

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроснабжения



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

2017 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Расчет токов коротких замыканий с использованием ПЭВМ

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине
«Переходные процессы в электроэнергетических системах»
для студентов всех форм обучения направления подготовки
Электроэнергетика и электротехника

Курск 2017

Составитель канд. техн. наук, доцент В.Н. Алябьев
УДК 621.311
М 54

Рецензент:
Канд.техн.наук, доцент кафедры «Электроснабжения»
О.М.Ларин

Электромагнитные переходные процессы. Расчет токов коротких замыканий с использованием ЭВМ: Методические указания к лабораторным работам/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост. В.Н.Алябьев. Курск, 2017. 21 с.

Излагаются методические рекомендации по выполнению лабораторных работ на ПЭВМ. Исследуется ударный ток короткого замыкания; рассчитываются токи симметричных и несимметричных коротких замыканий с учетом факторов, влияющих на их уровень.

Предназначены для студентов всех форм обучения направления подготовки Электроэнергетика и электротехника.

Табл. 2 . Ил. 4 . Прилож. 2. Библиогр.: 4 назв.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. . Уч.-изд.л. . Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

ОБЩИЕ ПРАВИЛА РАБОТЫ НА ЭВМ

К работе на ЭВМ допускаются студенты, успешно прошедшие аттестацию и получившие допуск к работе в дисплейном классе.

Подготовка к работе:

1. Включить ЭВМ.
2. Включить печатающее устройство и заправить в него бумагу.
3. Убедиться, что загрузилась операционная система и ЭВМ готова к работе.
4. В указанном преподавателем каталоге найти соответствующую программу и запустить её.
5. Начать работу с программой. Работа ведется в режиме диалога пользователя с ЭВМ. Каждый ответ завершается нажатием клавиши «Enter». До нажатия клавиши «Enter» ответ можно исправить с помощью клавиш «Del» и «Backspace».

Одновременное нажатие клавиш верхнего регистра и «Print Screen» вызывает получение копии экрана на печатающем устройстве.

ПРАВИЛА ОХРАНЫ ТРУДА

1. Запрещается трогать во время работы ЭВМ кабели, соединяющие процессор и периферийные устройства.
2. Запрещается прикасаться к контактам разъемов ЭВМ.
3. В случае какой-либо неисправности запрещается самостоятельно производить ремонт любого вида. О неисправности сообщить преподавателю.
4. Не допускается производить действия, которые могут привести к механическому повреждению узлов ЭВМ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование ударного тока короткого замыкания

Цель работы: ознакомиться с причинами и условиями возникновения ударного тока короткого замыкания; исследовать факторы, влияющие на его величину.

Краткие методические указания

Исследование ударного тока короткого замыкания проводится на примере возникновения трехфазного короткого замыкания в простейшей неразветвленной цепи (рис. 1).

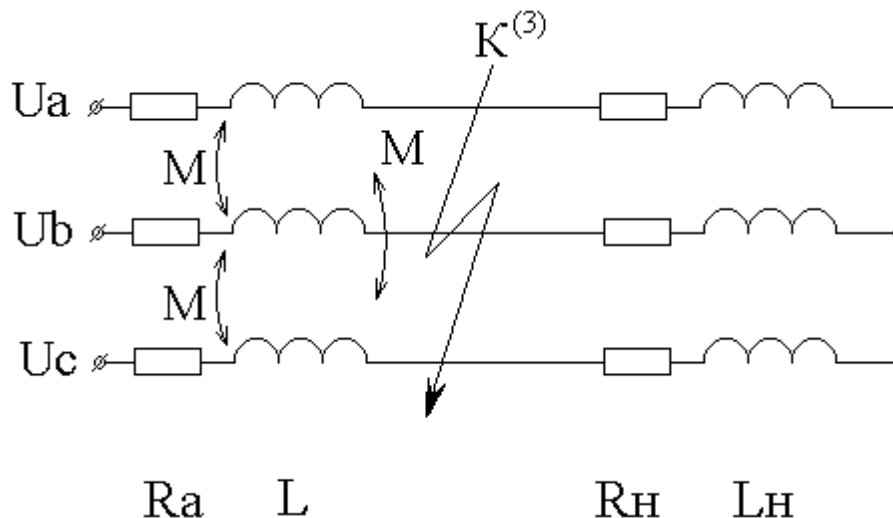


Рис. 1. Расчетная схема

В результате данного замыкания цепь распадается на два независимых друг от друга участка. Участок с R_H и L_H оказывается зашунтированным коротким замыканием. Дифференциальное уравнение равновесия для каждой фазы этого участка имеет вид:

$$0 = iR_H + L_H \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

Его решение общеизвестно:

$$i = i_0 e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (2)$$

$$T_a = \frac{L_H}{R_H} = \frac{X_H}{\omega R_H}. \quad (3)$$

Начальное значение свободного тока i_0 в каждой фазе, очевидно, равно предшествовавшему мгновенному значению тока в этой фазе.

Рассмотрим теперь участок цепи, который остался присоединенным к источнику. Напряжение источника (для фазы А):

$$U_a = U_m \sin(\omega t + \alpha). \quad (4)$$

Здесь помимо свободного тока будет новый принужденный (периодический) ток.

Дифференциальное уравнение равновесия (фаза А) для этого участка:

$$U_a = i_a R_a + L \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_c}{dt}. \quad (5)$$

Имея в виду, что $i_b + i_c = -i_a$, можно записать (опуская индекс фазы)

$$U_a = i R_a + L_a \frac{di}{dt}, \quad (6)$$

где $L_a = L - M$ - результирующая индуктивность фазы.

Решение (6) имеет вид

$$i = \frac{U_m}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a(0)} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (7)$$

где Z_K - полное сопротивление цепи короткого замыкания;

φ_K - угол сдвига тока в этой цепи;

T_a - постоянная времени цепи короткого замыкания, определяемая по (3), где вместо R_H , L_H , X_H следует ввести R_a , L_a , X_a .

Первый член правой части (7) представляет периодическую слагающую тока i_n , амплитуда которой $I_{nm} = U_m / Z_K$. Второй член - затухающий по экспоненте свободный ток (апериодический). Его начальное значение $i_{a(0)}$ определяется из начальных условия, т.е.

$$i_{(0)} = i_{n(0)} + i_{a(0)}, \quad (8)$$

откуда после подстановки соответствующих выражений имеем:

$$i_{a(0)} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_K), \quad (9)$$

где $I_m = U_m / (Z_K + Z_H)$.

Очевидно, что наибольшее значение апериодической слагающей тока определяется не только фазой включения, но также предшествующим режимом цепи. Так, например, при отсутствии предшествующего режима, когда ток в момент возникновения короткого замыкания проходит через ноль, величина $i_{a(0)}$ может достигать амплитуды периодической слагающей, если в момент короткого замыкания эта слагающая проходит через один из своих максимумов (рис. 2). Можно показать, что данное условие выполняется при $(\alpha - \varphi_K) = 90^\circ$.

Этот случай рассматривается как расчетный, максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания, которое называют **ударным током короткого замыкания**, находят при наибольшем значении апериодической слагающей (рис. 2), считая, что он наступает приблизительно через полпериода, что при $f = 50$ Гц составляет около 0.01с от момента возникновения короткого замыкания.

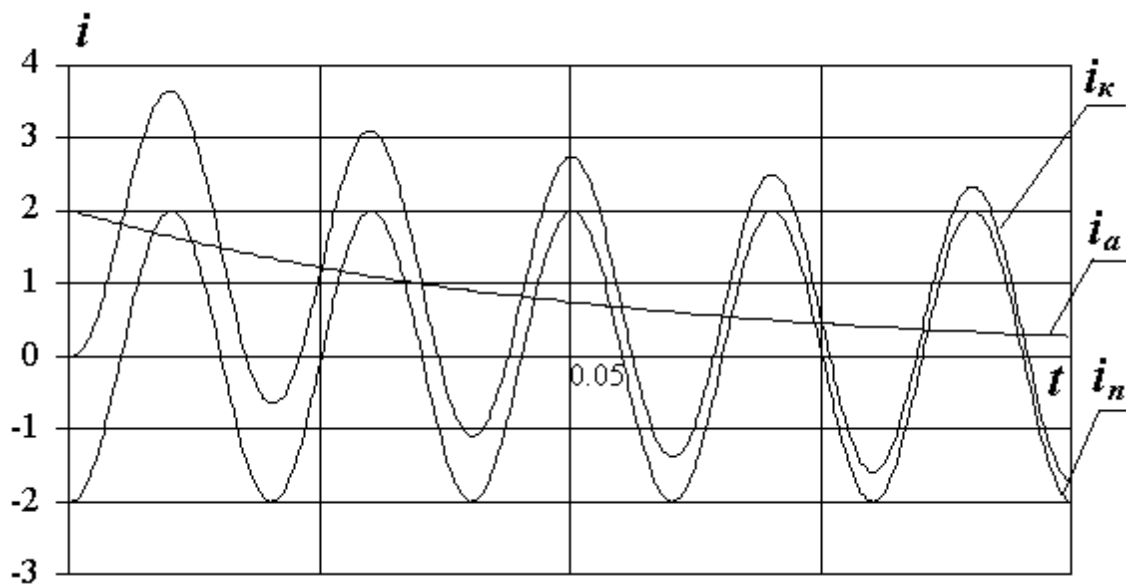


Рис.2. Ток к.з. и его составляющие

Таким образом, выражение для ударного тока короткого замыкания можно записать в следующем виде:

$$i_y = I_{nm} + I_{nm} e^{-\frac{0.01}{T_a}} = K_y I_{nm}, \quad (10)$$

где $K_u = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}$ - ударный коэффициент.

Порядок выполнения работы

1. Для указанного преподавателем варианта схемы составить расчетную схему замещения, определить ее параметры и преобразовать к виду, представленному на рис. 1. Расчет проводить в относительных базисных единицах.

2. Рассчитать начальную фазу напряжения, соответствующую прохождению тока в неповрежденной цепи через ноль.

3. Загрузить программу расчета ударного тока "LR5" и ввести в нее исходные данные, полученные в пп. 1, 2. Ввод данных проводится в режиме диалога с ЭВМ. При вводе цифровой информации дробная часть числа отделяется от целой части *точкой*.

4. Получить график полного тока короткого замыкания и его составляющих, выбрав пункт 4 в меню рисования графиков.

5. Выбрав пункт 6 того же меню, произвести изменение исходных данных в соответствии с указаниями преподавателя. Вновь выполнить указания п. 4.

6. Сопоставить полученные результаты и провести их анализ.

7. Сравнить действительный максимум полного тока короткого замыкания, полученный при расчете на ЭВМ с ударным током, рассчитанным по формуле (10). Сделать выводы.

8. Рассчитать и построить графики изменения токов в правой части схемы (R_H, L_H) для трех фаз, учитывая, что токи и напряжения фаз А, В, С сдвинуты относительно друг друга на 120° .

9. Рассчитать действующее значение ударного тока в указанный преподавателем момент времени.

Содержание отчета

1. Расчетная схема и результаты расчета ее параметров.
2. Графики полного тока короткого замыкания и его составляющих для двух режимов.
3. Графики фазных токов в зашунтированном участке схемы.

4. Анализ результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется простейшей трехфазной цепью?
2. Причины возникновения слагающих полного тока короткого замыкания.
3. Условия возникновения максимального ударного тока короткого замыкания.
4. Указать пределы изменения ударного коэффициента и дать объяснение им.
5. Действующее значение полного тока короткого замыкания.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Расчет токов коротких замыканий с использованием ЭВМ

Цель работы: Получение навыков в расчете на ЭВМ токов симметричных и несимметричных коротких замыканий в сложной электрической сети произвольной конфигурации. Анализ распределения тока короткого замыкания по ветвям схемы.

Краткие методические указания

Расчет токов коротких замыкания ведется по программе PRK, в основе алгоритма которой лежит метод Гаусса с обратным ходом /2/. Программа позволяет рассчитывать токи симметричных и несимметричных коротких замыканий в сложной электрической сети произвольной конфигурации. Кроме этого может быть рассчитан ток в любой ветви данной сети, а также напряжение в любом узле. Возможен учет переходного сопротивления и сопротивления дуги в месте короткого замыкания.

Для выполнения расчета необходима информации о схеме электрической сети и параметрах ее элементов, о потребителях (нагрузках) и источниках (электростанциях).

Исходные данные для расчета готовятся в следующем порядке:

1. Узлы схемы замещения нумеруются начиная от точки нулевого потенциала ("земли"), причем точке нулевого потенциала присваивается нулевой номер.

НУМЕРАЦИЯ УЗЛОВ ДОЛЖНА БЫТЬ СКВОЗНОЙ.

2. Ветви, соединяющие узлы M и N , получают индекс $N-M$. Параметры ветвей рассчитываются в именованных или относительных единицах.

3. Любая из ветвей может содержать трансформатор. В этом случае рассчитывается коэффициент трансформации K_T . Для остальных ветвей, а также в случае, если параметры элементов сети

приведены к одной ступени напряжения, K_T принимается равным единице.

4. Сопротивления нагрузочных ветвей получают индекс $N-0$, где N - номер узла, к которому подключена нагрузка.

5. Аналогично присваиваются индексы генерирующим ветвям. Для этих ветвей кроме величины сопротивления должны быть определены ЭДС и ее угол.

6. Исходные данные вводятся в программу расчета в следующем порядке:

- индексы ветви, начиная с ненулевого;
- сопротивление ветви (R, X) для токов прямой последовательности;
- сопротивление ветви (R_0, X_0) для токов нулевой последовательности;
- модуль коэффициента трансформации и его фаза (определяется исходя из номера группы соединения обмоток трансформатора);
- ЭДС ветви (если есть) и ее угол.

Ввод данных завершается путем введения нулевых индексов ветви.

Значения параметров элементов сети при вводе разделяются запятыми или пробелами, введенная с клавиатуры строка параметров считывается программой при нажатии клавиш «ENTER».

Работа с программой ведется в режиме диалога пользователя с ЭВМ

В табл. 1 в качестве примера приведен порядок ввода исходных данных для схемы, представленной на рис. 3. Полагается, что

$$Z_1 = Z_{Г1} + Z_{Т1} = (0.1 + j0.3) + (0 + j0.2);$$

$$Z_7 = Z_{Г2} + Z_{Т2} = (0.2 + j0.4) + (0 + j0.3);$$

$$Z_6 = Z_{Т3} + Z_H = (0 + j0.2) + (1.2 + j0.5).$$

Обмотки низшего напряжения трансформаторов соединены в треугольник. Параметры элементов выражены в относительных единицах и приведены в одной ступени напряжения, поэтому K_T принимаются равными единице для всех ветвей.

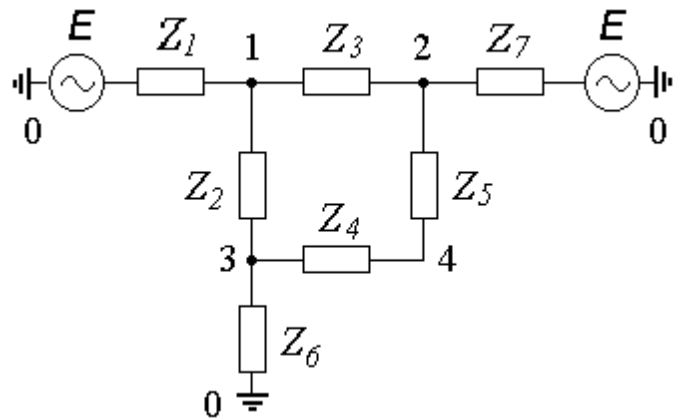


Рис.3. Расчетная схема (пример)

$$Z_1=0.1+j0.5; Z_2=Z_3=Z_4=j0.4;$$

$$Z_5=j0.6; Z_6=1.2+j0.7; Z_7=0.2+j0.7;$$

$$E=1.1\angle 23^\circ; E=1.4\angle 30^\circ$$

Таблица 1

Исходные данные для расчета по схеме рис.3

Индекс	R_1	X_1	R_0	X_0	K_T	β_T	E	δ_E
1 0	0.1	0.5	0	0.2 ^{*)}	1	0	1.1	23°
1 2	0	0.4	0	1.4 ^{**)}	1	0	0	0
1 3	0	0.4	0	1.4 ^{**)}	1	0	0	0
3 4	0	0.4	0	1.4 ^{**)}	1	0	0	0
2 4	0	0.6	0	2.1 ^{**)}	1	0	0	0
3 0	1.2	0.7	0	0.2 ^{*)}	1	0	0	0
2 0	0.2	0.7	0	0.3 ^{*)}	1	0	1.4	30°

^{*)} Сопротивление трансформатора

^{**)} Сопротивление линии ($X_0 = 3.5X_1$)

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать параметры элементов электрической сети, представленной на рис. 4. Паспортные данные элементов указываются преподавателем. Расчет производить в относительных или именованных единицах. В последнем случае необходимо рассчитать модуль K_T и фазу β_T коэффициента трансформации

$$K_T = \frac{U_I}{U_{II}}, \quad (11)$$

$$\beta_T = n \cdot 30^\circ, \quad (12)$$

где U_I - напряжение холостого хода обмотки трансформатора, обращенной в сторону основной ступени;

U_{II} - напряжение холостого хода обмотки трансформатора, обращенной в сторону приводимой ступени;

n - номер группы соединения обмоток трансформатора.

2. Составить таблицу исходных данных, аналогичную табл. 1. Параметры линий для токов нулевой последовательности определяются с помощью таблицы приложения 2.

3. Загрузить программу расчета токов коротких замыканий «PRK» и построчно ввести в нее исходные данные.

Примечание. Для корректного выполнения пп. 2,3 необходимо воспользоваться методическими указаниями к настоящей работе.

4. Рассчитать начальные значения сверхпереходных токов однофазного, двухфазного и двухфазного на землю коротких замыканий в указанных преподавателем точках схемы, одновременно рассчитать токи во всех ветвях схемы, примыкающих к узлам А и В, и напряжения в этих узлах, для чего в режиме диалога программе передаются номера узлов А и В.

Примечание. Генераторы вводятся в схему замещения своими сверхпереходными параметрами.

5. Рассчитать установившиеся значения токов коротких замыканий, указанных в п. 4. Для этого в исходных данных необходимо заменить сверхпереходные параметры генераторов на синхронные.

6. Рассчитать коэффициент несимметрии при однофазном замыкании в одной из точек схемы (по указанию преподавателя).

7. Сопоставить результаты расчетов токов коротких замыканий, провести их анализ и оформить отчет.

Содержание отчета

1. Расчетная схема сети и ее параметры.
2. Таблица исходных данных для расчета токов коротких за-

мыканий.

3. Результаты расчета начальных сверхпереходных токов коротких замыканий.

4. Результаты расчета установившихся значений токов коротких замыканий.

5. Расчет коэффициента несимметрии.

6. Анализ результатов расчета.

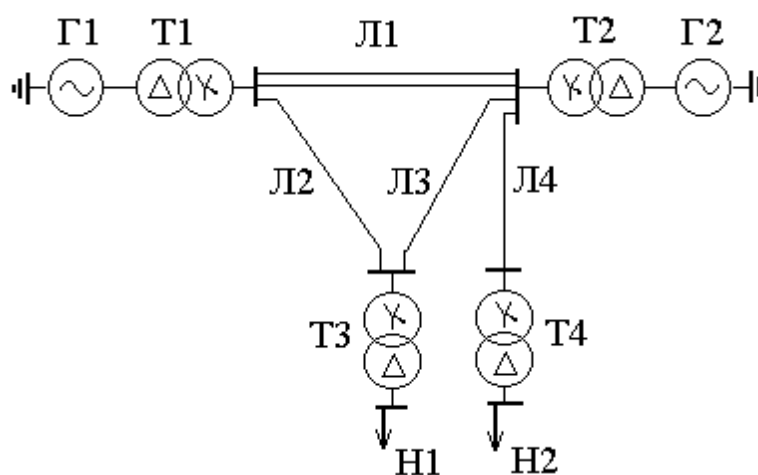


Рис. 4. Схема электрической сети

Контрольные вопросы

1. Электромагнитные параметры синхронных генераторов.
2. Представление синхронных генераторов в схеме замещения.
3. Практические методы расчета начального сверхпереходного тока короткого замыкания.
4. Что называется установившимся током короткого замыкания?
5. Параметры элементов для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.
6. Что такое коэффициент несимметрии?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Исследование факторов, влияющих на величину тока короткого замыкания

Цель работы: Исследовать зависимость тока короткого замыкания от наличия в электрической системе крупных двигателей, от группы соединения обмоток трансформаторов, а также от наличия переходного сопротивления в месте короткого замыкания.

Краткие методические указания

В лабораторных работах № 1 - 6 исследовалось влияние на величину тока короткого замыкания таких факторов, как вид короткого замыкания, его удаленность, режим работы нейтрали трансформаторов, постоянная времени электрической цепи.

В настоящей работе продолжается исследование следующих факторов, влияющих на величину тока короткого замыкания:

1. Наличие крупных двигателей, расположенных "электрически" близко, от места короткого замыкания.

В начальный момент нарушения режима необходим учет подпитки точки короткого замыкания токами крупных двигателей. Ток, поступающий от двигателей, определяется выражением

$$I_{Д}'' = \frac{E''}{X_{\Sigma}''}, \quad (13)$$

где E'' — среднее значение ЭДС двигателя.

$$X_{\Sigma}'' = X_{Д}'' + X_{ВН}, \quad (14)$$

где $X_{Д}''$ - среднее значение сопротивления двигателя;

$X_{ВН}$ - эквивалентное сопротивление электрической цепи между точкой подключения двигателя и точкой короткого замыкания.

При расчете тока короткого замыкания по программе «PRK» двигатели представляются как отдельные ветви с индексами $N-0$

где N – номер узла, к которому присоединен данный двигатель. Сопротивление такой ветви определяется по формуле (14). Значения E'' и X''_D выбираются из табл. 2, составленной по данным [1].

Примечание. Генераторы в схеме замещения представляются своими сверхпереходными параметрами.

Таблица 2

Средние значения X''_D и E''
(в о.е. при номинальных условиях)

Наименование элемента	X''_D	E''
Синхронный двигатель	0.2	1.1
Асинхронный двигатель	0.2	0.9
Обобщенная нагрузка	0.35	0.85

2. Группа соединения обмоток трансформаторов.

Учет номера группы соединения обмоток трансформатора осуществляется путем задания фазы коэффициента трансформации β_T (см. методические указания к лабораторной работе № 6).

3. Переходное сопротивление в месте короткого замыкания.

Переходное сопротивление в месте короткого замыкания образуется сопротивлением замыкателей или заземлителей и сопротивлением электрической дуги. Сопротивлением заземлителей в практических расчетах токов коротких замыканий в высоковольтных сетях можно пренебречь (за исключением специальных случаев расчета), поэтому рассмотрим более подробно сопротивление дуги.

Экспериментальные исследования открытых дуг на линиях электропередач показали, что при токах более 100 А градиент напряжения на дуге равен $E_{\max} = 1400 - 1500$ В/м и мало зависит от тока. Ток можно считать синусоидальным, так как он ограничивается в основном сопротивлением сети.

Сопротивление дуги, рассчитанное по амплитудным значениям,

$$R_{Д} = \frac{E_{\max} L}{I_{\max}} = \frac{E_{\max} L}{\sqrt{2} I} = 1050 \frac{L}{I}, \quad (15)$$

где L - длина дуги (при межфазном коротком замыкании принимается равной расстоянию между проводниками фаз).

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать ток короткого замыкания с учетом подпитки его от двигателей.

Расчет токов коротких замыкания производится для электрической сети, представленной на рис. 4. Параметры всех элементов электрической сети (кроме нагрузок) заимствуются из результатов выполнения лабораторной работы № 6. Нагрузкой являются двигатели, тип и мощность которых указываются преподавателем.

Считать, что короткое замыкание происходит на шинах высокого напряжения трансформаторов Т3 и Т4. Для обоих случаев определить, ток короткого замыкания и ток от каждого двигателя.

2. Рассчитать ударный ток в месте короткого замыкания с учетом подпитки от двигателей по формуле

$$i_y = K_y \sqrt{2} I'' + K_{yД} \sqrt{2} I''_{Д}, \quad (16)$$

где $I''_{Д}$ и $K_{yД}$ начальный сверхпереходный ток и ударный коэффициент двигателя;

I'' - сверхпереходный ток короткого замыкания без учета двигателей.

3. Используя исходные данные, полученные при выполнении лабораторной работы № 6, рассчитать фазные токи генератора Г1 при двухфазном коротком замыкании фаз В и С в узле А (рис. 4). Рассмотреть два случая: а) трансформатор Т1 имеет третью группу соединения обмоток; б) трансформатор Т1 имеет одиннадцатую группу соединения обмоток.

Провести анализ результатов и дать оценку применению третьей группы соединения обмоток трансформаторов.

4. Используя формулу (15) и значение тока "металлического" короткого замыкания методом итераций рассчитать ток короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги. Вид и

место короткого замыкания указываются преподавателем.

Содержание отчета

1. Схема электрической сети с двигательной нагрузкой.
2. Суммарные токи коротких замыканий и токи двигателей при коротких замыканиях на шинах высокого напряжения трансформаторов Т3, Т4.
3. Расчет ударного тока короткого замыкания с учетом подпитки от двигателей.
4. Фазные токи генератора Г1 при двухфазном коротком замыкании в узле А и группе соединения обмоток трансформатора Т1 $n=3$ и $n=11$. Векторная диаграмма токов для случая $n = 3$.
5. Результат расчета тока короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги.
6. Анализ результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Почему двигатели подпитывают ток короткого замыкания?
2. Как определяется ударный коэффициент асинхронного двигателя.
3. Чему равен ток подпитки от двигателей в установившемся режиме короткого замыкания?
4. Трансформация симметричных составляющих.
5. Какие группы соединения обмоток трансформаторов применяются на практике?
6. В каких случаях учет сопротивления электрической дуги обязателен?

Библиографическая список

1. Электроэнергетические системы и сети [Текст] : учебное пособие / Н. В. Хорошилов [и др.] ; Минобрнауки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ). - Курск : ЮЗГУ, 2014. - 147 с.
2. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования [Текст] : учебное пособие / под ред. И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. - М. : Академия, 2005. - 416 с.
3. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования [Текст] : учебное пособие для студ. вуз. / Под ред. О. Д. Гольдберга. - М. : Высшая школа, 2001. - 512 с.
4. Рожкова Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций [Текст] : учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. - М. : Академия, 2004. - 448 с.

**Упрощенные формулы для перевода параметров
в базисные относительные единицы**

Для перевода параметров элементов электрических сетей в базисные относительные единицы необходимо задаться основными базисными величинами, две из которых (напряжение и мощность) являются независимыми. Базисная мощность S_B , как правило, принимается равной некоторому "круглому" числу, соизмеримому с мощностью генераторов (10 МВА, 100 МВА, 1000 МВА и т.д.). Если электрическая сеть содержит большое количество элементов с одинаковой номинальной мощностью, то эту мощность целесообразно принять в качестве базисной. Базисное напряжение выбирается для каждой ступени напряжения и равно среднему значению напряжения для данной ступени.

Ряд средних значений напряжения (в кВ):
6.3; 10.5; 13.8; 15.75; 18; 20; 37.5; 115; 154; 230; 340; 515; 750.

Тогда базисное сопротивление и базисный ток для каждой ступени напряжения будут определяться выражениями

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B}, \quad I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B}.$$

Формулы перевода параметров в базисные относительные единицы для различных элементов электрической сети имеют вид:

для генераторов (установившийся режим)

$$X_{G*} = X_d \frac{S_B}{S_H};$$

то же в переходном режиме

$$X_{G*} = X_d'' \frac{S_B}{S_H};$$

для трансформаторов

$$X_{T*} = \frac{U_{K\%}}{100\%} \frac{S_B}{S_H};$$

для линий

$$Z_{Л*} = Z_{П} L \frac{S_{Б}}{U_{Б}^2},$$

где $Z_{П} = R_{П} + jX_{П}$ — погонные сопротивления линии (Ом/км);
L -длина линии (км).

Сопротивление нагрузки определяется по формуле

$$Z_{Н} = \frac{U_{Н}^2}{S_{Н}} (\cos\varphi_{Н} + j\sin\varphi_{Н}).$$

Если номинальное напряжение нагрузки $U_{Н}$ и номинальная мощность $S_{Н}$ выражены в базисных относительных единицах, то $Z_{Н}$ оказывается выраженным в тех же единицах.

**Сопротивление линий для токов
нулевой последовательности**

Индуктивное сопротивление воздушной линии (ВЛ) для токов нулевой последовательности превышает сопротивление для токов прямой последовательности. Оно зависит от конструкции ВЛ и типа материала, из которого изготовлены грозозащитные тросы.

Это сопротивление определяется исходя из данных приведенной ниже таблицы.

Средние значения соотношений между X_0 и X_1 для ВЛ

Характеристика ВЛ	Отношение X_0 / X_1
Одноцепная ВЛ без грозозащитных тросов	3.5
То же со стальными грозозащитными тросами	3.0
То же с хорошо проводящими грозозащитными тросами	2.0
Двухцепная ВЛ без грозозащитных тросов	5.5
То же со стальными грозозащитными тросами	4.7
То же с хорошо проводящими грозозащитными тросами	3.0

Индуктивное сопротивление кабельной линии для токов нулевой последовательности определяется выражением

$$X_0 = (3.5 - 4.6)X_1 .$$