

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
для студентов очной и заочной форм обучения  
специальности 140211 – Электроснабжение и направления  
бакалавриата 140200 «Электроэнергетика»

Белгород  
2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова  
Кафедра электроэнергетики

Утверждено  
научно-методическим советом  
университета

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
для студентов очной и заочной форм обучения  
специальности 140211 – Электроснабжение и направления  
бакалавриата 140200 «Электроэнергетика»

Белгород  
2012

УДК 621.31(07)  
ББК 31.2 я7  
П27

Составители: канд. техн. наук, проф. *А.А. Виноградов*  
канд. техн. наук, проф. *М.Н. Нестеров*  
ассистент *С.В. Килин*  
ассистент *Р.С. Сингатулин*

Рецензент канд. техн. наук, доцент Харьковской национальной академии городского хозяйства *А.В. Сапрыка*

**Переходные** процессы в электроэнергетических системах: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов очной и заочной форм обучения специальности 140211 – Электроснабжение и направления бакалавриата 140200 «Электроэнергетика» /сост.: А.А. Виноградов, М.Н. Нестеров, С.В. Килин, Р.С. Сингатулин, – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 38 с.

В методических указаниях рассмотрены требования к оформлению, выполнению и защите лабораторных работ. Указаны краткие теоретические сведения, методика выполнения, даны контрольные вопросы для подготовки к защите.

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной форм обучения специальности 140211 – Электроснабжение и направления бакалавриата 140200 «Электроэнергетика».

Данное издание публикуется в авторской редакции.

**УДК 621.31(07)**  
**ББК 31.2 я7**

© Белгородский государственный  
технологический университет  
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2012

## Содержание

Цель и порядок выполнения работ.....	4
Описание и технические характеристики функциональных блоков.....	7
Лабораторная работа № 1. Переходный процесс при симметричном коротком замыкании в электрической сети, питающейся от источника практически бесконечной мощности.....	11
Лабораторная работа № 2. Переходный процесс при несимметричном коротком замыкании в электрической сети, питающейся от источника практически бесконечной мощности.....	16
Лабораторная работа № 3. Переходный процесс при обрыве фазы в электрической сети, питающейся от источника практически бесконечной мощности.....	22
Лабораторная работа № 4. Переходный процесс при двойном замыкании на землю в электрической сети с изолированной нейтралью, питающейся от источника практически бесконечной мощности.....	28
Лабораторная работа № 5. Способы ограничения токов короткого замыкания.....	36
Библиографический список.....	37

## **Цель и порядок выполнения работ**

Лабораторные работы являются одним из видов практического обучения: их цель – закрепление теоретических знаний, проверка на опыте изученных положений теории и законов электротехники, приобретение практических навыков по сборке электрических цепей, проведении эксперимента, использовании основных электроизмерительных приборов и устройств.

### **Подготовка к лабораторным работам**

Серьезное отношение к лабораторной работе позволит студенту сделать правильные выводы, проанализировать результаты опытов, научиться самостоятельно решать несложные задачи исследовательского характера. Задание на проведение очередной лабораторной работы выдается преподавателем заблаговременно до ее выполнения. Для качественного выполнения лабораторной работы студенту необходимо:

- повторить теоретический материал по конспекту, учебнику или методическому пособию;
- ознакомиться с описанием лабораторной работы;
- записать название и номер работы, вычертить таблицы для записи показаний приборов и результатов обработки показаний;
- выяснив цели работы, четко представить себе поставленную задачу и способы ее достижения, оценить ожидаемые результаты опытов;
- сделать предварительный домашний расчет, если это указано в задании;
- ответить письменно или устно на контрольные вопросы.

### **Ознакомление с электроизмерительными приборами и устройствами и их подбор**

Прежде чем приступить к сборке электрической цепи, следует выбрать необходимые электроизмерительные приборы. При выборе приборов нужно учитывать их тип, номинальные значения измеряемой величины, род тока, класс точности. Погрешности измерения любого прибора обычно тем меньше, чем ближе измеряемая величина к предельному значению, указанному на приборе.

Включение измерительных приборов в цепь может вызывать заметное изменение токов, напряжений, мощностей. Поэтому для более точных измерений следует учитывать внутренние сопротивления приборов, которые обычно указаны на их шкалах.

Приборы магнитоэлектрической системы, как правило, используют для измерения на постоянном токе, а приборы электромагнитной, электродинамической, электронной могут работать как на постоянном, так и на переменном токе в диапазоне частот, указанных на шкалах.

Прежде чем приступить к измерениям следует определить цену деления прибора. Цена деления амперметров и вольтметров может быть рассчитана как частное от деления предела прибора, указанного на переключателе, на число делений шкалы; цена деления однофазного ваттметра равна произведению пределов напряжения и тока, деленного на число делений шкалы.

Как в производственных испытаниях, так и в учебных опытах в отчете необходимо записывать данные об используемых измерительных приборах. Следует записать их названия, номинальное значение, тип, род тока, частоту, класс точности, принцип действия (систему), способ установки и заводской номер. Это позволяет, если возникнет потребность, повторить опыт с теми же приборами и проверить правильность полученных результатов.

### **Сборка электрической цепи**

Собирать схему должен только один человек, другие члены бригады контролируют его, подают нужные провода, выполняют мелкие поручения. Необходимо, чтобы обязанности членов бригады менялись. Наличие ошибок в цепи может привести к порче приборов и оборудованию или к несчастному случаю, поэтому каждый раз собранную цепь необходимо показать руководителю для проверки.

*Проведение опыта.* При правильно собранной цепи можно приступать к проведению опытов. Вначале выполняют все действия, предусмотренные программой работы, но без записей результатов. Такое опробование необходимо, поскольку дает возможность убедиться в том, что приборы выбраны правильно, а если есть необходимость, можно их заменить на более подходящие.

Во время проведения эксперимента обязанности в бригаде лучше разделить: один человек измерят напряжение, сопротивление и т.п. и наблюдает за приборами, другой – записывает результаты в подготовленную заранее таблицу. В последующих работах обязанности членов бригады меняются.

В ходе проведения эксперимента измеряемая величина должна фиксироваться равномерно по всему своему диапазону изменения, включая начальную, конечную и точку экстремума, если последняя существует. Показания приборов нужно снимать внимательно и записывать карандашом. Если сразу трудно определить измеряемые значения в именованных единицах, то можно зафиксировать количество делений шкалы прибора, а после окончания опыта пересчитать их в именованные единицы. Не торопитесь разбирать цепь, покажите вначале свои результаты преподавателю, так как возможно вам придется переделывать работу заново.

*Составление отчета. Защита лабораторной работы.* Отчет является документом о проделанном эксперименте, поэтому в нем долж-

ны содержаться все необходимые сведения для проверки результатов опытов и выполненных расчетов. Составление отчета – индивидуальная работа каждого члена бригады. Отчет выполняется чернилами (пастой). Текст должен быть написан четким, понятным почерком. Схемы, таблицы, графики и другие построения выполняются карандашом с применением чертежного инструмента, специальных шаблонов или с помощью компьютерной графики. При начертании электрических схем должны соблюдаться ГОСТы на графические и буквенные обозначения их элементов (см. приложение). В одной системе координат можно изображать несколько кривых различая их, например, по цвету.

Масштаб на графиках следует выбирать равным  $1 \cdot 10^n$ ,  $2 \cdot 10^n$ ,  $5 \cdot 10^n$ , где  $n$  -  $\pm$ (произвольное целое число). Математическую обработку экспериментальных данных проводят в отчете полностью или частично, но в любом случае обязательно указывают расчетные формулы. Не исключено, что опытные и расчетные данные будут немного расходиться. Это возможно из-за колебаний напряжения в сети, погрешности при изменениях, нестабильности параметров цепи. Такие отклонения считаются доступными.

В заключение своей работы делается вывод по выполнению задачи, указанной в цели работы, подтверждении опытным путем тех законов, правил и формул, которые изучались в теоретическом курсе. Выводы должны быть конкретными.

Каждая работа должна быть защищена студентом. В ходе защиты студент должен показать знания теории по теме работы, умение собирать цепь, рассказать ход лабораторной работы, пояснить, как проводился расчет, уметь проанализировать полученные результаты и объяснить причины расхождения расчетных и опытных данных. Защита лабораторных работ проводится систематически в течение учебного семестра, как правило, на следующем лабораторном занятии, назначенном преподавателем.

### **Основные правила безопасности при работе в электрических лабораториях**

Согласно Правилам устройств электроустановок (ПУЭ) для помещений без повышенной опасности поражения током, к которым относятся лаборатории электротехники, безопасным считается напряжение переменного тока частотой 50 Гц до 42 В. Сопротивление тела человека определяется в основном сопротивлением кожного покрова и равно примерно 200-500 кОм. Увлажнение или повреждение кожи снижает сопротивление до 600–800 Ом. Большое влияние на сопротивление тела оказывает также общее состояние организма нервной системы. Таким образом, при нормальных условиях при напряжении 42 В по телу человека будет протекать ток  $0,1 \div 0,3$  мА. Величина тока в 50 мА мо-

жет привести к электротравме, а в 100 мА – смертельному исходу. Случается, что при токах даже меньше 50 мА мышцы кистей рук непроизвольно сокращаются и токоведущая часть может оказаться зажатой в кулаке, при этом самостоятельно не удастся разжать кисть руки и прервать ток через тело.

В лабораториях электротехники используются напряжения до 250 В, поэтому меры предосторожности следует соблюдать особенно тщательно.

### **Основные правила по технике безопасности следующие:**

1. Перед началом сборки цепи следует убедиться, что выключатель находится в выключенном состоянии, а вилки вынуты из штепсельных разъемов.

2. Не допускается использование приборов и аппаратов с неисправными клеммами, проводов с поврежденной изоляцией, неисправных реостатов и т.п.

3. Перед тем как, присоединить конденсатор, его необходимо разрядить, замкнув выводы проводником накоротко.

4. Собранную цепь включают, только получив разрешение руководителя занятия.

5. Пред включением цепи следует убедиться, что никто не прикасается к открытым токоведущим частям.

6. Все необходимые пересоединения нужно производить только при снятом напряжении.

7. Запрещается самостоятельно производить какие-либо переключения на главном распределительном щите лаборатории, за исключением случаев экстренного отключения.

8. Если во время проведения опытов возникают повреждения, появляется дым, специфический запах горячей изоляции или накаляются реостаты – следует быстро отключить напряжение и сообщить преподавателю о случившемся.

9. Если кто-либо попадает под напряжение и не сможет самостоятельно оторваться от токоведущих частей, то не пытайтесь оттащить его – вы сами будете поражены током. Быстро выключите напряжение на стенде или главном распределительном щите. Сообщите преподавателю о случившемся.

10. Студентов допускают к лабораторным работам после ознакомления с настоящими правилами, что должно быть зафиксировано в специальном журнале.

### **Описание и технические характеристики функциональных блоков**

#### *Трехфазный источник питания*

Предназначен для питания комплекса трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, уст-



ройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.

*Источник питания двигателя постоянного тока*

Предназначен для питания обмоток якоря и возбуждения постоянным током. Включается вручную или дистанционно / автоматически от ПЭВМ. Якорное напряжение регулируется вручную или дистанционно. Напряжение возбуждения постоянное.

*Тиристорный преобразователь / регулятор*

Предназначен для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока (режим преобразователя) и трехфазного асинхронного двигателя (режим регулятора). Преобразует трехфазное напряжение синусоидального тока в напряжение постоянного тока, а также в трехфазное напряжение переменной величины. Выходное напряжение регулируется вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ).

*Возбудитель синхронной машины*

Предназначен для питания обмотки возбуждения. Включается и регулируется вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Выходные цепи изолированы от входных.

*Источник постоянного напряжения*

Предназначен для питания обмоток якоря и возбуждения постоянным током. Включается вручную или дистанционно / автоматически от ПЭВМ. Выходное напряжение регулируется вручную или дистанционно (от ПЭВМ).

*Трехполюсный выключатель*

Предназначен для ручного или дистанционного / автоматического (от ПЭВМ) включения / отключения электрических цепей.

*Терминал*

Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам управления функциональных блоков.

*Активная нагрузка*

Предназначена для моделирования однофазных и трехфазных потребителей активной мощности. Регулируется вручную.

*Модель линии электропередачи*

Предназначена для моделирования ЛЭП переменного тока как цепи с сосредоточенными параметрами.

*Линейный реактор*

Предназначен для моделирования продольной индуктивности электрической сети.

*Устройство продольной емкостной компенсации*

Предназначено для моделирования продольной емкостной компенсации ЛЭП.

*Емкостная нагрузка*

Предназначена для моделирования опережающей реактивной мощности в электрической системе.

*Блок синхронизации*

Предназначен для ручного или дистанционного/автоматического подключения (от ПЭВМ) синхронной машины к сети методами точной синхронизации или самосинхронизации.

*Индуктивная нагрузка*

Предназначена для моделирования потребителя отстающей реактивной мощности в электрической системе.

*Коннектор*

Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам платы ввода/вывода PCI 6024E персонального компьютера.

*Блок ввода /вывода цифровых сигналов*

Предназначен для ввода сигналов типа «сухой контакт» и вывода сигналов через контакты промежуточного реле.

*Трехфазная трансформаторная группа*

Предназначена для преобразования однофазного / трехфазного напряжений.

*Трехфазная трансформаторная группа*

Предназначена для преобразования однофазного / трехфазного напряжений.

*Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения*

Предназначен для получения нормированных сигналов, пропорциональных синусоидальным напряжениям и токам в силовых цепях.

*Блок датчиков тока и напряжения*

Предназначен для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых цепях постоянного и переменного тока, и гальванически с последними не связанных.

*Блок мультиметров*

Предназначен для измерения токов, напряжений, активного сопротивления. В состав блока входят два цифровых мультиметра с жидкокристаллическим дисплеем.

*Измеритель напряжений и частот*

Предназначен для измерения переменных напряжений и частот.

*Указатель угла нагрузки синхронной машины*

Предназначен для измерения и отображения в аналоговой форме угла нагрузки синхронной машины. Имеет выходные гнезда для подключения к ПЭВМ.

### *Указатель частоты вращения*

Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в аналоговой форме. Имеет выходные гнезда для подключения к ПЭВМ.

### *Измеритель мощностей*

Предназначен для измерения активной и реактивной мощностей и отображения их в аналоговой форме.

### *Персональный компьютер*

Предназначен для автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.

### **Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра**

Для измерения трех базовых электрических величин (напряжения, тока и омического сопротивления) используется мультиметр. Схема подключения показана на рисунках 1-3. До его подключения к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- установка рода тока (постоянный/переменный);
- выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильное подсоединение зажимов мультиметра к измеряемой цепи.

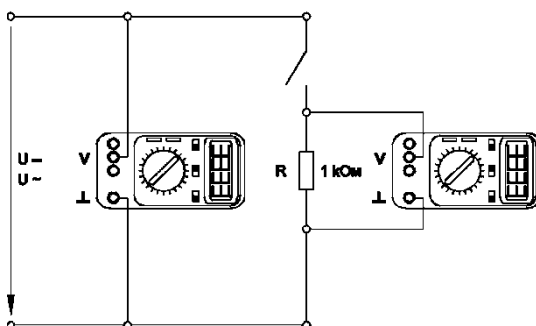


Рис. 1. Присоединение мультиметра как вольтметра

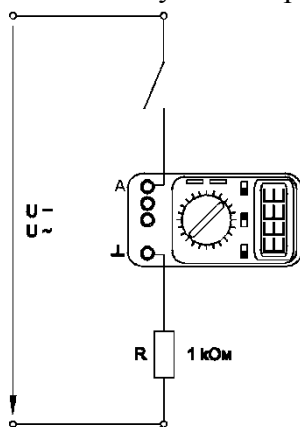


Рис. 2. Присоединение мультиметра как амперметра

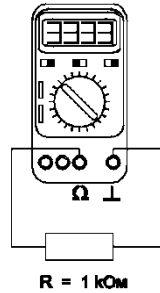


Рис. 3. Присоединение мультиметра как омметра

## Лабораторная работа № 1

### Переходный процесс при симметричном коротком замыкании в электрической сети, питающейся от источника практически бесконечной мощности

*Цель работы:* изучить переходный процесс при симметричном коротком замыкании в электрической сети, питающейся от источника практически бесконечной мощности.

#### Основные сведения

*Коротким замыканием* называется всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с эффективно заземленными нейтралями трансформаторов – также замыкание одной или нескольких фаз на землю.

Замыкание одной фазы на землю в системе с изолированной или компенсированной нейтралью называется *простым замыканием*. При этом виде повреждения прохождение тока обусловлено главным образом емкостью фаз относительно земли.

Обычно в месте замыкания образуется некоторое переходное сопротивление, состоящее из сопротивления возникшей электрической дуги и сопротивлений других элементов на пути тока между фазами или между фазой и землей. В ряде случаев переходные сопротивления могут быть столь малы, что ими практически можно пренебречь.

Различают следующие основные виды коротких замыканий:

- трехфазное короткое замыкание. Точка короткого замыкания обозначается –  $K^{(3)}$ ;
- двухфазное короткое замыкание (междуфазное) –  $K^{(2)}$ ;
- однофазное короткое замыкание (замыкание фазы на землю) –  $K^{(1)}$ ;
- двухфазное короткое замыкание на землю –  $K^{(1,1)}$ .

*Последствия* короткого замыкания зависят от места их возникновения и продолжительности. Они могут иметь местный характер или отражаться на работе всей системы. Короткие замыкания, близкие к источникам питания, могут привести к *нарушению параллельной работы* генераторов с системой – к выходу их из синхронизма.

При КЗ ток в месте повреждения в несколько раз больше номинального. Поэтому даже при кратковременном протекании токов КЗ он может вызвать дополнительный *нагрев* токоведущих элементов выше допустимого (*термическое действие* тока КЗ). Кроме того, токи КЗ вызывают между проводниками большие механические усилия, которые особенно велики в начальной стадии процесса КЗ, когда ток достигает максимального значения (*динамическое действие* тока КЗ). При недостаточной прочности проводников и их креплений они могут быть разрушены при КЗ. При *глубоком понижении* напряжения двигатели могут остановиться, что вызовет большой материальный ущерб. При задержке отключения КЗ сверх допустимой продолжительности может произойти *нарушение устойчивости* ЭС, что является одним из наиболее опасных последствий КЗ. (рис.4.)

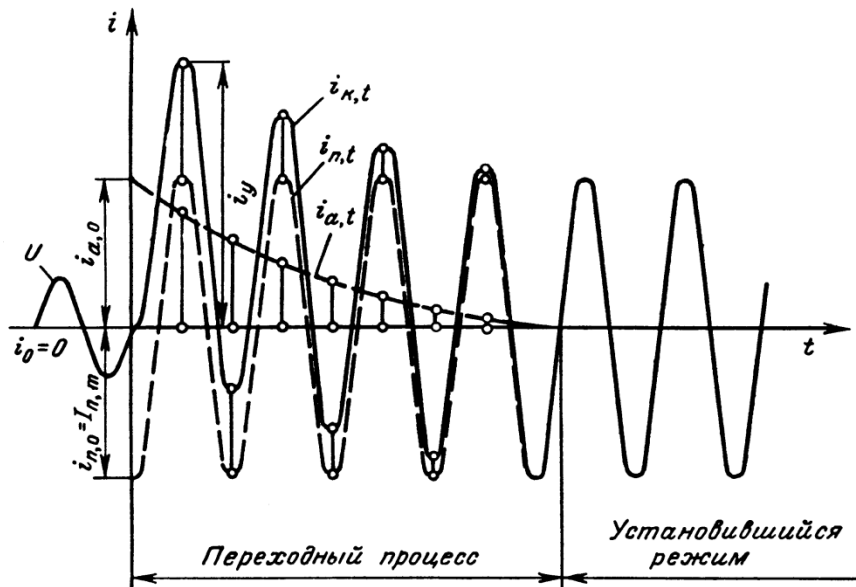


Рис.4. Изменение тока КЗ в цепи, питаемой от шин неизменного напряжения при максимальном значении аперидической составляющей

# Электрическая схема соединений

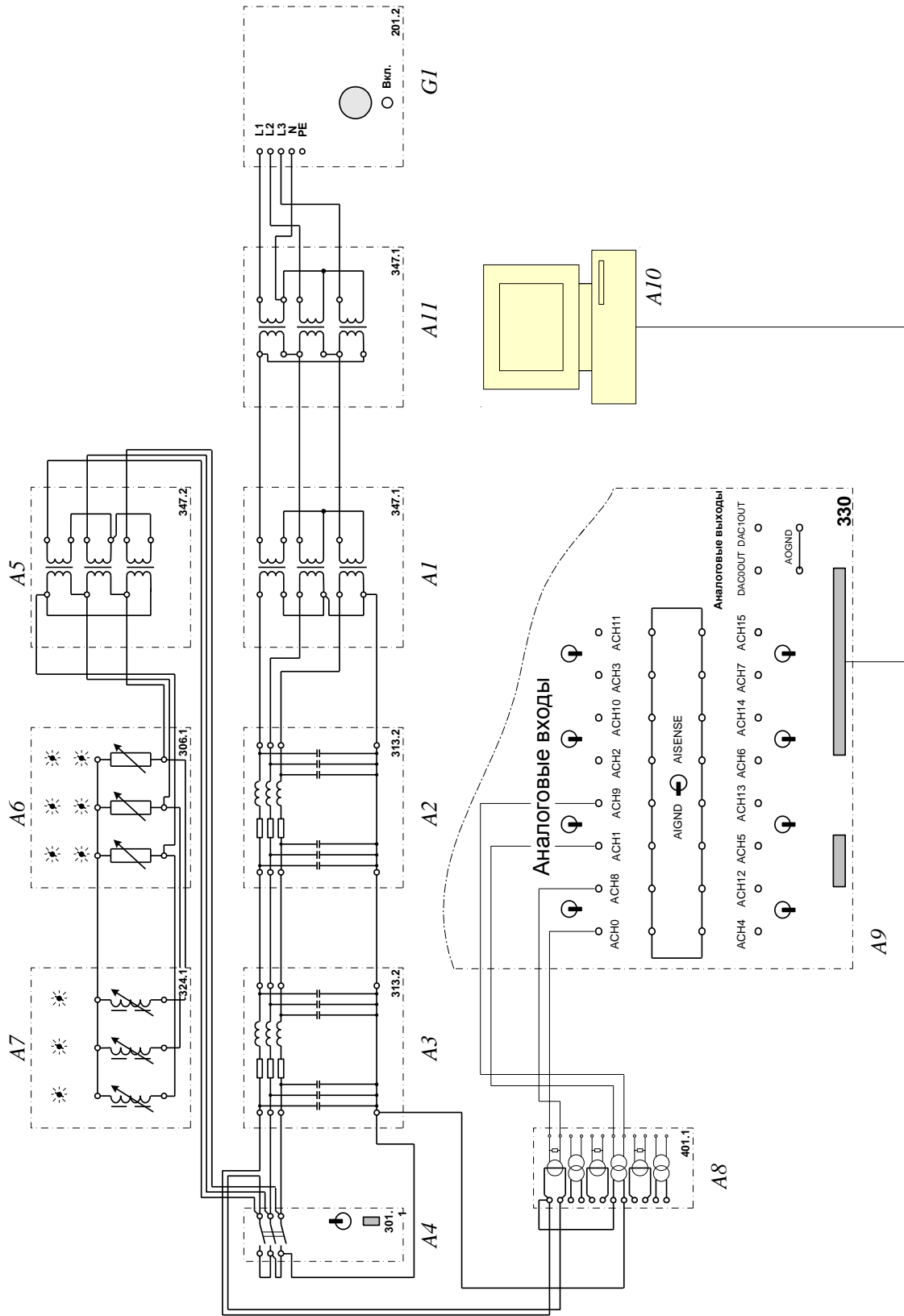



Таблица 1

**Перечень аппаратуры**

Обозначение	Наименование	Параметры
A1, A11	Трехфазная трансформаторная группа	3 x 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A2, A3	Модель линии электропередачи	400 В~; 3x0,5 А 0...1,5 Гн/ 0...50 Ом 0...2x0,45 мкФ 0...250 Ом
A4	Трехполюсный выключатель	400 В ~; 10 А
A5	Трехфазная трансформаторная группа	3 x 80 В·А; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 / 230 В (треугольник)
A6	Активная нагрузка	220/380 В; 50Гц; 3x0...50 Вт
A7	Индуктивная нагрузка	220/380 В; 50Гц; 3x40 Вар
A8	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	3 трансформатора напряжения 600 / 3 В; 3 трансформатора тока 0,3 А / 3 В
A9	Коннектор	8 аналог. Диф. Входов; 2 аналог. Выхода; 8 цифр. Входов/ выходов
A10	Персональный компьютер	IBM совместимый, Windows XP, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI 6024E
G1	Трехфазный источник питания	400 В ~; 16 А

**Порядок выполнения работы**

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
3. Соедините вилки питания 220 В устройств, используемых в эксперименте, сетевыми шнурами с розетками удлинителя.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A10 и запустите программу «Многоканальный осциллограф». Настройте программу для запоминания, например, последних 30 секунд процесса.

6. Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения источника G1.

7. Включите ключ-выключатель источника G1.

8. Переключатель режима работы трехполюсного выключателя A4 установите в положение «РУЧН.».

9. Тумблеры делителей напряжения используемых каналов коннектора A9 установите в положение «1:1». Тумблер выбора режима работы общей точки аналоговых входов коннектора A9 установите в положение «AIGND».


10. Номинальные фазные напряжения трансформаторов A1, A11 и A5 выберите равными 127 В.


11. Выберите мощность индуктивной нагрузки A7 – 40 % от 40 Вар во всех фазах, активной A6 – 50% от 50 Вт во всех фазах.

12. Установите следующие параметры моделей линий электропередачи A2 и A3:  $R = 0$  Ом,  $L/R = 1,2/32$  Гн/Ом,  $C = 0$  мкФ.

13. Нажмите кнопки «ВКЛ» включения сканирования первого и второго каналов виртуального осциллографа.

14. Нажмите кнопку «ВКЛ» источника G1. Включите выключатель «СЕТЬ» трехполюсного выключателя A4.

15. Смоделируйте короткое замыкание, нажав кнопку «ВКЛ» трехполюсного выключателя A4. Через 3-5 секунд отключите выключатель A4 нажатием на кнопку «ОТКЛ» на его передней панели. Повторите эксперимент 4-5 раз. Остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить» .

16. Отобразите записанный процесс нажатием на виртуальную кнопку .

17. Используя возможности программы «Многоканальный осциллограф», проанализируйте полученные временные зависимости тока короткого замыкания и фазного напряжения. Определите по ним момент возникновения короткого замыкания относительно фазного напряжения, ударный ток, ударный коэффициент и постоянную времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

18. Для анализа влияния удаленности точки короткого замыкания от источника можно изменять положение точки КЗ и параметры моделей элементов. **Внимание! Максимальное время существования режима КЗ не должно превышать 3-5 секунд. Запрещается устраивать короткое замыкание на гнездах источника G1 и трехфазной трансформаторной группы A11.**

19. По показанию электронного осциллографа начертить график зависимости тока короткого замыкания от сопротивления.

20. Сделать вывод по работе.



### Контрольные вопросы

1. Какие виды режимов и переходных процессов имеют место в ЭЭС
2. Что называют коротким замыканием?
3. Каковы системы токов и напряжений, применяемых в ЭЭС?
4. Каковы причины возникновения переходных процессов?
5. Каковы последствия коротких замыканий в ЭЭС?
6. Каковы основные виды коротких замыканий в ЭЭС?
7. Что такое ударный ток?

### Лабораторная работа № 2

#### Переходный процесс при несимметричном коротком замыкании в электрической сети, питающейся от источника практически бесконечной мощности

*Цель работы:* изучить переходные процессы при несимметричных коротких замыканиях в электрической сети, питающейся от источника практически бесконечной мощности.

#### Основные сведения

Расчеты токов трехфазных коротких замыканий в трехфазных симметричных сетях производятся на одну фазу вследствие подобия явлений, происходящих в каждой из фаз, и равенства значений одноименных величин.

При несимметрии в произвольной точке системы сопротивления в фазах неодинаковы и по этим причинам явления по фазам различны. Неодинаковы в этом случае токи, напряжения и углы сдвига между ними в различных фазах рис. 5. Для определения токов и напряжений в любой фазе несимметричной системы необходимо составить схему замещения и написать необходимое число уравнений с учетом взаимоиндукции, что усложняет решение задач.

Сравнительно просто расчеты несимметричных режимов в трехфазных сетях осуществляются с помощью метода симметричных составляющих. Вычисление токов и напряжений в этом случае сводятся к определению этих величин при некотором фиктивном трехфазном КЗ, что дает возможность вновь воспользоваться однолинейной схемой замещения и произвести расчет на одну фазу. В этом заключается одно из основных достоинств метода симметричных составляющих.

#### *Метод симметричных составляющих*

Произвольную несимметричную систему трех векторов  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  можно разложить однозначно на три симметричные системы:

- систему векторов прямой последовательности  $\underline{A}_1$ ;  $\underline{B}_1$ ;  $\underline{C}_1$ ;
- систему векторов обратной последовательности  $\underline{A}_2$ ;  $\underline{B}_2$ ;  $\underline{C}_2$ ;

– систему векторов нулевой последовательности  $\underline{A}_0$ ;  $\underline{B}_0$ ;  $\underline{C}_0$ .

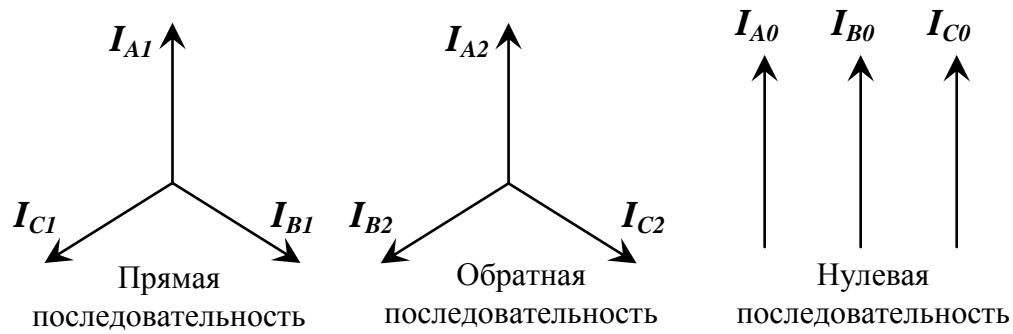


Рис.5 Расположение векторов в различных последовательностях  
Согласно условию разложения имеем:

$$\begin{aligned}\underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{B} &= \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0; \\ \underline{C} &= \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0.\end{aligned}\tag{1}$$

Для сведения уравнений к трем неизвестным вводят оператор фазы  $a$ . Модуль оператора фазы равен 1. Таким образом, если любой вектор умножить на  $a$ , то модуль вектора не изменится, а лишь произойдет его поворот на  $120^\circ$  против часовой стрелки. Благодаря этому свойству можно векторы каждой из симметричных систем (прямой, обратной, нулевой) выразить через один вектор той же системы, т. е. три неизвестных в уравнении свести к одному.

Оператор фазы  $a$  определяется из соотношений:

$$\begin{aligned}a &= e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^3 = e^{j360^\circ} = 1.\end{aligned}$$

Если принять в качестве основной фазу  $A$ , то систему (1) при помощи оператора фазы  $a$  можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{B} &= a^2 \underline{A}_1 + a \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{C} &= a \underline{A}_1 + a^2 \underline{A}_2 + \underline{A}_0.\end{aligned}\tag{2}$$

Совместное решение системы уравнений дает:

$$\underline{A}_1 = (\underline{A} + a \underline{B} + a^2 \underline{C}) / 3;$$

$$\underline{A}_2 = (\underline{A} + a^2 \underline{B} + a \underline{C}) / 3;$$

$$\underline{A}_0 = (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}) / 3.$$

Степень несимметрии трехфазной системы оценивается коэффициентами несимметрии и неуравновешенности системы.

Абсолютная величина отношения составляющей обратной последовательности к прямой называется коэффициентом несимметрии системы.

$$b = |A_2 / A_1|$$

Абсолютная величина отношения составляющей нулевой последовательности к прямой называется коэффициентом неуравновешенности системы.

$$k = |A_0 / A_1|$$

Системы прямой и обратной последовательности являются симметричными и уравновешенными, а система нулевой последовательности является симметричной, но неуравновешенной. Система нулевой последовательности может существовать только в неуравновешенных системах, которые характеризуются следующим условием:  $\underline{A} + \underline{B} + \underline{C} \neq 0$ .

Геометрическая сумма неуравновешенной системы фазных токов равна утроенному току нулевой последовательности, который протекает в земле или нулевом проводе.

# Электрическая схема соединений

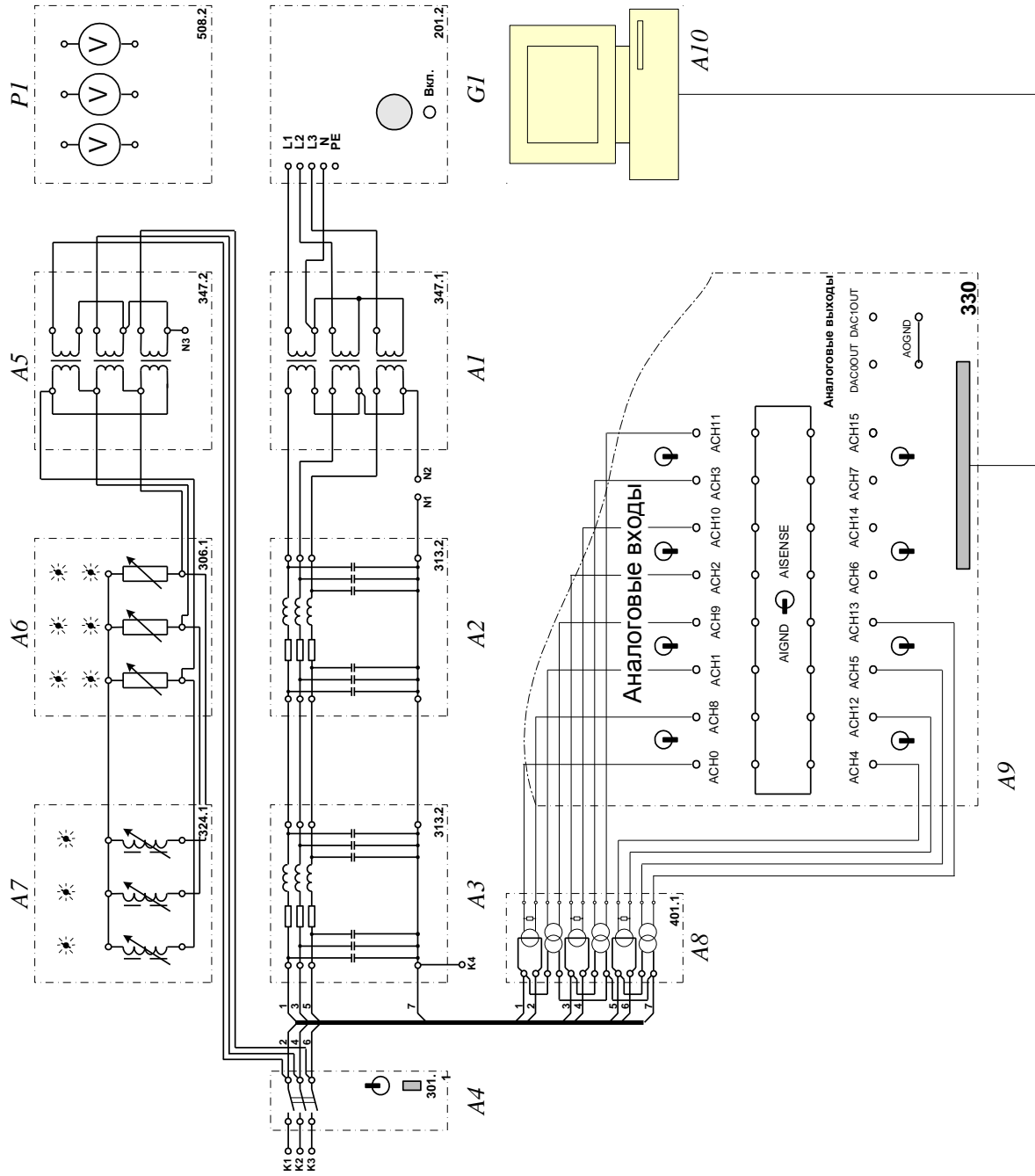


Таблица 2

**Перечень аппаратуры**

Обозначение	Наименование	Параметры
A1	Трехфазная трансформаторная группа	3 x 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A2, A3	Модель линии электропередачи	400 В~; 3x0,5 А 0...1,5 Гн/ 0...50 Ом 0...2x0,45 мкФ 0...250 Ом
A4	Трехполюсный выключатель	400 В ~; 10 А
A5	Трехфазная трансформаторная группа	3 x 80 В·А; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 / 230 В (треугольник)
A6	Активная нагрузка	220/380 В; 50Гц; 3x0...50 Вт
A7	Индуктивная нагрузка	220/380 В; 50Гц; 3x40 Вар
A8	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	3 трансформатора напряжения 600 / 3 В; 3 трансформатора тока 0,3 А / 3 В
A9	Коннектор	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
A10	Персональный компьютер	IBM совмести- мый, Windows XP, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора ин- формации PCI 6024E
G1	Трехфазный источник питания	400 В ~; 16 А
P1	Блок мультиметров	3 цифровых мультиметра

**Порядок выполнения работы**

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.
3. Соедините вилки питания 220 В устройств, используемых в эксперименте, сетевыми шнурами с розетками удлинителя.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Смоделируйте интересующий вид короткого замыкания. Для моделирования трехфазного замыкания соедините точки K1, K2, K3 и K4; двухфазного – K1 и K2; двухфазного на землю – K1, K2 и K4; однофазного – K1 и K4.
6. Смоделируйте режим работы нейтралей трансформаторов исследуемой сети. Для моделирования глухозаземленной нейтрали соедините точки N1 (N3) и N2. Для случая изолированной нейтрали оставьте эти точки несоединенными.
7. Номинальные фазные напряжения трансформаторов A1 и A5 выберите равными 127 В.
8. Выберите мощность индуктивной нагрузки A7 – 100 % от 40 Вар во всех фазах, активной A6 – 10% от 50 Вт во всех фазах.
9. Переключатель режима работы выключателя A4 установите в положение «РУЧН.».
10. Установите следующие параметры моделей линий электропередачи A2 и A3:  $R = 200 \text{ Ом}$ ,  $L/R = 1,2/32 \text{ Гн/Ом}$ ,  $C = 0 \text{ мкФ}$ .
11. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A10 и запустите программу «Многоканальный осциллограф».
12. Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения источника G1.
13. Включите ключ-выключатель источника G1.
14. Для регистрации токов фаз выберите сканирование каналов АСН0-АСН8, АСН2-АСН10, АСН4-АСН12; для регистрации напряжений выберите каналы АСН1-АСН9, АСН3-АСН11, АСН5-АСН13. Отобразите панель цифровых индикаторов нажатием на виртуальную кнопку <sup>123</sup>. Настройте панель на регистрацию действующих значений сигналов. Выберите подходящие множители (0,1 для токов и 200 – для напряжений).
15. Для измерения токов и напряжений схемы также можно использовать блок мультиметров P1.
16. Нажмите кнопки «ВКЛ» включения сканирования первого, второго и третьего каналов виртуального осциллографа.
17. Нажмите кнопку «ВКЛ» источника G1. Включите выключатель «СЕТЬ» трехполюсного выключателя A5.
18. Смоделируйте короткое замыкание, нажав кнопку «ВКЛ» трехполюсного выключателя A4. По цифровым индикаторам определите значения установившихся токов и напряжений при коротком замыкании.

19. Отключите выключатель А4 нажатием на кнопку «ОТКЛ» на его передней панели.

20. Для анализа влияния удаленности точки короткого замыкания от генератора можно изменять положение точки КЗ и параметры моделей элементов. **Внимание! Запрещается моделировать короткие замыкания при суммарном индуктивном сопротивлении линий менее 0,6 Гн. Запрещается моделировать однофазное КЗ на землю при емкостях фаз линий более 0,18 мкФ.**

21. По показаниям электронного осциллографа начертить графики режимов коротких замыканий: нормальный режим (токи), двухфазное короткое замыкание, двухфазное короткое замыкание на землю, однофазное короткое замыкание, нормальный режим (напряжения), трехфазное короткое замыкание (симметричное), двухфазное короткое замыкание, двухфазное короткое замыкание на землю, однофазное короткое замыкание.

22. Сделать вывод по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Укажите основные положения метода симметричных составляющих.
2. К чему сводится расчёт несимметричных режимов при использовании метода симметричных составляющих?
3. Как составляются схемы замещения прямой, обратной, нулевой последовательностей?
4. Как определяются сопротивления обратной и нулевой последовательностей трёхобмоточных трансформаторов?

### **Лабораторная работа № 3**

#### **Переходный процесс при обрыве фазы в электрической сети, питающейся от источника практически бесконечной мощности**

*Цель работы:* изучить переходный процесс при обрыве фазы в электрической сети, питающейся от источника практически бесконечной мощности.

#### **Основные сведения**

В трехфазных электрических цепях возможны поперечные и продольные несимметрии. К первым относятся несимметричные короткие замыкания, т.е. замыкания между какими-либо двумя фазами, а также между одной или двумя фазами и землей, ко вторым — несимметрии, обусловленные последовательно включенными в разные фазы элементами, обладающими сопротивлением, а также обрывами проводников одной или двух фаз.

В отличие от несимметричных коротких замыканий, которые быстро отключаются под действием релейной защиты, несимметричные режимы,

вызванные продольной несимметрией, могут быть продолжительными (например, при обрыве провода воздушной линии электропередачи), что негативно влияет на электрические машины.

Все электрические машины проектируются для работы при симметричной нагрузке, когда токи во всех фазах одинаковы, поэтому допускают лишь небольшую несимметрию токов. Особенно нежелательны несимметричные режимы для турбогенераторов, что объясняется следующим. Магнитное поле, обусловленное током обратной последовательности якоря, индуцирует ЭДС двойной частоты не только в обмотке возбуждения, но и в массиве ротора. При столь высокой частоте магнитные потоки и вызванные ими токи не могут проникнуть глубоко в толщу ротора, поэтому все электромагнитные переходные процессы, связанные с наличием в машине обратно вращающегося магнитного поля, совершаются в тонком внешнем слое «бочки» и деталей ротора, что приводит к большим потерям энергии и нагреву поверхности ротора.

Еще более опасным является нагрев пазовых клиньев ротора. Если в основной части ротора токи двойной частоты направлены вдоль зубцов, т.е. параллельно оси ротора, то вблизи его торцов эти токи, образуя замкнутый контур, изменяют направление и пересекают поверхности соприкосновения пазовых клиньев с зубцами ротора. Сопротивление некоторых контактов может оказаться большим, чем остальных, поэтому энергия будет выделяться в основном в контактах с большим сопротивлением, что приведет к высоким местным нагревам пазовых клиньев, их размягчению и опасности «вытекания» из пазов под действием центробежных сил.

Выделение тепла на поверхности ротора вызывает также дополнительный нагрев обмотки возбуждения турбогенератора, что в ряде случаев приводит к необходимости снижать ток возбуждения и соответственно нагрузку генератора.

Сказанным, однако, не ограничивается отрицательное влияние токов обратной последовательности на синхронные генераторы. Как у турбогенераторов, так и у гидрогенераторов при несимметрии токов якоря одна из его фаз оказывается перегруженной. Например, при обрыве провода одной из фаз воздушной линии электропередачи и связи этой линии с генератором с помощью трансформатора, имеющего группу соединения обмоток  $Y_0/A-11$ , перегруженной оказывается фаза генератора, следующая по порядку за оборванной. Кроме этого, появление в якоре синхронного генератора тока обратной последовательности приводит к механическим вибрациям машины, что является следствием магнитной и электрической несимметрии ее ротора. Особенно существенно вибрации проявляются в гидрогенераторах.

Таким образом, задача расчета тока обратной последовательности при продольной несимметрии и выбора мер по его уменьшению является весьма важной.



Для расчета продольных несимметричных режимов линейных трехфазных электрических цепей можно использовать следующие методы:

1) метод, при котором в систему уравнений, описывающих состояние соответствующей электрической цепи, входят действительные (полные) токи и напряжения фаз;

2) метод симметричных составляющих, который основан на представлении любой трехфазной системы величин (токов, напряжений и т.п.) в виде суммы в общем случае трех симметричных систем соответствующих величин, называемых симметричными составляющими системами данной несимметричной системы величин.

При расчете токов и напряжений продольной несимметрии, вызванной обрывом одной или двух фаз трехфазной цепи и включением в эту цепь несимметричного элемента принимаются следующие исходные условия:

1) несимметрия возникает между двумя частями **G** и **F** расчетной схемы (рис. 6), причем индуктивные сопротивления всех элементов этой схемы известны, а их активные сопротивления незначительны и не учитываются;

2) обрыв фазы (фаз) или включение несимметричного элемента происходит между точками **L** и **L'** расстояние между которыми до появления продольной несимметрии бесконечно мало (т.е. сопротивление соответствующей части проводника можно принимать равным нулю);

3) расчетные токи положительны, если они направлены от части **G** к части расчетной схемы **F** (т.е.  $E_G > E_F$ )

4) при возникновении продольной несимметрии имеются условия для циркуляции токов нулевой последовательности.

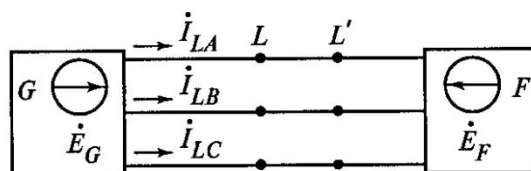


Рис. 6. Исходная расчётная схема

Все ЭДС самоиндукции, индуцируемые в цепи якоря синхронной машины магнитными полями, обусловленными токами прямой, обратной и нулевой последовательностей, целесообразно учитывать в виде взятых с обратным знаком падений напряжения от этих токов в соответствующих сопротивлениях, что позволяет ЭДС обратной и нулевой последовательностей принимать равными нулю. При этом симметричные составляющие падений напряжения в месте несимметрии связаны с симметричными составляющими токов соотношениями (они справедливы как для особой, так и для любой другой фазы):

$$\Delta U_{LA1} = E_{\text{ЭК}} - jX_{L1\text{ЭК}} \times I_{LA1};$$

$$\Delta U_{LA2} = 0 - jX_{L2Эк} \times I_{LA2};$$

$$\Delta U_{L0} = 0 - jX_{L0Эк} \times I_{L0},$$

где  $X_{L1Эк}$ ,  $X_{L2Эк}$  и  $X_{L0Эк}$  — эквивалентные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно места продольной несимметрии.

### Электрическая схема соединений

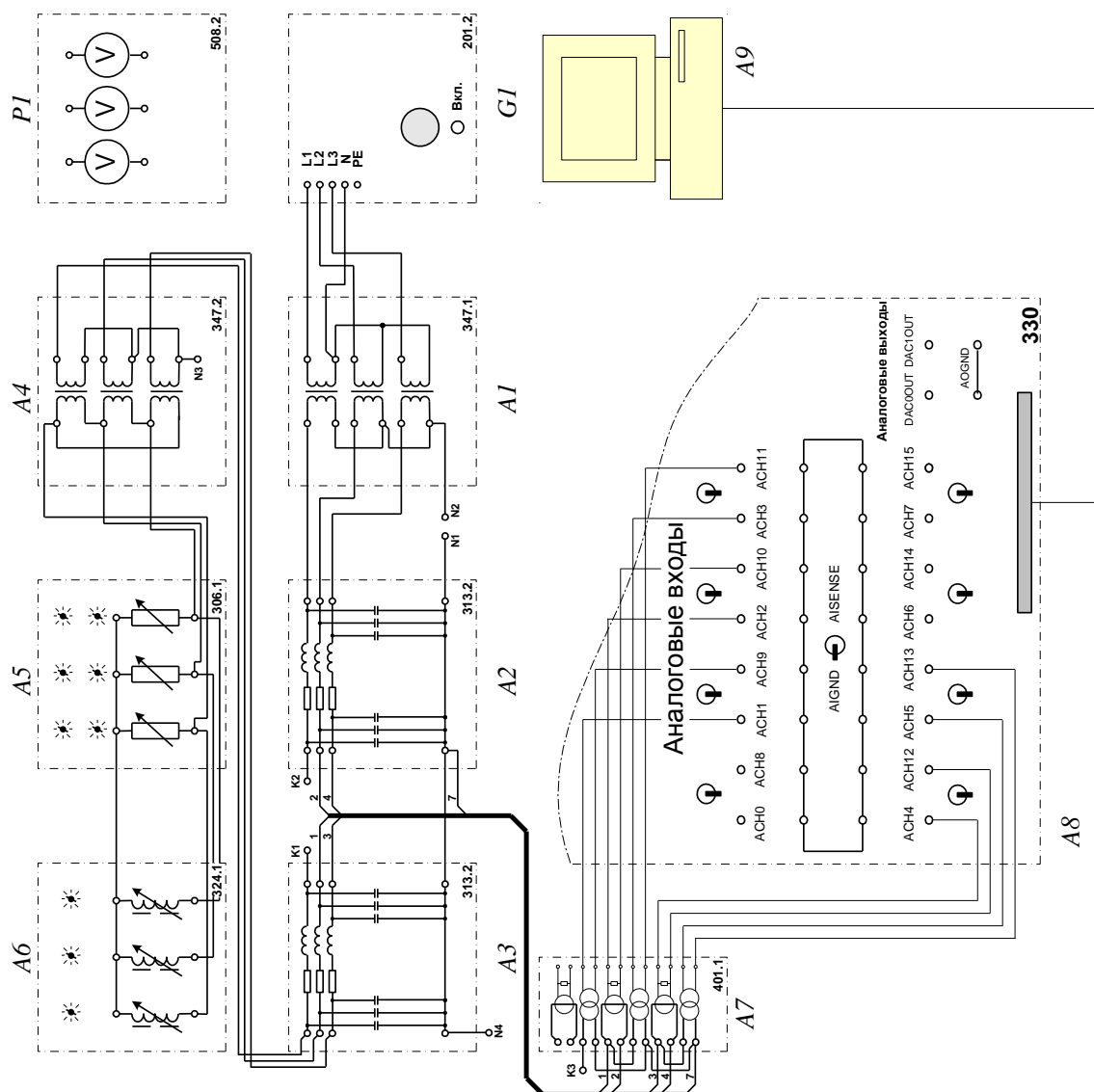


Таблица 3

**Перечень аппаратуры**

Обозначение	Наименование	Параметры
A1	Трехфазная трансформаторная группа	3 x 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A2, A3	Модель линии электропередачи	400 В~; 3x0,5 А 0...1,5 Гн/ 0...50 Ом 0...2x0,45 мкФ 0...250 Ом
A4	Трехфазная трансформаторная группа	3 x 80 В·А; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 / 230 В (треугольник)
A5	Активная нагрузка	220/380 В; 50Гц; 3x0...50 Вт
A6	Индуктивная нагрузка	220/380 В; 50Гц; 3x40 Вар
A7	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	3 трансформатора напряжения 600 / 3 В; 3 трансформатора тока 0,3 А / 3 В
A8	Коннектор	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
A9	Персональный компьютер	IBM совмести- мый, Windows XP, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора ин- формации PCI 6024E
G1	Трехфазный источник питания	400 В ~; 16 А
P1	Блок мультиметров	3 цифровых мультиметра

**Порядок выполнения работы**

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

3. Соедините вилки питания 220 В устройств, используемых в эксперименте, сетевыми шнурами с розетками удлинителя.

4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

5. Смоделируйте режим работы сети – соедините точки K1 и K2 для нормального режима работы сети, разъедините их – для аварийного режима (обрыв фазы).

6. Соедините точки K1 (K2) и K3 для фиксации напряжения в точке разрыва с той или другой стороны от него.

7. Смоделируйте режим работы нейтралей трансформаторов исследуемой сети. Для моделирования глухозаземленной нейтрали соедините точки N1 и N2, N3 и N4. Для случая изолированной нейтрали оставьте эти точки несоединенными.

8. Номинальные фазные напряжения трансформаторов A1 и A4 выберите равными 127 В.

9. Выберите мощность индуктивной нагрузки A6 – 100 % от 40 Вар во всех фазах, активной A5 – 10% от 50 Вт во всех фазах.

10. Установите следующие параметры моделей линий электропередачи A2 и A3:  $R = 0$  Ом,  $L/R = 1,2/32$  Гн/Ом,  $C = 0,18$  мкФ.

11. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A9 и запустите программу “Многоканальный осциллограф”.

12. Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения источника G1.

13. Включите ключ-выключатель источника G1.

14. С помощью выпадающих списков выберите каналы, подлежащие сканированию. Отобразите панель цифровых индикаторов нажатием на виртуальную кнопку <sup>123</sup>. Настройте панель на регистрацию действующих значений сигналов. Выберите подходящие множители (0,1 для токов и 200 – для напряжений). Для измерения токов и напряжений схемы также можно использовать блок мультиметров P1.

15. Нажмите кнопки «ВКЛ» включения сканирования используемых каналов виртуального осциллографа.

16. Нажмите кнопку «ВКЛ» источника G1. Включите выключатель «СЕТЬ» трехполюсного выключателя A5.

17. По цифровым индикаторам определите значения установившихся токов и напряжений. Измените режим работы сети (с нормального на аварийный или наоборот). Вновь определите значения установившихся токов и напряжений.

18. Для анализа влияния удаленности точки короткого замыкания от генератора можно изменять положение точки КЗ и параметры моделей элементов.

19. По окончании эксперимента отключите все блоки, задействованные в нем.

### Контрольные вопросы

1. Почему несимметричные режимы, вызванные продольной несимметрией, могут быть продолжительными?
2. Какие существуют виды однократной продольной несимметрии?
3. Каким образом продольная несимметрия влияет на электрические машины?
4. Какие исходные условия обычно принимают при расчетах продольной несимметрии?
5. Какое обстоятельство позволяет при расчете несимметричных повреждений принимать ЭДС обратной и нулевой последовательностей синхронной машины равными нулю?

### Лабораторная работа № 4

#### Переходный процесс при двойном замыкании на землю в электрической сети с изолированной нейтралью, питающейся от источника практически бесконечной мощности

*Цель работы:* изучить переходный процесс при двойном замыкании на землю в электрической сети с изолированной нейтралью, питающейся от источника практически бесконечной мощности.

#### Основные сведения

Предположим в точке К между фазами В и С происходит металлическое двухфазное КЗ ( $K^{(2)}$ ) (рис.7).

При двухфазном КЗ токи нулевой последовательности отсутствуют, поэтому нужно иметь только две схемы замещения – прямой и обратной последовательности, результирующие сопротивления которых равны  $X_{1c}$  и  $X_{2c}$ .

Уравнения:

$$\underline{U}_{K1} = E_1 - j\underline{I}_{KA1} \cdot X_{1c};$$

$$\underline{U}_{K2} = 0 - j\underline{I}_{KA2} \cdot X_{2c};$$

$$\underline{U}_{K0} = 0 - j\underline{I}_{KA0} \cdot X_{0c}$$

должны быть дополнены еще тремя граничными условиями:

$$\underline{I}_{\kappa A} = 0; \underline{U}_{\kappa B} - \underline{U}_{\kappa C} = 0, \underline{I}_{\kappa C} + \underline{I}_{\kappa B} = 0. \quad (1)$$

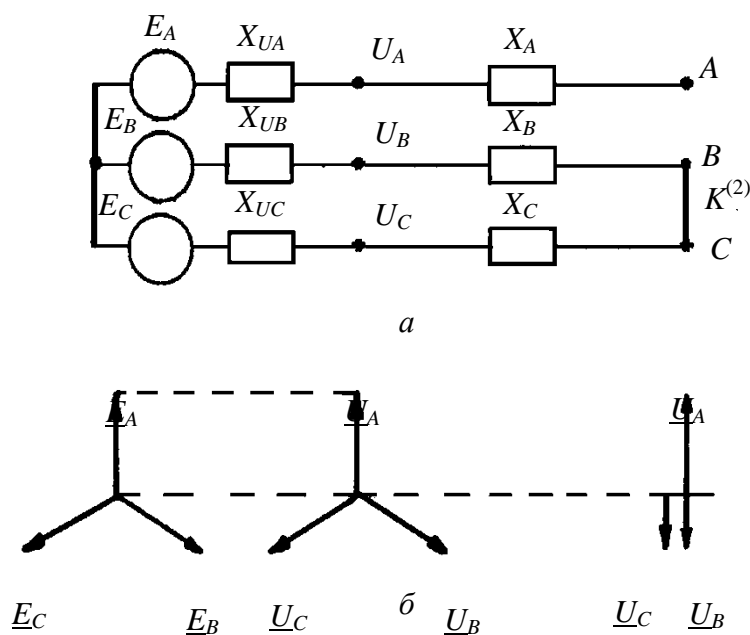


Рис. 7 Принципиальная схема (а), векторные диаграммы напряжений в системе электроснабжения (б) при двухфазном КЗ.

Поскольку ток через землю отсутствует, то  $I_{\kappa 0} = 0$ . Следовательно, учитывая (1), можно переписать  $\underline{I}_{\kappa A} = \underline{I}_{\kappa A1} + \underline{I}_{\kappa A2} = 0$ .

Отсюда

$$\underline{I}_{\kappa A1} = -\underline{I}_{\kappa A2}. \quad (2)$$

Токи поврежденных фаз в месте КЗ выразим через ток

$$\underline{I}_{\kappa B} = a^2 \underline{I}_{\kappa A1} + a \underline{I}_{\kappa A2} = (a^2 - a) \underline{I}_{\kappa A1} = -j\sqrt{3} \underline{I}_{\kappa A1} \quad (3)$$

и согласно (1)  $\underline{I}_{\kappa C} = j\sqrt{3} \underline{I}_{\kappa A1}$ .

Таким образом, токи в фазах в месте КЗ будут:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\kappa A} &= 0, \\ \underline{I}_{\kappa B} &= -j\sqrt{3} \underline{I}_{\kappa A1}, \\ \underline{I}_{\kappa C} &= j\sqrt{3} \underline{I}_{\kappa A1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выразим  $\underline{U}_{\kappa B}$  и  $\underline{U}_{\kappa C}$  через симметричные составляющие напряжения фазы  $A$ :

$$\begin{aligned} a^2 \underline{U}_{\kappa A1} + a \underline{U}_{\kappa A2} + \underline{U}_{\kappa 0} - a \underline{U}_{\kappa A1} - a^2 \underline{U}_{\kappa A2} - \underline{U}_{\kappa 0} &= 0; \\ (\underline{U}_{\kappa A1} - \underline{U}_{\kappa A2})(a^2 - a) &= 0, \end{aligned}$$

откуда:

$$\underline{U}_{\kappa A2} = \underline{U}_{\kappa A1}. \quad (5)$$

Фазные напряжения в месте КЗ составляют:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\kappa A} &= \underline{U}_{\kappa A1} + \underline{U}_{\kappa A2} = 2\underline{U}_{\kappa A1}; \\ \underline{U}_{\kappa B} = \underline{U}_{\kappa C} &= a^2 \underline{U}_{\kappa A1} + a \underline{U}_{\kappa A2} = -\underline{U}_{\kappa A1} = -\underline{U}_{\kappa A} / 2, \end{aligned}$$

тогда:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\kappa(2)A} &= 2j\underline{I}_{\kappa A1} \cdot X_{1C}; \\ \underline{U}_{\kappa(2)B} &= -j\underline{I}_{\kappa A1} \cdot X_{2C}; \\ \underline{U}_{\kappa(2)C} &= -j\underline{I}_{\kappa A1} \cdot X_{0C}, \end{aligned} \quad (6)$$

т. е. напряжение в неповрежденной фазе в два раза выше напряжения поврежденных фаз и противоположно по знаку.

Соотношение (5) позволяет приравнять правые части, т. е.

$$E_{A1} - \underline{I}_{\kappa A1} \cdot jX_{1c} = -\underline{I}_{\kappa A2} \cdot jX_{2c}.$$

Заменив  $\underline{I}_{\kappa A2} = -\underline{I}_{\kappa A1}$ , последнее соотношение переписывается так:

$$E_A - \underline{I}_{\kappa A1} \cdot jX_{1c} - \underline{I}_{\kappa A1} \cdot jX_{2c} = 0,$$

откуда

$$\underline{I}_{\kappa A1} = \frac{E_{A1}}{j(x_{1c} + x_{2c})}. \quad (7)$$

Комплексная схема замещения двухфазного КЗ, для фазы  $A$  представлена на рис. 8.

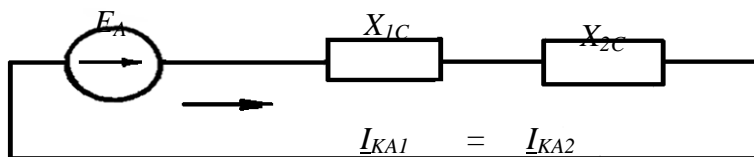


Рис. 8. Комплексная схема замещения двухфазного КЗ

Полученные соотношения (2) и (5) между симметричными составляющими токов и напряжений отдельных последовательностей позволяют построить векторные диаграммы токов и напряжений в месте КЗ рис 9.

*Выводы из анализа двухфазного КЗ*

1. Резко нарушается симметрия токов и напряжений.
2. Фазные напряжения в месте КЗ равны половине нормального фазного напряжения.
3. Напряжение обратной последовательности в месте КЗ также равно половине фазного нормального напряжения.
4. В начале линии треугольник линейных напряжений искажен.
5. Ток нулевой последовательности отсутствует.

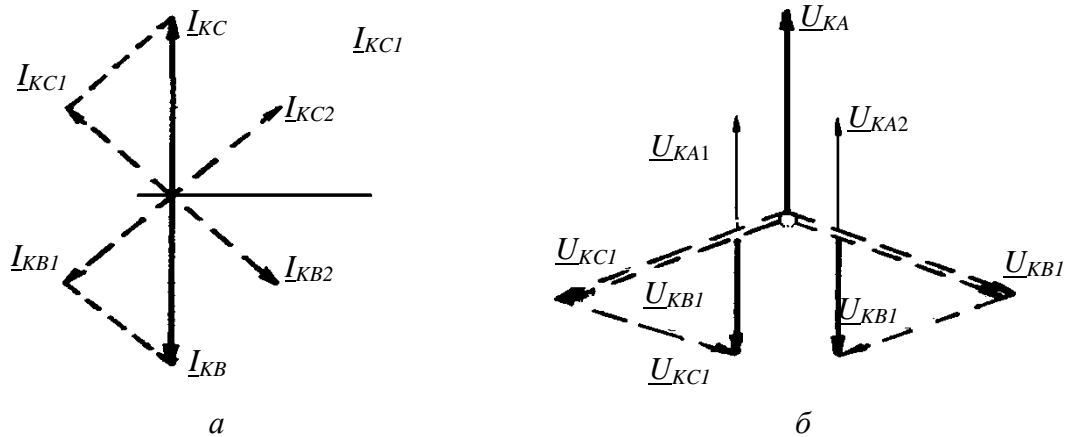


Рис. 9. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) при двухфазном КЗ



# Электрическая схема соединений

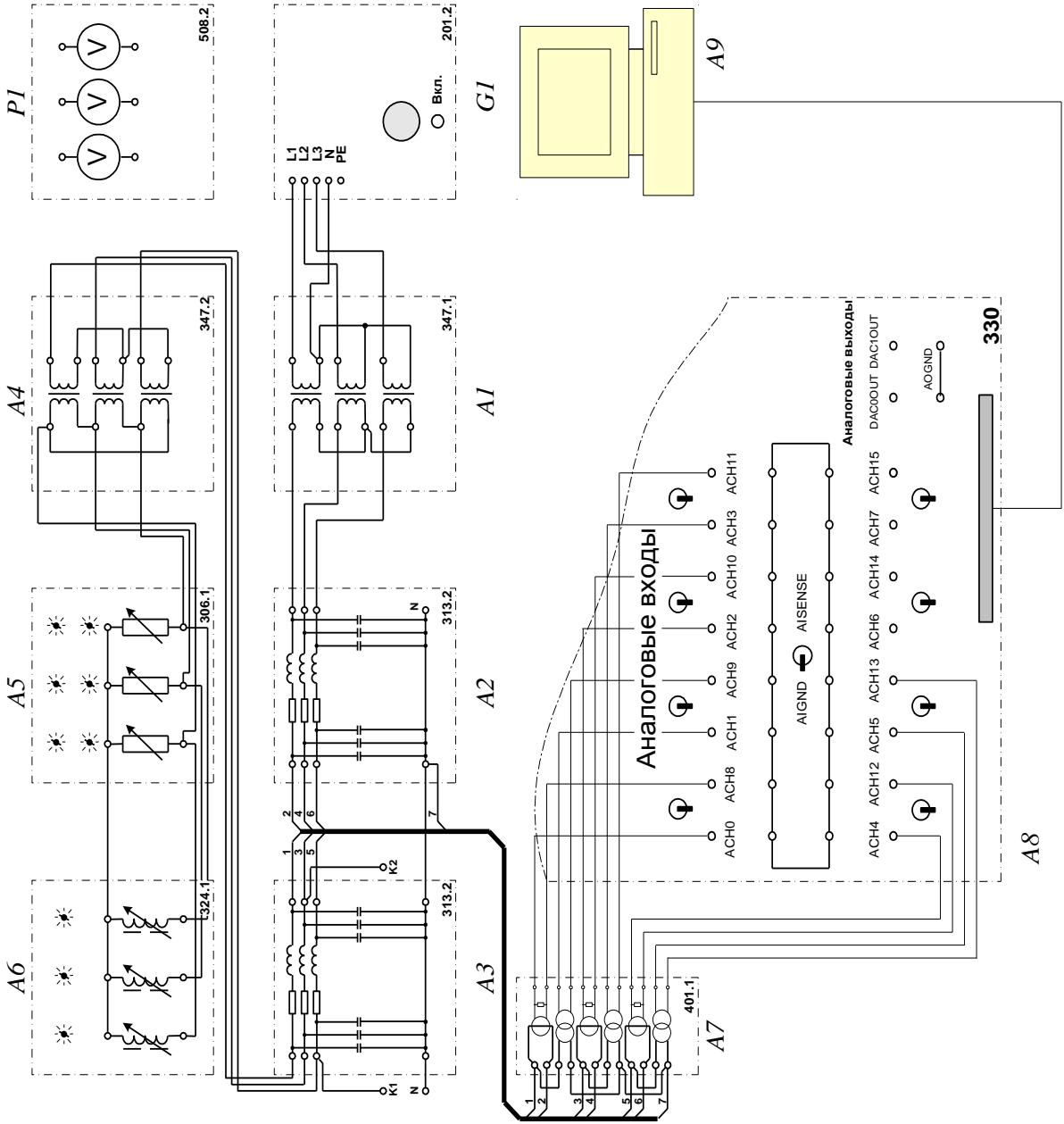


Таблица 4

## Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Параметры
A1	Трехфазная трансформаторная группа	3 x 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A2, A3	Модель линии электропередачи	400 В~; 3x0,5 А 0...1,5 Гн/ 0...50 Ом 0...2x0,45 мкФ 0...250 Ом
A4	Трехфазная трансформаторная группа	3 x 80 В·А; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 / 230 В (треугольник)
A5	Активная нагрузка	220/380 В; 50Гц; 3x0...50 Вт
A6	Индуктивная нагрузка	220/380 В; 50Гц; 3x40 Вар
A7	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	3 трансформатора напряжения 600 / 3 В; 3 трансформатора тока 0,3 А / 3 В
A8	Коннектор	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
A9	Персональный компьютер	IBM совмести- мый, Windows XP, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора ин- формации PCI 6024E
G1	Трехфазный источник питания	400 В ~; 16 А
P1	Блок мультиметров	3 цифровых мультиметра

## Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2. Соедините гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

3. Соедините вилки питания 220 В устройств, используемых в эксперименте, сетевыми шнурами с розетками удлинителя.

4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

5. Смоделируйте режим работы сети:

- соедините точки K1 и N для режима однофазного замыкания;
- соедините точки K1 и N, K2 и N для режима двойного замыкания;
- для нормального режима работы сети дополнительные соединения не требуются.

6. Номинальные фазные напряжения трансформаторов A1 и A4 выберите равными 127 В.

7. Выберите мощность индуктивной нагрузки A6 – 100 % от 40 Вар во всех фазах, активной A5 – 10% от 50 Вт во всех фазах.

8. Установите следующие параметры моделей линий электропередачи A2 и A3:  $R = 0$  Ом,  $L/R = 1,2/32$  Гн/Ом,  $C = 0,18$  мкФ.

9. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A9 и запустите программу "Многоканальный осциллограф".

10. Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения источника G1.

11. Включите ключ-выключатель источника G1.

12. С помощью выпадающих списков выберите каналы, подлежащие сканированию. Отобразите панель цифровых индикаторов нажатием на виртуальную кнопку <sup>12</sup>3. Настройте панель на регистрацию действующих значений сигналов. Выберите подходящие множители (0,1 для токов и 200 – для напряжений). Для измерения токов и напряжений схемы также можно использовать блок мультиметров P1.

13. Нажмите кнопки «ВКЛ» включения сканирования используемых каналов виртуального осциллографа.

14. Нажмите кнопку «ВКЛ» источника G1. Включите выключатель «СЕТЬ» трехполюсного выключателя A5.

15. По цифровым индикаторам определите значения установившихся токов и напряжений. Измените режим работы сети. Вновь определите значения установившихся токов и напряжений.

16. Для анализа влияния удаленности точки короткого замыкания от генератора можно изменять положение точки K3 и параметры моделей элементов.

17. По окончании эксперимента отключите все блоки, задействованные в нем.

18. По показаниям электронного осциллографа начертить графики зависимостей.

19. Сделать вывод по работе.

### Контрольные вопросы

1. Какие виды повреждений называют сложными?
2. Какие сложные виды повреждений наиболее часто имеют место в трёхфазных СЭС?
3. Каковы граничные условия для двойного замыкания на землю?
4. Какова последовательность действий при анализе сложных видов повреждений?

### Лабораторная работа № 5

#### Способы ограничения токов короткого замыкания

*Цель работы:* изучить методы ограничения токов короткого замыкания.

#### Основные сведения

По уровню токов и мощностей КЗ осуществляют выбор сечения шин, токопроводов, проводов и кабелей, отключающую и коммутационную способность аппаратов, электродинамическую и термическую стойкость токоведущих частей и конструкций электрооборудования. Выбор электрооборудования по факторам аварийного режима не только означает предъявление более жестких требований к его техническим характеристикам, но и свидетельствует о соответствующем росте его стоимостных показателей.

При проектировании ЭЭС решается техникоэкономическая задача ограничения уровней токов и мощностей КЗ до значений, допустимых параметрами электрооборудования, которые экономически целесообразно применять. В процессе развития ЭЭС при включении новых источников электрической энергии возникает задача ограничения уровней токов и мощностей КЗ, если они превышают параметры установленного электрооборудования. При ее решении используют различные меры, направленные на увеличение сопротивления цепи КЗ, локализацию в аварийном режиме источников ее питания и отключение поврежденной электрической сети за время  $t < 1/(4f)$  (для частоты тока  $f = 50$  Гц оно составляет  $t < 5$  мс).

К таким методам относятся: выбор структуры и схемы электрических соединений элементов ЭЭС; автоматическое деление электрической сети; выбор режима ее эксплуатации; выбор схем коммутации; применение оборудования с повышенным электрическим сопротивлением; использование быстродействующих коммутационных аппаратов; изменение режима нейтрали элементов сети.

### *Применение технических средств ограничения токов КЗ*

Реализация различных способов ограничения токов КЗ предусматривает применение специальных технических средств, которые непосредственно, благодаря своему конструктивному исполнению, ограничивают значение или продолжительность воздействия тока КЗ либо используются в схемах соединения элементов, выполняющих в совокупности эту функцию. К таким средствам относятся:

- аппараты и устройства, реализующие автоматическое деление сети;
- силовые трансформаторы и автотрансформаторы с особым исполнением конструкции и соединения фазных обмоток;
- токоограничивающие элементы и устройства;
- токоограничивающие коммутационные аппараты;
- устройства изменения режима работы нейтрали силовых трансформаторов.

### *Оптимизация уровней токов КЗ*

Система электроснабжения является небольшой частью ЭЭС, где происходит формирование исходного при проектировании уровня токов короткого замыкания. Если собственных источников электрической энергии СЭС не содержит, то наибольшее значение мощности короткого замыкания будет на границе раздела с питающей энергетической системой. При наличии собственных источников наибольшее значение мощности короткого замыкания определяется их мощностью, мощностью короткого замыкания, поступающей от ЭЭС, и электрической удаленностью источников электрической энергии друг от друга.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие способы ограничения мощностей и токов короткого замыкания можно использовать при проектировании ЭЭС?
2. Какие технические средства применяются для ограничения токов короткого замыкания?
3. Как включаются токоограничивающие реакторы (одноцепные и сдвоенные) в СЭС?
4. В чем суть постановки задачи оптимизации уровня токов короткого замыкания при проектировании и эксплуатации СЭС? Какие технические средства и способы ограничения токов короткого замыкания при этом используются?
5. Как влияют мощность и ток короткого замыкания на технико-экономические показатели элементов СЭС и качество электрической энергии?

### Библиографический список

1. ГОСТ 2 7514-87 Короткие замыкания в электроустановках. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
2. Винославский В.Н., Пивмяк Г.Г. и др. Переходные процессы в системах электроснабжения. – К.: Вища школа, 1989.
3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. Куликов Ю.А. Переходные процессы в ЭЭС. –М.: Издательство АСТ, 2003. – 283 с.
5. ГОСТ Р 50270-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 60 с.
6. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД 153-34.0-20.527-98

Учебное издание

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
для студентов очной и заочной форм обучения  
специальности 140211 – Электроснабжение и направления бакалавриата 140200  
«Электроэнергетика»

Составители: **Виноградов** Анатолий Алексеевич  
**Нестеров** Михаил Никитович  
**Килин** Станислав Витальевич  
**Сингатулин** Роман Сергеевич

Подписано в печать 23.04.12. Формат 60 x 84/16. Усл. печ. л. 3,4. Уч.-изд. л. 3,6.  
Тираж 119 экз.      Заказ      Цена  
Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете  
им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46