Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Пермский государственный технический университет»

Т.А. Кузнецова, Е.А. Кулютникова, И.Б. Кухарчук

**РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

## Контрольные задания и методические указания

к самостоятельной работе

по курсам «Основы теории цепей»,

«Общая электротехника»,

«Теоретические основы электротехники»

**Издательство**

**Пермского государственного технического университета**

**2010**

**Введение**

Для передачи и распределения электроэнергии в большинстве случаев используется трехфазная система энергоснабжения, т.е. система, в которой действуют три одинаковые по амплитуде синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, создаваемые одним источником энергии и сдвинутые друг относительно друга по фазе на . Такая система была изобретена в 1891 г. выдающимся русским инженерном М.О. Доливо-Добровольским, разработавшим все ее практические приложения, включая трехфазный трансформатор и асинхронный двигатель.

В трехфазной системе технико-экономические преимущества синусоидальных токов проявляются в наибольшей степени (снижается расход проводниковых материалов в линии электропередач, возрастает КПД устройств и т.п.). Поэтому современные энергетические системы выполняют как трехфазные системы генераторов, линий электропередач и трансформаторов, обеспечивающих трехфазным электропитанием промышленные потребители, которые, в основном, являются трехфазными, например: асинхронные и синхронные двигатели, мощные электрические печи, электромагниты и т.п. Однофазные потребители также получают питание от трехфазных сетей.

Для эффективной эксплуатации таких сетей необходимо знать их возможности и ограничения, существующие при подключении к ним потребителей.

Цель самостоятельной работы студентов по данной теме – изучение основных свойств трехфазных цепей и закономерностей распределения линейных и фазных токов и напряжений, исследование схем подключения трехфазных и однофазных потребителей к трехфазной системе электропитания в рабочих и аварийных режимах.**ОСНОВНЫЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Трехфазные цепи являются одним из видов цепей синусоидального тока, и, следовательно, для них в полной мере применимы методы расчета и анализа цепей в символической форме. Анализ трехфазных цепей удобно осуществлять с использованием векторных диаграмм, позволяющих достаточно просто определять фазовые сдвиги между токами и напряжениями. Однако существующая определенная специфика трехфазных цепей вносит характерные особенности в их расчет.

Основным признаком классификации трехфазных систем ЭДС, напряжений и токов является их симметричность.

**Симметричные трехфазные системы**

Условиями симметричности является равенство мгновенных (комплексных) значений ЭДС фаз генератора. Мгновенные и комплексные значения ЭДС трехфазного симметричного генератора имеют вид:

 (1)

где *a* – оператор поворота, причем

 и т.д.

Условием симметричности трехфазного приемника является равенство комплексных сопротивлений соответствующих фаз: т.е. если  (фазы нагрузки соединены звездой, рис. 1, *а*) или  (фазы нагрузки соединены треугольником, см. рис. 1, *б*). В противном случае приемник является несимметричным.

Существуют трехфазные системы, в которых нулевые точки генератора *О* и нагрузки *о*1 соединяются проводом с сопротивлением  или  (см. рис. 1, *в*). Такой провод называют нулевым или нейтральным проводом.



Если к симметричной трехфазной цепи приложена симметричная трехфазная система напряжений генератора, то в ней будет действовать симметричная система токов. Такой режим работы трехфазной цепи называется симметричным. В этом режиме токи и напряжения соответствующих фаз равны по модулю и сдвинуты по фазе на . Расчет таких цепей проводится для одной (базовой) фазы, в качестве которой обычно принимают фазу *А*. При этом соответствующие величины в других фазах получают формальным добавлением к аргументу переменной фазы *А*  фазового сдвига  при сохранении неизменным ее модуля.

Для симметричной трехфазной системы при соединении нагрузки звездой (см. рис. 1, *а*) существуют следующие зависимости между действующими значениями линейных и фазных напряжений и токов:

, (2)

между комплексными значениями токов фаз

; ; . (3)

При наличии нейтрального провода ток в этом проводе определяется по первому закону Кирхгофа

, (4)

при отсутствии нейтрального провода

. (5)

Для симметричной трехфазной системы при соединении нагрузки треугольником (см. рис. 1, *б*) действующие значения линейных и фазных напряжений и токов связаны соотношениями:

, (6)

комплексные значения токов фаз

; ; , (7)

комплексные значения линейных токов

 (8)

Комплексная, полная, активная и реактивная мощности в симметричной трехфазной системе определяются соответственно по указанным ниже формулам

для схем «звезда – звезда»

 (9)

для схем «треугольник – треугольник»

 (10)

**Несимметричные трехфазные системы**

Если хотя бы одно из условий симметрии не выполняется, трехфазная цепь работает в несимметричном режиме. Такие режимы при подключении статической нагрузки рассчитываются любым из известных методов расчета линейных электрических цепей с источниками гармонических воздействий. Как правило, падением напряжения на внутреннем сопротивлении генератора пренебрегают и фазные напряжения генератора заменяются соответствующими идеальными источниками ЭДС. Поскольку в трехфазных цепях, помимо значений токов, обычно представляют интерес также величины потенциалов узлов, в большинстве случаев для расчета применяется метод узловых потенциалов.

Если заданны линейные напряжения, удобно рассчитывать трехфазные цепи при соединении фаз нагрузки в *треугольни*к. Пусть в схеме (см. рис. 1, *б*) нагрузка несимметрична и. Тогда при известных комплексах линейных напряжений в соответствии с законом Ома фазные токи

; ; . (11)

По найденным фазным токам приемника на основании первого закона Кирхгофа определяются линейные токи:

. (12)

Если к трехфазному генератору, фазы которого соединены *звездой* (рис. 2), подключен приемник электрической энергии, фазы которого также соединены звездой, то в случае несимметричной трехфазной системы между нейтральными (нулевыми) точками приемника и генератора возникает напряжение смещения нейтрали

 , (13)

здесь  – комплексы ЭДС соответствующих фаз генератора; – комплексные проводимости соответствующих фаз нагрузки и нейтрального (нулевого) провода.



Напряжение на фазах нагрузки

 (14)

Токи в фазах

 (15)

Ток нейтрального провода

 . (16)

При расчете трехфазной системы «звезда – звезда с нейтральным проводом с сопротивлением » нет необходимости рассчитывать напряжение смещения нейтрали, поскольку . В этом случае трехфазную систему можно рассматривать как совокупность трех независимых контуров и рассчитывать каждый контур известными методами расчета цепей синусоидального тока. Целесообразно использовать векторные диаграммы при расчете таких цепей.

В случае отсутствия нейтрального провода в формуле (13) проводимость нейтрального провода  принимают равной нулю. При этом, если генератор симметричный, а симметрия нагрузки нарушена сопротивлением нагрузки, подключенном в одной из фаз (например, ), удобно для определения напряжения смещения нейтрали воспользоваться формулой:

, (17)

для оставшихся случаев  и  соответственно

; . (18)

Если нагрузка соединена звездой без нейтрального провода и известны линейные напряжения , то фазные напряжения нагрузки находятся по формулам:

. (19)

Для любой трехфазной системы сумма комплексных значений линейных напряжений равна нулю:

. (20)**ЗАДАНИЕ**

 1. По заданному номеру варианта изобразить цепь, подлежащую расчету, выписать значения параметров элементов цепи.

 2. Рассчитать фазное и линейное напряжение генератора, ток, фазное и линейное напряжения нагрузки, мощность, вырабатываемую генератором и расходуемую в нагрузке в

а) симметричном режиме;

б) несимметричном режиме.

 3. Рассчитать потенциалы всех точек и построить совмещенную топографическую диаграмму потенциалов, принимая потенциал нейтральной точки генератора равным нулю, и векторную диаграмму токов для симметричного и несимметричного режимов.

 5. Определить аналитически и по топографической диаграмме напряжение между двумя заданными точками, записать мгновенное значение этого напряжения.

 7. Составить уравнение баланса активных и реактивных мощностей генератора и нагрузки, проверить его выполнимость для симметричного и несимметричного режимов.

**Выбор варианта и параметров элементов цепи**

 1. По заданному номеру варианта изобразить цепь (рис. 3), подлежащую расчету, выписать значения параметров элементов.

2. В качестве источника задан симметричный трехфазный генератор, обмотки которого соединены звездой с прямой последовательностью чередования фаз. Величина ЭДС фазы А  для четных вариантов выбирается равной 127 В, для нечетных вариантов – 220 В. Численные значения комплексных сопротивлений обмоток генератора в Омах рассчитываются по следующей формуле:

,

где  − 8

  − 2

Например, для варианта № 35 комплексное сопротивление обмоток генератора

 Ом,

для варианта № 53

 Ом,

для варианта № 88

 Ом.

3. Граф схемы, режим нейтрали, несимметричный режим и определяемое напряжение заданы в таблице 1.

4. Численные значения комплексных сопротивлений линии определяются по формуле:



где *B*1 – первая цифра номера варианта (если число – однозначное, то  равно номеру варианта).

5. Численные значения комплексных сопротивлений фазы определяются по формуле:



Табл. 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | граф | , Ом | несимметричный режим | напря-жение |
| 1, 34, 67 | *а* | 0 | обрыв фазы *а* | *unf* |
| 2, 35, 68 | *б* | − | обрыв фазы *ab* | *umf* |
| 3, 36, 69 | *а* | 10 | короткое замыкание фазы *а* | *ube* |
| 4, 37, 70 | *б* | − | обрыв линии *А* | *ued* |
| 5, 38, 71 | *а* | ∞ | обрыв фазы *b* | *umk* |
| 6, 39, 72 | *б* | − | обрыв фазы *bс* | *umd* |
| 7, 40, 73 | *а* |  | обрыв фазы *c* | *umn* |
| 8, 41, 74 | *б* | − | обрыв линии *B* | *ued* |
| 9, 42, 75 | *а* |  | обрыв  и  фазы *а* | *uAb* |
| 10, 43, 76 | *б* | − | обрыв фазы *сa* | *uAf* |
| 11, 44, 77 | *а* |  | обрыв  | *uOn* |
| 12, 45, 78 | *б* | − | обрыв линии *С* | *ueA* |
| 13, 46, 79 | *а* |  | обрыв  фазы *b* | *uAe* |
| 14, 47, 80 | *б* | − | обрыв  линии *Aa* | *uak* |
| 15, 48, 81 | *а* | 0 | обрыв  линии *Aa* | *unk* |
| 16, 49, 82 | *б* | − | обрыв  фазы *bс* | *umf* |
| 17, 50, 83 | *а* | 10 | обрыв  фазы *c* | *ube* |
| 18, 51, 84 | *б* | − | обрыв  линии *Bb* | *uae* |
| 19, 52, 85 | *а* | ∞ | короткое замыкание фазы *b* | *umb* |
| 20, 53, 86 | *б* | − | обрыв  фазы *ab* | *uak* |
| 21, 54, 87 | *а* |  | обрыв  и  линии *Bb* | *udc* |
| 22, 55, 88 | *б* | − | обрыв  в линии *Cc* | *ucd* |
| 23, 56, 89 | *а* |  | обрыв  и  фазы *b* | *ume* |
| 24, 57, 90 | *б* | − | обрыв  фазы *сa* | *udn* |
| 25, 58, 91 | *а* |  | короткое замыкание  линии *Cc* | *umd* |
| 26, 59, 92 | *б* | − | короткое замыкание  линии *Aa* | *uAk* |
| 27, 60, 93 | *а* |  | обрыв  и  фазы *b* | *ueA* |
| 28, 61, 94 | *б* | − | короткое замыкание  фазы *ab* | *udn* |
| 29, 62, 95 | *а* | 0 | короткое замыкание  линии *Bb* | *umk* |
| 30, 63, 96 | *б* | − | короткое замыкание  линии *Bb*  | *uBd* |
| 31, 64, 97 | *а* | ∞ | короткое замыкание фазы *c* | *umf* |
| 32, 65, 98 | *б* | − | короткое замыкание  фазы *bc* | *ume* |
| 33, 66, 99 | *а* | 10 | короткое замыкание  | *uOk* |

**ПРИМЕР РАСЧЕТА**

 *Дано*: к симметричному трехфазному генератору (рис. 4) с фазной ЭДС *E* = 220 В и внутренним сопротивлением  Ом через линию, сопротивление каждого провода которой  Ом, подключена симметричная нагрузка  Ом, соединенная звездой.

*Решение.* Запишем фазные ЭДС генератора в комплексном виде:

 В;  В;

 В.**Расчет симметричного режима**

Ввиду полной симметрии системы напряжение между нулевыми точками генератора и нагрузки равно нулю. Каждую фазу можно рассматривать независимо от других фаз и вести расчет по одной фазе, к примеру, фазе *А*.

Определим ток в фазе *А* по закону Ома (полагаем, что  В):

А.

Токи в фазах *В* и *С* соответственно

А;

А.

 Проверка:

.

 Фазные напряжения на зажимах генератора



и нагрузки

 Такие напряжения в других фазах сдвинуты соответственно на  и :



 Линейные напряжения на выводах генератора и нагрузки













 Активная мощность, вырабатываемая генератором

 Вт.

Мощность, расходуемая в нагрузке

 Вт.

 Составим баланс активной и реактивной мощностей генератора и нагрузки и проверим его выполнимость.

Комплексная мощность генератора

 ВА.

Активная мощность генератора  Вт, реактивная мощность −  *вар*.

Потребляемая активная мощность складывается из мощностей расхода на внутреннем сопротивлении генератора, сопротивлении линии и нагрузки:

 Вт,

реактивная мощность в элементах внутреннего сопротивления генератора, линии и приемника

*вар*.

Допускается расхождение баланса активных мощностей



и реактивных мощностей

.

 Поскольку баланс активных и реактивных мощностей выполняется, то расчет произведен верно. Построение топографической диаграммы

 Рассчитаем потенциалы всех точек схемы (см. рис. 4), приняв потенциал нейтральной точки генератора *O* равным нулю:

;

В;

В;





В;







В;







 Совмещенная векторная диаграмма токов и потенциальная диаграмма напряжений представлена на рис. 5.

Определим напряжение между точками *n* и *b*:



мгновенное значение напряжения

 В.

**Расчет несимметричного режима**

 Пусть несимметрия режима возникает вследствие короткого замыкания резистора в фазе *А*. В этом случае между нулевыми точками генератора и нагрузки возникает напряжение смещения нейтрали (12)

.

Для определения величины  вычислим комплексные проводимости фаз, помня о том, что комплексное сопротивление нагрузки фазы *А* равно Ом, сопротивления нагрузки фаз *B* и *C* Ом:

Сим;

Сим,

проводимость нейтрального провода .

Фазные ЭДС генератора в комплексном виде:

 В;  В;

 В.

Тогда

Токи всех фаз в соответствии с (14)

А;

А;

А;

Проверка показывает, что .

Напряжения на фазах нагрузки:

Напряжение на каждой фазе генератора







 Линейные напряжения на выводах генератора и нагрузки













Активная мощность, вырабатываемая генератором, складывается из активных мощностей каждой фазы генератора

.

Определим активную мощность каждой фазы генератора

 Вт;

 Вт;

 Вт.

 Тогда  Вт.

Мощность, расходуемая в нагрузке, равна сумме активных мощностей фаз *В* и *С*, т.к. в нагрузке фазы *А* отсутствует резистивное сопротивление:

 Вт.

Составим баланс активной и реактивной мощностей генератора и нагрузки и проверим его выполнимость.

Комплексная мощность генератора

 Активная мощность генератора  Вт, реактивная мощность −  *вар*.

Потребляемая активная мощность складывается из мощностей расхода на внутреннем сопротивлении фаз генератора, сопротивлений линии и нагрузки:

 Вт,

реактивная мощность в элементах внутреннего сопротивления генератора, линии и приемника каждой фазы

*вар*.

Допускается расхождение баланса активных мощностей



и реактивных мощностей

.

 Поскольку баланс активных и реактивных мощностей сходится, то расчет произведен верно.

Построение топографической диаграммы

 Рассчитаем потенциалы всех точек схемы (см. рис. 4), приняв потенциал нейтральной точки генератора *O* равным нулю:

;

В;

В;





В;







В;







Совмещенная векторная диаграмма токов и потенциальная диаграмма напряжений представлена на рис. 6.

Определим напряжение между точками *n* и *b*:



мгновенное значение напряжения

 В.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2000. – 504 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей: учебник / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. Касаткин А.С. Электротехника. Кн. 1 / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 240 с.
4. Кузнецова Т.А. Основы теории цепей: учебное пособие. Ч. 1 / Т.А. Кузнецова, Е.А. Кулютникова, А.А. Рябуха. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 227 с.