | 12 | 17 | 4 | 16 |  | 17 | 24 | 24 | 16 | 19 | 18 | 2 |
|  | 4 | 220 | 380 | 127 | 127 | 220 | 380 | 380 | 220 | 127 | 220 | 220 | 380 | 220 | 220 | 127 | 220 | 220 |
| Напряжение в сети, В | | 3 | 220 | 380 | 220 | 220 | 220 | 380 | 380 | 220 | 220 | 220 | 380 | 380 | 220 | 380 | 220 | 380 | 380 |
| Количество проводов | | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Номер варианта | | 1 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |

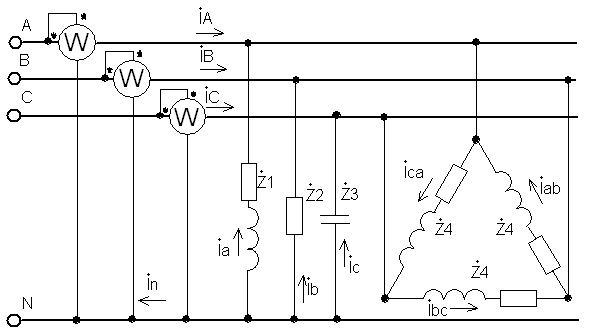
**ПРИМЕРНЫЙ ВАРИАНТ РАСЧЕТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

*Рассмотрим для примера решение варианта №2*

Исходные данные

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Сеть 4-пров.  *U*сети = 220 В | Однофаз-  ный приёмник  №1 | Однофаз-  ный  приёмник  №2 | Однофаз-  ный  приёмник  №3 | Трёхфаз-  ный  приёмник  №4 |
| *U*ном,В | 127 | 127 | 127 | 220 |
| *Р*ном, кВт | 6 | 14 | - | 62 |
| *Q*нм, квар | - | - | 8 | - |
| cos ϕном | 0,8 | 1 | 0 | 0,78 |
| Характер | инд | акт | емк | инд |

Схема включения приемников и ваттметров для измерения суммарной активной мощности всех приемников имеет следующий вид (рис. 118).



**Рис. 118**

Определим сопротивление элементов схемы замещения приёмников

*Z1*==2,151 Ом φ1=arcos(cos φ1ном)=37°;

*Z*2==1,152 Ом φ2=arcos(cos φ2ном)=0°;

*Z3==2,016 Ом* φ3=arcos(cos φ3ном)=-90°;

**Z4==1,827 Ом φ4=arcos(cos φ1ном)=39°;

в комплексной форме

=2,151*еj*37°=1,72+*j*1,29 Ом ;

=1,152*еj*0°=1,152 Ом ;

=2,151*е-j90*°=-*j2*,016 Ом ;

=1,827*еj*39°=1,425+*j*1,143 Ом;

Определим фазные и линейные токи приемников

=127 В ;

=127*e-*j120°= -63,5-j109,985 B ;

=127*ej*120°= 63,5+*j*109,985 B ;

=220*ej*30°=-190,526+*j*110 B ;

=220*e-j*90°= -*j*220 B ;

=220*ej*150°=-190,526+*j*110 B ;

==59,055*e-j*37°=47,244- *j*35,433 A ;

==110,236*e-j150*°= -55,118- *j95*,467 A ;

==62,992*e-j150*°= -54,553- *j*31,496 A ;

==120,435*e-j9*°=119,037- *j*18,299 A ;

==120,435*e-j127*°= -68,182- *j*90,909 A ;

==120,435*e-j111*°= -43,671- *j*112,238 A ;

Линейные токи

=--= -209,952+*j*165,971=267,63*ej*142° A ;

=--= 249,521+*j*171,108=302,553*ej*34° A ;

=--= 22,858-*j*174,682=176,171*e - j*34° A ;

Ток нулевого провода

=++= -62,427-*j*162,397=173,982*e- j111*° A ;

Построим на комплексной плоскости в масштабе совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений рис. 120.

Мощность, показываемая ваттметрами

*Р1*=Re()=26 664 Вт ;

*Р2*=Re()=34 664 Вт ;

*Р3*=Re()=20 664 Вт ;

Суммарная потребляемая мощность

*P*=*P1+P2+P3*=81 992=82 кВт ;

Согласно условию

*P*=6+14+0+62=92 кВт .

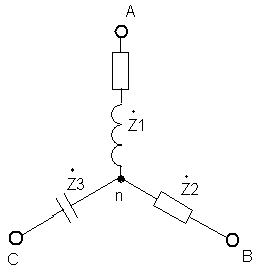
Соединить однофазные приёмники звездой без нулевого провода (рис. 119) и рассчитать в них токи. Построить в масштабе на комплексной плоскости совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений приёмников

Определим напряжение смещения нейтрали

==138,207*e*-*j*121°= -71,086-*j*118,525 B

Определим напряжение в фазах нагрузки

= -=198,086+*j*118,525=230,838*ej*31° B;

= -=7,586+*j*8,539=11,422*ej48*° B;

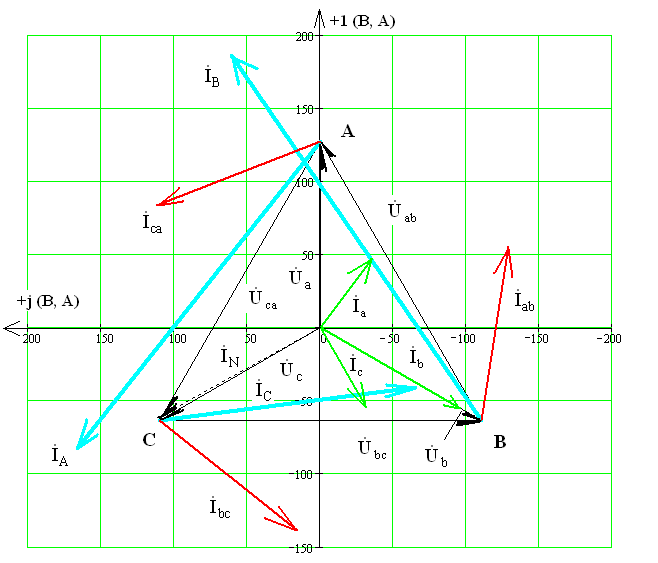
**Рис. 119**

= -=7,586+*j22*8,51=228,636*ej88*° B;

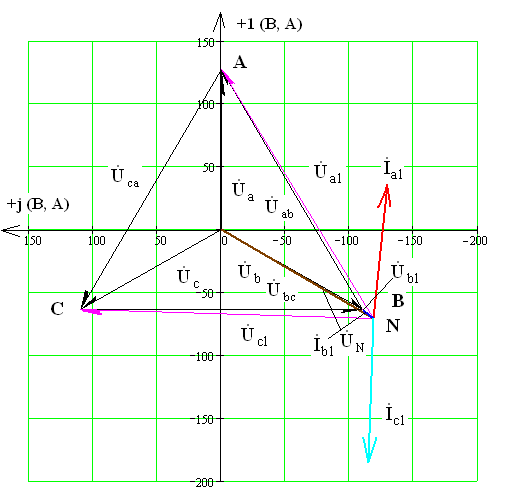
Определим токи в фазах нагрузки

==107,34*e*-*j*6°=106,757-*j*11,175 A ; ==9,915*e*48°=6,585+*j*7,412 A ;

==113,404*e j17*8°=-113,341+*j3*,763 A ;

Построим совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений, для данного случая (рис. 121).

**Рис. 120.** *Векторная диаграмма токов и напряжений.*

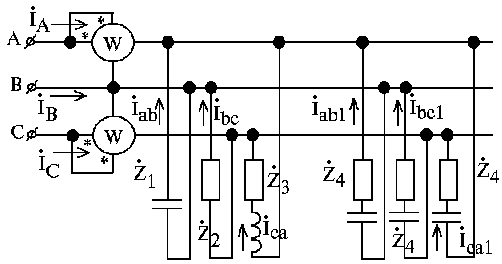


**Рис. 121.** *Векторная диаграмма токов и напряжений.*

*Исходные данные для варианта №5*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Сеть  3-пров.  =380 В | Однофаз-  ный  приёмник  №1 | Однофаз-  ный  приёмник  №2 | Однофаз-  ный  приёмник  №3 | Трёхфаз-  ный  приёмник  №4 |
| *,* В | 380 | 380 | 380 | 380 |
| ,кВт | - | 15 | 20 | 57 |
| *Q*нм, квар | 5 | - | - | - |
| cos ϕном | 0 | 1 | 0,7 | 0,8 |
| Характер | емк | акт | инд | емк |

Схема включения приемников и ваттметров для измерения суммарной активной мощности всех приемников имеет следующий вид (рис. 122).

**Рис. 122**

Определим сопротивление элементов схемы замещения приёмников

в комплексной форме



Определим фазные и линейные токи приемников



линейные токи:



проверка



Построим на комплексной плоскости в масштабе совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 124).

Мощность, показываемая ваттметрами

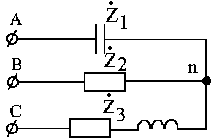


Суммарная потребляемая мощность



Согласно условию



Соединить однофазные приёмники звездой без нулевого провода (рис. 123) и рассчитать в них токи. Построить в масштабе на комплексной плоскости совмещённую векторную диаграмму токов и напряжений приёмников

**Рис. 123**

Определим напряжение смещения нейтрали



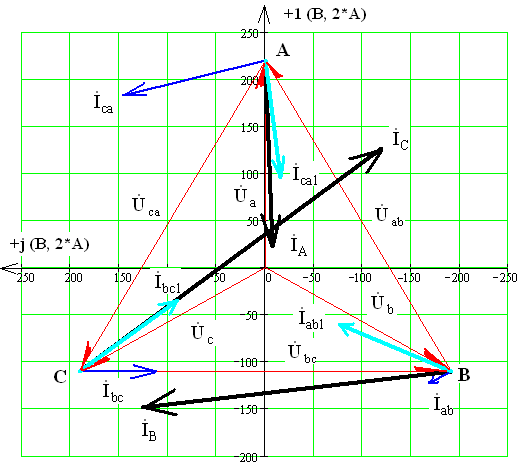
Определим напряжение в фазах нагрузки



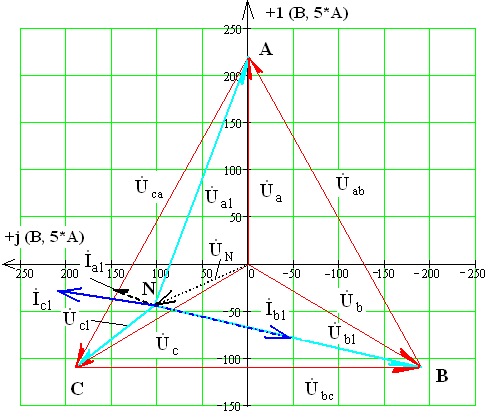


Определим токи в фазах нагрузки

Построим совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений для данного случая (рис. 125).



**Рис. 124.** *Совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений.*



**Рис. 125.** *Совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений*

**Содержание**

ВВЕДЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ……………………………………………….4

2. СИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ……...……………………….6

3. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В СИММЕТРИЧНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ…………………..9

4. НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ………..…………...…….11

5. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ…………...…………………………...13

6. ТРЕХФАЗНОЕ ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ…………...……………………….15

7. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ…………..………………………18

8. МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ РАСЧЁТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМ………………………………………………………………………..…19

9. ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В МЕСТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ…………………………………………………………………………………………..28

10. РАБОТА РАЗЛИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ СОЕДИНЕННЫХ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА………………………………………………………………………………..36

11. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ АВАРИЙ И ОТКАЗОВ В РАБОТЕ ОБОРУДОВАНИЯ…………...52

12.ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ………………………………………………..………………56

13. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ………………...…………..………….94

14. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ …………………...………………….97

15. ПРИМЕРНЫЙ ВАРИАНТ РАСЧЕТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ ………………..….………..103