

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра электроснабжения промышленных предприятий

В.Т.ПИЛИПЕНКО

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ 140211.65 «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»
И 149204.65 «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения высшего
профессионального образования – «Оренбургский государственный
университет»

Оренбург 2009

УДК 621.311 (07)

ББК 31.297

П-32

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент В.М.Вакулюк

Пилипенко В.Т.

П 32 **Переходные процессы в электроэнергетических системах: методические указания к лабораторным работам для студентов специальностей 140211.65 «Электроснабжение» и 140204.65 «Электрические станции»/В.Т.Пилипенко. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008.- 55 с.**

Приводятся описание лабораторных стендов, особенности и порядок проведения экспериментов, целью которых является изучение электромагнитных переходных процессов при коротких замыканиях в системах электроснабжения и электроэнергетических системах.

Также в методические указания включены необходимые теоретические сведения по темам лабораторных работ.

ББК 31.297

П $\frac{2202090000}{6Л9-2009}$

© Пилипенко В.Т., 2009

© ГОУ ОГУ, 2009

Содержание

1 Общие сведения.....	4
1.1 Общие рекомендации.....	4
1.2 Описание лабораторного стенда.....	4
2 Лабораторная работа №1 Исследование переходного процесса при трёхфазном коротком замыкании в цепи, питающейся от источника неограниченной мощности.....	12
3 Лабораторная работа №2 Влияние АРВ синхронного генератора на характер переходного процесса и его показатели при трёхфазном коротком замыкании.....	19
4 Лабораторная работа №3 Анализ переходного процесса при различных видах несимметричного короткого замыкания.....	34
5 Лабораторная работа №4 Исследование переходных процессов при замыкании на землю в распределительных сетях 6-35 кВ.....	49

1 Общие сведения

1.1 Общие рекомендации

Цель лабораторного исследования достигается наилучшим образом, если выполнению эксперимента (на физической модели или машинного) предшествует определённая подготовительная работа. Перед приходом в лабораторию студент должен изучить теорию вопроса, предлагаемого к исследованию.

Домашняя подготовка студента предполагает внимательное ознакомление с методическим руководством по соответствующей работе. При этом отдельные вопросы теории, которые представляются недостаточно ясными, должны быть дополнительно проработаны по учебникам.

В ходе предварительной подготовки студент должен изучить необходимые электрические схемы, записать расчётные формулы, выполнить, если нужно, предварительные расчёты, составить таблицы для занесения результатов расчётов и экспериментов.

К очередной лабораторной работе допускаются только студенты, защитившие предыдущую работу, представившие материал в виде расчётов, схем и таблиц по новой работе, а также ответившие на ряд контрольных вопросов по теме этой работы.

1.2 Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд – комплекс «Модель электрическая системы» имеет модульную конструкцию и состоит из 17 блоков (модулей), каждый из которых имеет своё назначение. В качестве источника питания могут использоваться:

- модуль трёхфазной сети, как источник неограниченной мощности;
- электромашинный агрегат, состоящий из приводного асинхронного двигателя и синхронного генератора, как генератор электрической станции.

Практически все модули, входящие в состав стенда, имеют трёхфазное исполнение. Некоторые из них позволяют регулировать значения отдельных параметров или управлять работой других модулей. На схемах, приведенных в настоящих указаниях, каждый модуль выделен пунктирным прямоугольником.

Особенностью стенда является возможность автоматического управления работой отдельных модулей с помощью персонального компьютера, а также вывода на монитор ПК графиков переходных процессов. Модули, которые поддерживают режим автоматического управления от персонального компьютера, содержат в обозначении знак стрелки:



При этом подразумевается аналоговое и (или) дискретное управление по нескольким сигнальным проводам. В схемах работ, не использующих автоматическое (дистанционное) управление, знак стрелки не указывается.

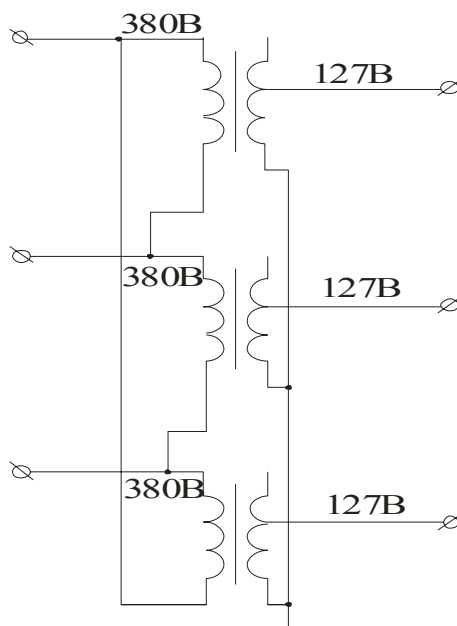
Ниже приводятся название, схемное обозначение и краткая характеристика каждого модуля.

1 *Модуль однофазных трансформаторов.*

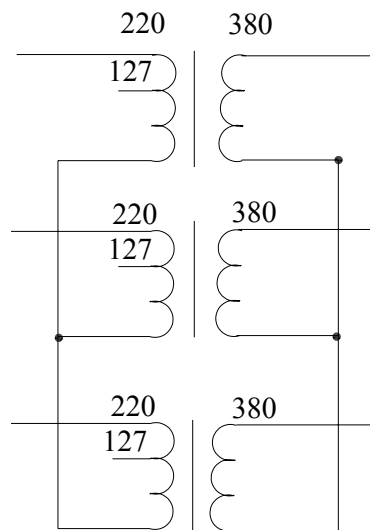
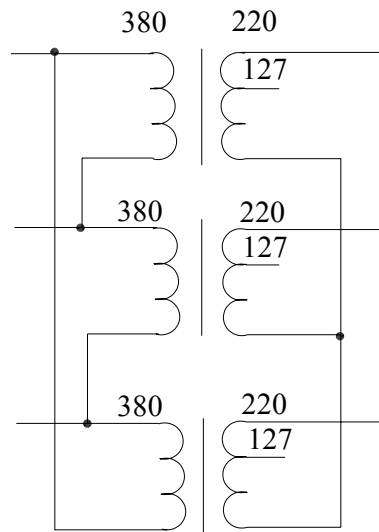
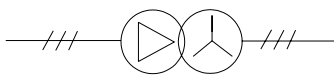
Содержит 3 однофазных трансформатора с первичной обмоткой на 380 В и вторичной обмоткой на 220 В (с отпайкой на 127 В). На схемах лабораторных испытаний модуль обозначается как трёхфазный с указанием схем соединения обмоток и величины **линейного** напряжения на каждой стороне трансформатора:



Приведенное обозначение соответствует следующей схеме соединения обмоток:

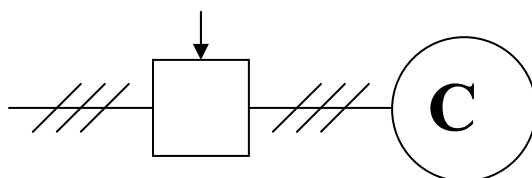


Здесь указаны напряжения, соответствующие номинальным напряжениям отпаяк силовых трансформаторов. При работе стенда реальные напряжения могут быть и меньше. Ниже показаны варианты соединения обмоток трансформаторов, обеспечивающие получение различных коэффициентов трансформации:



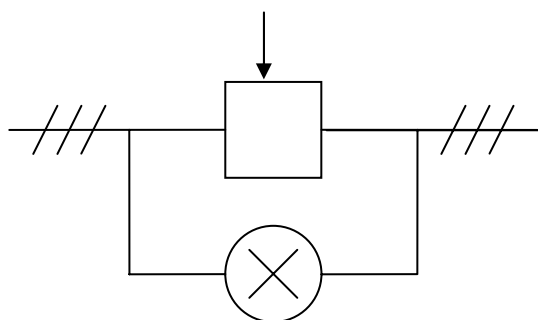
2 Модуль трёхфазной сети.

Содержит источник трёхфазного напряжения 380 В и управляемый трёхфазный выключатель. Обозначение на схемах:



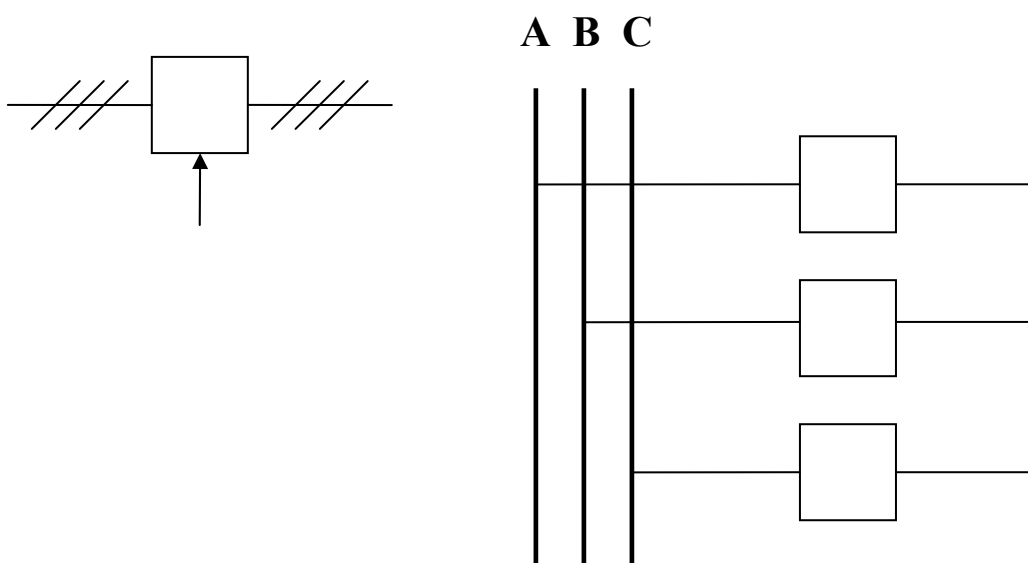
3 *Модуль синхронизации.*

Содержит управляемый трёхфазный выключатель и синхроскоп.
Обозначение на схемах:



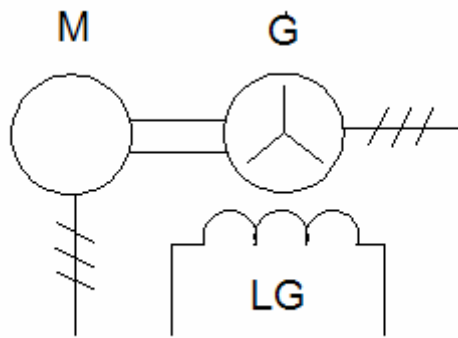
4 *Модуль выключателя.*

Содержит управляемый трёхфазный выключатель.
Если автоматическое управление от персонального компьютера не задействовано, стрелка дистанционного управления не указывается. Обозначение на схемах:



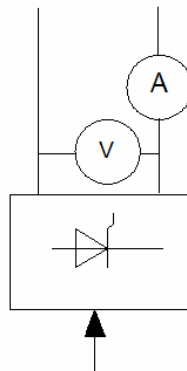
5 *Модуль электромашинного агрегата.*

Содержит выводы статорной обмотки приводного двигателя, выводы статорной обмотки синхронного генератора и выводы обмотки возбуждения синхронного генератора. Обозначение на схемах:



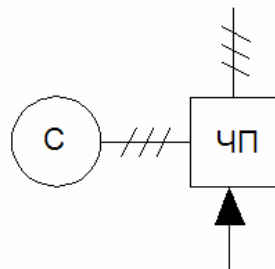
6 *Модуль возбуждения.*

Содержит управляемый источник постоянного тока, измеритель величины тока возбуждения и измеритель напряжения возбуждения. Обозначение на схемах:



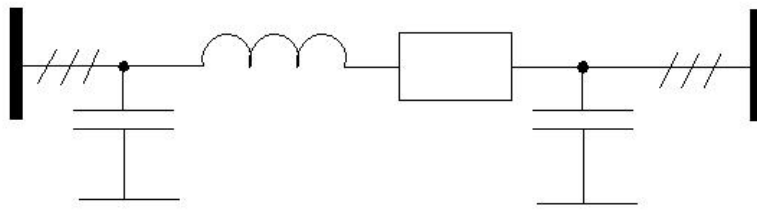
7 *Частотный преобразователь.*

Содержит управляемый трёхфазный источник питания приводного двигателя. Обозначение на схемах:



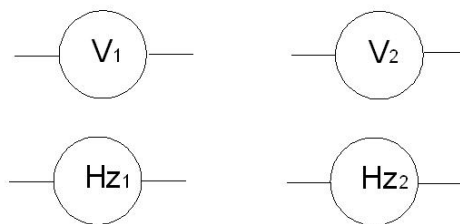
8 *Модуль линии электропередачи.*

Содержит трёхфазную модель линии электропередачи с изменяемыми величинами её продольной активной, продольной индуктивной и поперечной ёмкостной составляющих. Обозначение на схемах:



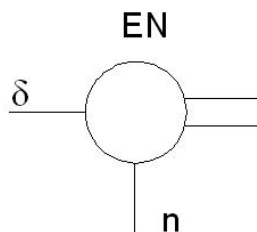
9 Модуль измерительный.

Содержит два вольтметра и два частотомера. Обозначение на схемах:



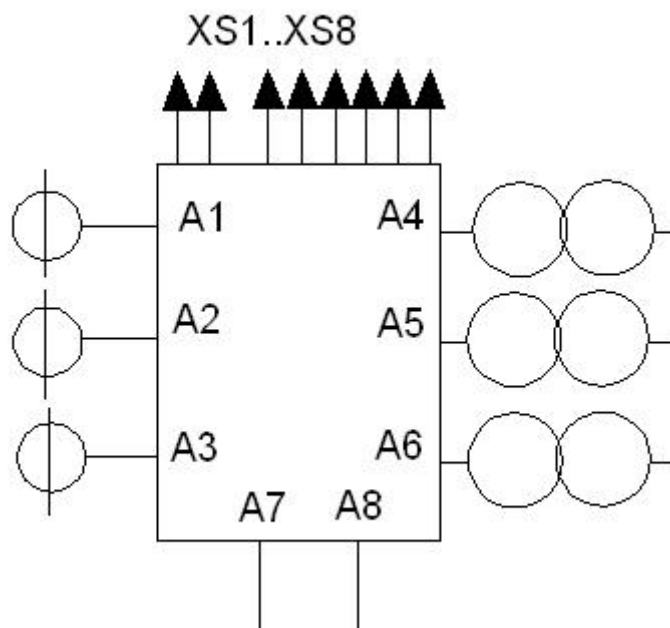
10 Измеритель скорости.

Содержит стрелочный индикатор скорости вращения электромашинного агрегата и стрелочный индикатор угла нагрузки синхронного генератора δ . Обозначение на схемах:



11 Модуль ввода-вывода.

Содержит три датчика тока, три датчика напряжения, разъёмы аналогового (XS1...XS2) и дискретного (XS3...XS8) управления. Обозначение на схемах:



Датчики тока и напряжения входят в состав модуля, но для повышения наглядности схем, изображаются непосредственно в цепях измерения.

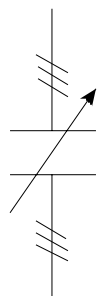
12 *Индуктивная нагрузка.*

Содержит три регулируемых индуктивных сопротивления. Обозначение на схемах:



13 *Ёмкостная нагрузка.*

Содержит три регулируемых ёмкостных сопротивления. Обозначение на схемах:



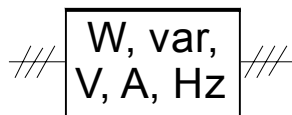
14 *Активная нагрузка.*

Содержит три регулируемых активных сопротивления. Обозначение на схемах:



15 *Измеритель мощности.*

Представляет собой трёхфазный измеритель активной мощности, линейных напряжений, фазных напряжений и фазных токов. Обозначение на схемах:



Подключение измерителя мощности осуществляется последовательно во всех трёх фазах измеряемой цепи, а нейтральный (нулевой) провод подключается к нейтральной точке обмоток трансформатора, соединённых в звезду. При этом следует учитывать, что для правильности измерений нейтраль трансформатора должна иметь гальваническую связь с измеряемой цепью.

16 *Модуль линейного реактора.*

Содержит три нерегулируемых индуктивных сопротивления. Обозначение на схемах:



17 *Модуль питания стенда.*

Автомат подачи питания на все модули стенда. На схемах лабораторных испытаний не обозначен.

2 Лабораторная работа №1 Исследование переходного процесса при трёхфазном коротком замыкании в цепи, питающейся от источника неограниченной мощности

2.1 Цель работы

2.1.1 Изучить особенности протекания переходного процесса при возникновении трехфазного короткого замыкания (КЗ) в сети, питающейся от источника неизменного напряжения (бесконечной мощности).

2.1.2 Исследовать влияние на величину ударного тока КЗ таких факторов, как различный характер нагрузки, фаза включения напряжения и удалённость короткого замыкания.

2.2 Основные положения

Под источником неизменного напряжения или, как часто говорят, электрической системой бесконечной мощности понимают такую относительно мощную систему, напряжение на шинах которой можно считать практически неизменным при любых изменениях тока, в том числе при КЗ, в присоединенной к ней маломощной сети. Условие неограниченной мощности питающей системы обычно вводится при определении токов КЗ в электрических сетях промышленных предприятий. При этом условия находятся предельно возможные значения токов КЗ, что дает гарантию в том, что при любом развитии электроэнергетической системы систему электроснабжения промпредприятий не придется изменять, т.к. при любой мощности питающей системы действительные значения токов КЗ будут меньше расчетных.

При КЗ в электрической системе в силу уменьшения сопротивления цепи, к которой присоединен источник напряжения, наступает переходный процесс и ток изменяется от нормального (ток предшествующего режима) до установившегося тока КЗ (в случае, если аварийная цепь не отключена раньше). Максимальное значение полного тока КЗ, называемого ударным током, зависит от ряда факторов: мощности источников и их удаленности от места КЗ, вида КЗ, времени его возникновения, величины и характера тока предшествующего режима.

В большинстве случаев для выбора схем электрических соединений, а также для выбора и проверки аппаратов и токоведущих частей ограничиваются приближенными методами определения ударного тока КЗ. Это оправдывается тем, что исходные данные и условия на основе которых производится расчет, не точны (например, введение допущения, что мощность питающей системы равна бесконечности).

В этих условиях значение полного тока КЗ можно представить состоящим из двух составляющих: периодической (i_n) и аperiodической (i_a).

Полный ток изменяется во времени по закону:

$$i = I_{nm} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_k) + [I_m \cdot \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \cdot \sin(\alpha - \varphi_k)] \cdot e^{\frac{-t}{T_a}} \quad (2.1)$$

где $I_{nm} = \frac{U_m}{Z_k}$ – амплитуда периодической составляющей тока КЗ;

Z_k – модуль полного сопротивления короткозамкнутой цепи;

α – угол сдвига напряжения относительно оси отсчета, т.е. фаза включения при $t = 0$;

$\varphi_k = \arctg \frac{x_k}{r_k}$ – аргумент полного сопротивления короткозамкнутой цепи;

$\varphi = \arctg \frac{x}{r}$ – аргумент полного сопротивления цепи до КЗ;

$T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega \cdot r_k}$ – постоянная времени короткозамкнутой цепи;

$I_m = \frac{U_m}{Z}$ – амплитуда полного тока предшествующего режима;

Таким образом полный ток КЗ зависит не только от параметров короткозамкнутой цепи, но и от фазы включения α и характера нагрузки, что отражается в величине угла φ .

Ударный ток достигает максимального значения при емкостном характере нагрузки. Однако такой режим работы электрической системы маловероятен, и поэтому ударный ток в практических расчетах определяется при условии отсутствия тока предшествующего режима ($I_m = 0$). В этом случае максимальное значение ударного тока КЗ наступает при условии $\alpha = 0$ и в силу того, что $\varphi_k \approx 90^\circ$ (активными сопротивлениями элементов короткозамкнутой цепи пренебрегают) спустя приблизительно 0,01 с после возникновения КЗ.

Ударный ток в этом случае определяется по формуле :

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \left(1 + e^{\frac{-0.01}{T_a}} \right) = \sqrt{2} \cdot \kappa_y \cdot I_n, \quad (2.2)$$

где $I_n = \frac{U}{Z_k}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ;

$\kappa_y = \left(1 + e^{\frac{-0.01}{T_a}} \right)$ – ударный коэффициент.

Совершенно ясно, что при принятых расчетных условиях максимальное значение полного тока КЗ может иметь место в конкретный момент времени только в одной из фаз, которая является расчетной.

Влияние фазы включения напряжения достаточно наглядно можно продемонстрировать с помощью векторной диаграммы, построенной для начального момента короткого замыкания и приведенной на рисунке 2.1.

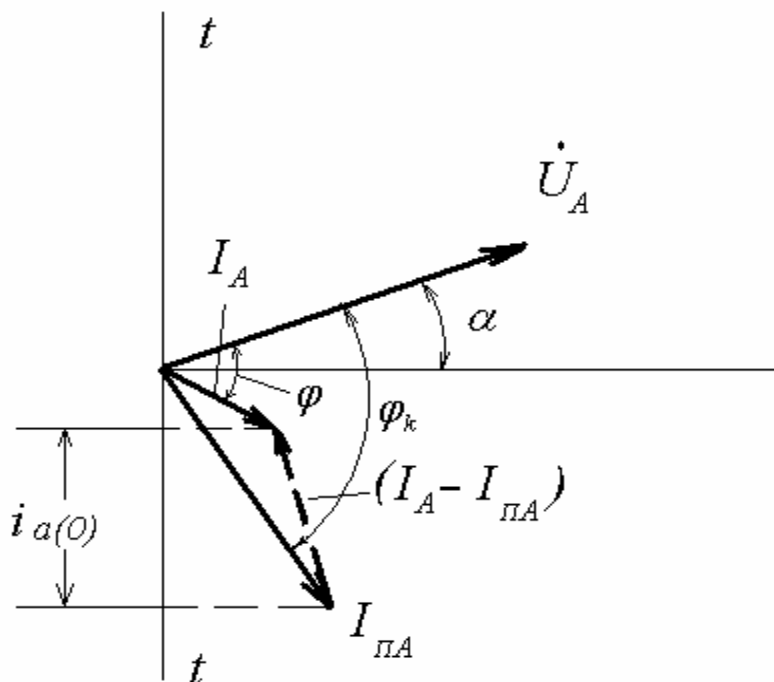


Рисунок 2.1 – Векторная диаграмма токов и напряжений при коротком замыкании

На диаграмме показаны токи и напряжения только в одной фазе А.

Ток $I_A = I_m$, т.е. амплитудному значению полного тока предшествующего режима, а ток $I_{nA} = I_{nm}$ – амплитуде периодической вставляющей тока КЗ. Проекции векторов этих токов на временную ось $t - t$ представляют собой их мгновенное значение в момент возникновения КЗ ($t = 0$). Мгновенное значение полного тока КЗ в этот момент времени определяется, как известно, суммой составляющих, т.е.

$$i_0 = i_{n(0)} + i_{a(0)} \quad (2.3)$$

Тогда начальное значение апериодической составляющей $i_{a(0)} = i_0 - i_{n(0)}$ будет на векторной диаграмме представлять собой проекцию вектора $(I_A - I_{nA}) = (I_m - I_{nm})$ на ось времени. В зависимости от фазы включения α эта величина может изменяться от наибольшей возможной величины, когда вектор

$(I_m - I_{nm})$ параллелен оси времени, до нуля, когда этот вектор нормален к ней.

Соответственно, изменяется и величина ударного тока i_y .

Примечание - Построение векторной диаграммы необходимо производить в выбранном масштабе.

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1 Собрать схему лабораторных испытаний, показанную на рисунке 2.2 (**ВСЕ** модули стенда должны быть **ОТКЛЮЧЕНЫ**). На схеме показан вариант подключения короткозамыкателя (трёхфазный выключатель Q) для имитации трёхфазного короткого замыкания в точке К1. Ток КЗ каждой фазы проходит через датчик тока модуля ввода-вывода (каналы А1, А2, А3). Это позволяет использовать персональный компьютер как регистрирующий осциллограф. Аналогичным образом собирается схема для имитации КЗ в точке К2;

2.3.2 Установить максимальное значение продольной составляющей сопротивления ЛЭП (переключатель SA1 в положении 3) и отключить поперечную составляющую (переключатели SA2 и SA3 в положении 1);

2.3.3 Установить переключатель величины индуктивности SA1 модуля индуктивной нагрузки в положение 3;

2.3.4 Перевести переключатели режима управления всех задействованных блоков в положение «Руч.»;

2.3.5 Подать питание на стенд (включить автомат модуля питания стенда);

2.3.6 Включить все задействованные модули, имеющие индивидуальный тумблер подачи питания «Сеть»;

2.3.7 Включить выключатель модуля трёхфазной сети;

2.3.8 Загрузить программу регистрации токов и напряжений («Пуск – Программы – LCard – LGraph»);

2.3.9 Выбрать закладку «Регистратор»;

2.3.10 Включить осциллографирование каналов с номерами 1, 2 и 3 (соответствующие кнопки должны быть нажаты, т.е. выделены светло-серым цветом);

2.3.11 Ввести длительность записи осциллограммы в диапазоне 5...10 с.;

2.3.12 Нажать кнопку «Пуск» для запуска процесса записи токов фаз;

2.3.13 Нажать кнопку включения выключателя Q и через 1 секунду кнопку отключения этого выключателя;

2.3.14 Повторить опыт несколько раз (пока продолжается процесс осциллографирования);

2.3.15 Выбрать в окне программы закладку «Гляделка»;

2.3.16 Нажать кнопку «Open» и в появившемся диалоговом окне выбрать файл «data.dat» (файл с осциллограммой);

2.3.17 Установить необходимый масштаб по времени и амплитуде, используя элементы управления группы «Оси графика»;

2.3.18 Используя элементы навигации в нижней части графика, просмотреть записанную осциллограмму и распечатать её на принтере;

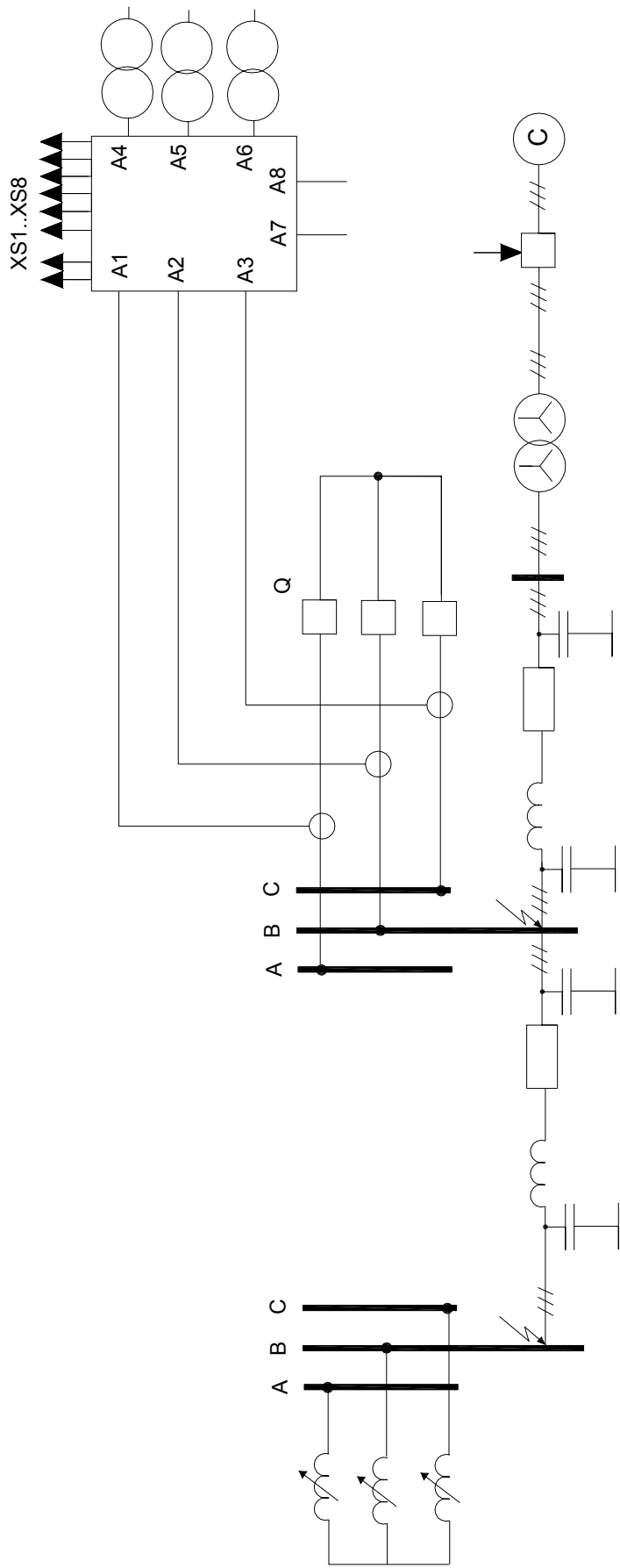


Рисунок 2.2 - Схема лабораторных испытаний

2.3.20 **Выключить** питание стенда, отсоединить модуль индуктивной нагрузки и подсоединить модуль активной нагрузки, установив переключатель величины активного сопротивления SA1 в положение 3;

2.3.21 Прodelать пункты 2.3.4 - 2.3.18;

2.3.22 **Выключить** питание стенда, отсоединить модуль активной нагрузки и подсоединить модуль ёмкостной нагрузки, установив переключатель величины ёмкостного сопротивления SA1 в положение 3;

2.3.23 Прodelать пункты 2.3.4 - 2.3.18;

2.3.24 **Выключить** питание стенда. В соответствии с заданным характером нагрузки подсоединить нужный модуль и повторить опыт короткого замыкания в точке K2 (пункты 2.3.4 – 2.3.18), перенеся в эту точку выключатель Q;

2.3.25 Проанализировать влияние характера нагрузки на переходный процесс и его показатели;

2.3.26 Проанализировать влияние фазы включения на характер переходного процесса и его показатели;

2.3.27 Проанализировать влияние удалённости точки K3 на характер переходного процесса и его показатели;

2.3.27 Сделать выводы и оформить отчёт.

2.4 Требования к оформлению отчёта

Отчёт должен содержать расчётную схему, схему замещения, исходные данные. К отчёту прилагаются распечатки осциллограмм переходного процесса, которые анализируются в соответствии с заданием на работу. Результаты анализа и выводы включаются в отчёт. Кроме того, в отчёте должны быть приведены необходимые векторные диаграммы с их анализом.

2.5. Контрольные вопросы

3.1. Как влияет фаза включения напряжения на величины ударного тока K3 и начального значения апериодической составляющей тока K3 при наличии нагрузки и на холостом ходу?

3.2. Что такое фаза включения напряжения?

3.3. Какие расчётные условия положены в основу определения ударного тока K3?

3.4. Чем определяется скорость затухания апериодической составляющей тока K3?

3.5. Какими свойствами обладает экспонента и как графически и аналитически определить постоянную времени её затухания?

2.6 Дополнительная литература

2.6.1 Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах/С.А.Ульянов. - М.: Энергия, 1970, с.58-74;

2.6.2 Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах/Ю.А.Куликов. - М.: МИР, 2003, с.70-78;

2.6.3 Крючков, И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах/И.П.Крючков. - М.: Издательство МЭИ, 2000, с.25-33.

3 Лабораторная работа №2 Влияние АРВ синхронного генератора на характер переходного процесса и его показатели при трёхфазном коротком замыкании

3.1 Цель работы

Изучить особенности протекания переходного процесса при трёхфазном коротком замыкании в электрической сети, питающейся от синхронного генератора, снабжённого устройством автоматического регулирования возбуждения (АРВ).

Исследовать влияние различной удалённости генератора от места КЗ на характер изменения напряжения генератора и периодической составляющей тока КЗ.

3.2 Основные положения

Как известно, при коротком замыкании происходит снижение напряжения не только в точке КЗ, но и в точках схемы в различной степени удаленных от места короткого замыкания, вплоть до шин генератора. Чтобы избежать работы генераторов на пониженном напряжении, их снабжают устройством АРВ, основная цель которого – поддержание напряжения генераторов на уровне нормального. Уменьшение напряжения, вызванное коротким замыканием, приводит АРВ в действие, которое выражается возрастанием тока возбуждения до величины, при которой напряжение на генераторах восстанавливается до нормального. Одновременно возрастает ток в статорных цепях генераторов. Степень увеличения тока и напряжения зависит от удаленности КЗ и параметров генераторов.

Очевидно, что при относительно удаленном КЗ для восстановления напряжения до нормального достаточно незначительного увеличения возбуждения. По мере же приближения точки КЗ к генератору требуется все большее возбуждение, однако рост последнего ограничен некоторым предельным значением тока возбуждения $I_{\text{нр}}$, величина которого зависит от вида системы возбуждения генератора.

Следовательно, для каждого генератора можно установить наименьшую величину внешней реактивности, при коротком замыкании за которой генератор при предельном возбуждении обеспечивает нормальное напряжение на своих выводах.

Такую реактивность называют критической ($X_{\text{кр}}$), а ток, связанный с ней равенством

$$I_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{н}}}{X_{\text{кр}}} \quad (3.1)$$

- критическим током.

Если внешняя реактивность меньше критической ($X_{вн} < X_{кр}$), то, несмотря на работу генератора с предельным возбуждением, его напряжение все равно остается ниже нормального. Когда же $X_{вн} > X_{кр}$, то напряжение генератора достигает нормального значения при токе возбуждения, меньше предельного.

Таким образом, при коротком замыкании генератор с АРВ в зависимости от внешней реактивности может работать только в одном из двух режимов предельного возбуждения (РПВ) или нормального напряжения (РНН). Лишь в частном случае, когда $X_{вн} = X_{кр}$, оба режима существуют одновременно. Критерием для оценки возможности работы генератора в том или ином режиме является критическая реактивность, величина которой может быть найдена по формуле:

$$X_{кр} = X_d \frac{U_n}{E_{qnp} - U_n} \quad (3.2)$$

где, X_d – синхронная реактивность генератора;

E_{qnp} – ЭДС генератора при токе возбуждения, равным предельному.

Значение E_{qnp} может быть вычислено по эмпирическому выражению:

$$E_{qnp} = 0.2 + k \times I_{fnp} \quad (3.3)$$

где, $K = 0.7$ для гидрогенератора,

$K = 0.8$ для турбогенератора.

Изучение особенностей протекания переходного процесса при КЗ в цепи генератора с АРВ невозможно без предварительного рассмотрения аналогичного процесса в цепи генератора без АРВ, суть которого заключается в следующем (иллюстрация процесса - на рисунке 3.1).

Возникающий в первый момент КЗ в статоре генератора ток (начальное мгновенное значение периодической составляющей) вызывает соответствующее изменение магнитного потока статора. Так как этот ток можно считать практически индуктивным (активным сопротивлением цепи пренебрегаем ввиду его небольшой величины по сравнению с индуктивным), то создаваемый им магнитный поток является продольным потоком реакции статора $\Phi_{ст}$, направленным против потока возбуждения роторной обмотки.

Но т.к. обмотка возбуждения (ОВ) обладает индуктивностью, то сцепленный с нею магнитный поток не может измениться мгновенно и в первый момент КЗ должен остаться неизменным. Это может быть только в том случае, если размагничивающее действие реакции статора будет скомпенсировано благодаря возникновению в роторе намагничивающего (свободного) тока $i_{св}$, создающего магнитный поток $\Phi_{св}$, направленный против потока реакции статора.

Одновременно в демпферных обмотках и стальной массе ротора также наводятся свободные токи и соответствующие им магнитные потоки, которые направлены против потока реакции статора.

В дальнейшем, с целью упрощения анализа переходного процесса, влияние этих потоков не будем учитывать.

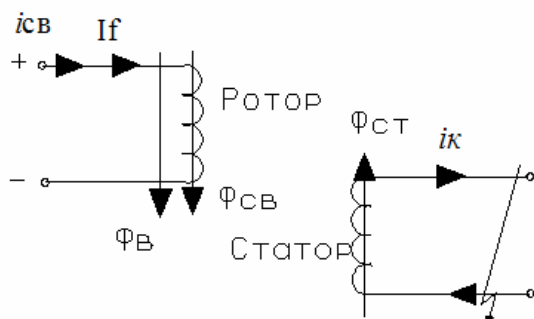


Рисунок 3.1- Равновесие магнитных потоков

Если бы роторные цепи не обладали рассеянием, то в первый момент КЗ свободный магнитный поток, созданный свободным током в ОВ, полностью компенсировал поток реакции статора и магнитный поток в воздушном зазоре генератора оставался бы неизменным:

$$\Phi_{рез} = \Phi_{св} + \Phi_{св} - \Phi_{ст} = \Phi_{св}. \quad (3.4)$$

Неизменной оставалась бы и ЭДС, наведенная в обмотке статора. В действительности же часть указанного свободного потока замыкается по путям рассеяния ротора, и поэтому в первый момент КЗ не происходит полной компенсации потока реакции статора и магнитный поток в воздушном зазоре машины несколько уменьшается, уменьшается и ЭДС, наведенная в статоре.

Так как роторные цепи обладают активным сопротивлением, то наведенные в них в первый момент КЗ свободные токи затухают (по экспоненциальному закону). При затухании этих токов уменьшаются и созданные ими свободные магнитные потоки. Вследствие этого уменьшается результирующий магнитный поток в воздушном зазоре машины, а вместе с этим – наведенные в статоре ЭДС и периодическая составляющая тока КЗ.

Таким образом, периодическая составляющая тока КЗ затухает вследствие постепенного нарастания размагничивающего действия реакции статора. В момент исчезновения свободных токов в цепях возбуждения прекращается изменение ЭДС генератора и периодической составляющей тока КЗ – наступает установившейся режим КЗ.

Изменение полного тока КЗ во времени для одной фазы (например, фазы А) происходит в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{aligned}
i_{\kappa} = & \left[\frac{E_{q0}}{X_d' + X_{\text{вн}}} + \left(\frac{E_{q0}'}{X_d' + X_{\text{вн}}} - \frac{E_{q0}}{X_d + X_{\text{вн}}} \right) e^{\frac{-t}{T_d'}} \right] \times \cos(\omega t + \gamma_0) \\
& - [U_{q0} \cos \gamma_0 + U_d \sin \gamma_0] \times \frac{(X_q + X_d' + 2X_{\text{вн}})}{2(X_d' + X_{\text{вн}})(X_q - X_{\text{вн}})} e^{\frac{-t}{T_d'}} \\
& - [U_{q0} \cos(2\omega t + \gamma_0) + U_d \sin(2\omega t + \gamma_0)] \\
& \times \frac{(X_q - X_d')}{2(X_d' + X_{\text{вн}})(X_q + X_{\text{вн}})} e^{\frac{-t}{T_d'}}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

где, E_{q0} - синхронная ЭДС генератора;

E_{q0}' - переходная ЭДС генератора;

U_{d0}, U_{q0} – составляющие предшествующего напряжения в месте КЗ;

X_d, X_q – синхронные реактивности генератора;

X_d' – переходная реактивность генератора;

γ_0 – начальная фаза;

$X_{\text{вн}}$ – внешнее индуктивное сопротивление статорной цепи до точки

КЗ;

$$T_a = \frac{2(X_d' + X_{\text{вн}})(X_q + X_{\text{вн}})}{\omega(r + r_{\text{вн}})(X_d' + X_q + 2X_{\text{вн}})}$$

- постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ (r и $r_{\text{вн}}$ – активные сопротивления статора генератора и внешней цепи соответственно).

$$T_d' = \frac{(X_d' + X_{\text{вн}})(X_q + X_{\text{вн}}) + (r + r_{\text{вн}})^2}{(X_d + X_{\text{вн}})(X_q + X_{\text{вн}}) + (r + r_{\text{вн}})^2} \times T_{f(0)}$$

- постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока обмотки возбуждения $i_{\text{фа}}$ (определяет время затухания периодической составляющей тока статора).

$T_{f(0)}$ – постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутом статоре.

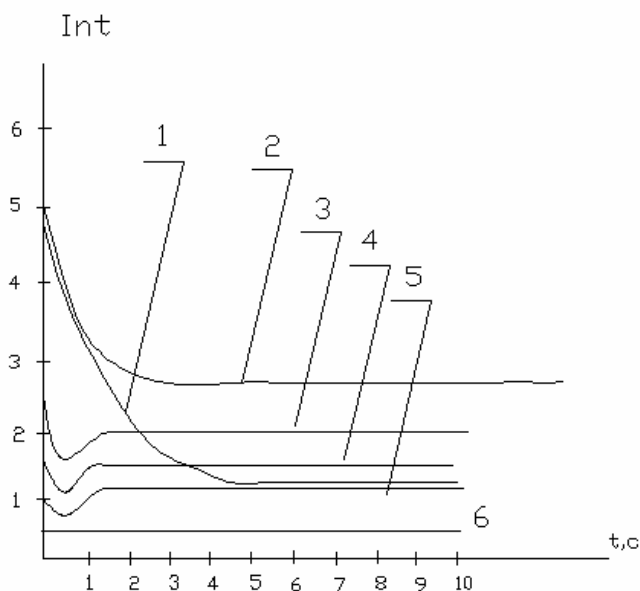
В выражении (3.5) первое слагаемое представляет собой периодическую составляющую тока основной частоты, второе – аperiodическую составляющую, третье – вторую гармонику тока, обусловленную асимметрией ротора ($X_q \neq X_d'$).

В начальный момент КЗ в статорной цепи генератора с АРВ влияние последнего не проявляется в силу инерции магнитных потоков, сцепленных с обмотками. Таким образом, начальное значение периодической составляющей и процесс ее затухания, а следовательно, и ударный ток КЗ, остаются такими же, как и для генератора без АРВ. Вторая гармоника тока, связанная с

апериодической составляющей, также остается неизменной. В дальнейшем влияние АРВ сказывается в росте тока возбуждения и связанной с ним периодической составляющей тока статора.

При малой удаленности КЗ от генератора характер изменения периодической составляющей тока КЗ остается в основном таким же, как при генераторе без АРВ, но влияние ее спустя некоторое время после возникновения короткого замыкания получается больше, в соответствии с рисунком 3.2 (кривые 1 и 2).

Особенно велико различие в установившемся режиме КЗ. При большой удаленности периодическая составляющая тока КЗ сначала уменьшается, а затем, под действием АРВ, возрастает, переходя в установившееся значение (кривая 3). При некоторой удаленности КЗ установившейся ток I_{∞} может оказаться равным начальному $I''(0)$, (кривая 4) или даже превысить его (кривая 5).



- 1 – генератор без АРВ, $X_{ж \text{ расч.}} = 0,2$;
- 2 – генератор с АРВ, $X_{ж \text{ расч.}} = 0,2$;
- 3 – то же, $X_{ж \text{ расч.}} = 0,4$ ($I_{\infty} < I''(0)$);
- 4 – то же, $X_{ж \text{ расч.}} = 0,6$ ($I_{\infty} = I''(0)$);
- 5 – то же, $X_{ж \text{ расч.}} = 1,0$ ($I_{\infty} > I''(0)$);
- 6 – то же, $X_{ж \text{ расч.}} = 3,0$ ($I_{\infty} = I_{nt} = I''(0)$).

Рисунок 3.2 – Характер изменения периодической составляющей тока КЗ

При значительной удаленности КЗ ($X_{ж \text{ расч.}} > 3$) напряжение на шинах генератора практически не изменяется, а следовательно АРВ не приходит в действие и не увеличивает ток возбуждения генератора (кривая 6).

При условии, что насыщение генератора не учитывается, выражение для действующего значения периодической составляющей тока КЗ с учетом АРВ может быть получено, если к соответствующему выражению без учета АРВ прибавить приращение тока под действием АРВ, т.е.

$$I_{ntA} = I_{ntA(\delta/APB)} + \Delta I_{np} \times F(t) \quad (3.6)$$

где
$$I_{ntA(\delta/APB)} = \frac{E_{q0}}{X_d + X_{вн}} + \left(\frac{E'_{q0}}{X'_d + X_{вн}} - \frac{E_{q0}}{X_d + X_{вн}} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} ;$$

$$\Delta I_{np} = \frac{E_{q\text{ пр}}}{X_d + X_{вн}} - \frac{E_{q0}}{X_d + X_{вн}} ;$$

F(t)-функция, определяемая из выражений:

$$F(t) = 1 - \frac{T'_d \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} - T_e \cdot e^{-\frac{t}{T_e}}}{T'_d - T_e} \quad \text{при } T'_d \neq T_e; \quad (3.7)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T'_d}} \left(1 + \frac{t}{T'_d} \right) \quad \text{при } T'_d = T_e; \quad (3.8)$$

В этих выражениях T_e представляет собой постоянную времени нарастания напряжения обмотки возбуждения. Для электромашинных возбuditелей $T_e = (0,3-0,6)$ с, а для ионных или тиристорных систем возбуждения $T_e = 0,02$ с.

Для мгновенного тока можно записать:

$$i_{пА} = [I_{ntA} + \Delta I_{np} \cdot F(t)] \cdot \cos(\omega t + \gamma_0). \quad (3.9)$$

На рисунке 3.3 показано, как изменяется во времени периодическая составляющая тока КЗ в соответствии с выражением (3.6).

Изменение тока будет происходить до тех пор, пока напряжение на выводах генератора не поднимется до U_H . При этом

$$I_{nt} = \frac{U_H}{X_{вн}}.$$

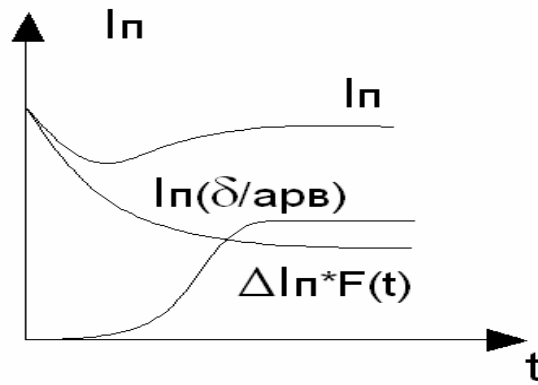


Рисунок 3.3

Само же напряжение в какой-либо фазе (например, в фазе А) изменяется в соответствии со следующими выражениями:

$$U_A = \text{Int}_{A(\delta/APB)} \cdot X_{ВН} , \quad (3.10)$$

если генератор без APB;

$$U_A = X_{ВН} \cdot [\text{Int}_{A(\delta/APB)} + \Delta I_{пр} \cdot F(t)] , \quad (3.11)$$

если генератор с APB.

Вернемся к характеру изменения тока и напряжения генератора с APB при различной удалённости КЗ. На рисунке 3.4 приведены кривые изменения действующих значений периодической составляющей тока статора и напряжения генератора при трех характерных удаленностях КЗ: $X_{ВН}=0$; $X_{ВН}=X_{кр}$; $X_{ВН} > X_{кр}$. Значения внешней реактивности, при КЗ за которой начальный переходный и установившийся токи одинаковы, может быть найдено из выражения:

$$X'_{ВН} = \frac{E'_{q0} \cdot X_d - E_{qпр} \cdot X'd}{E_{qпр} - E'_{q0}} \quad (3.12)$$

где, E'_{q0} и $X'd$ - переходные ЭДС и реактивности генератора.

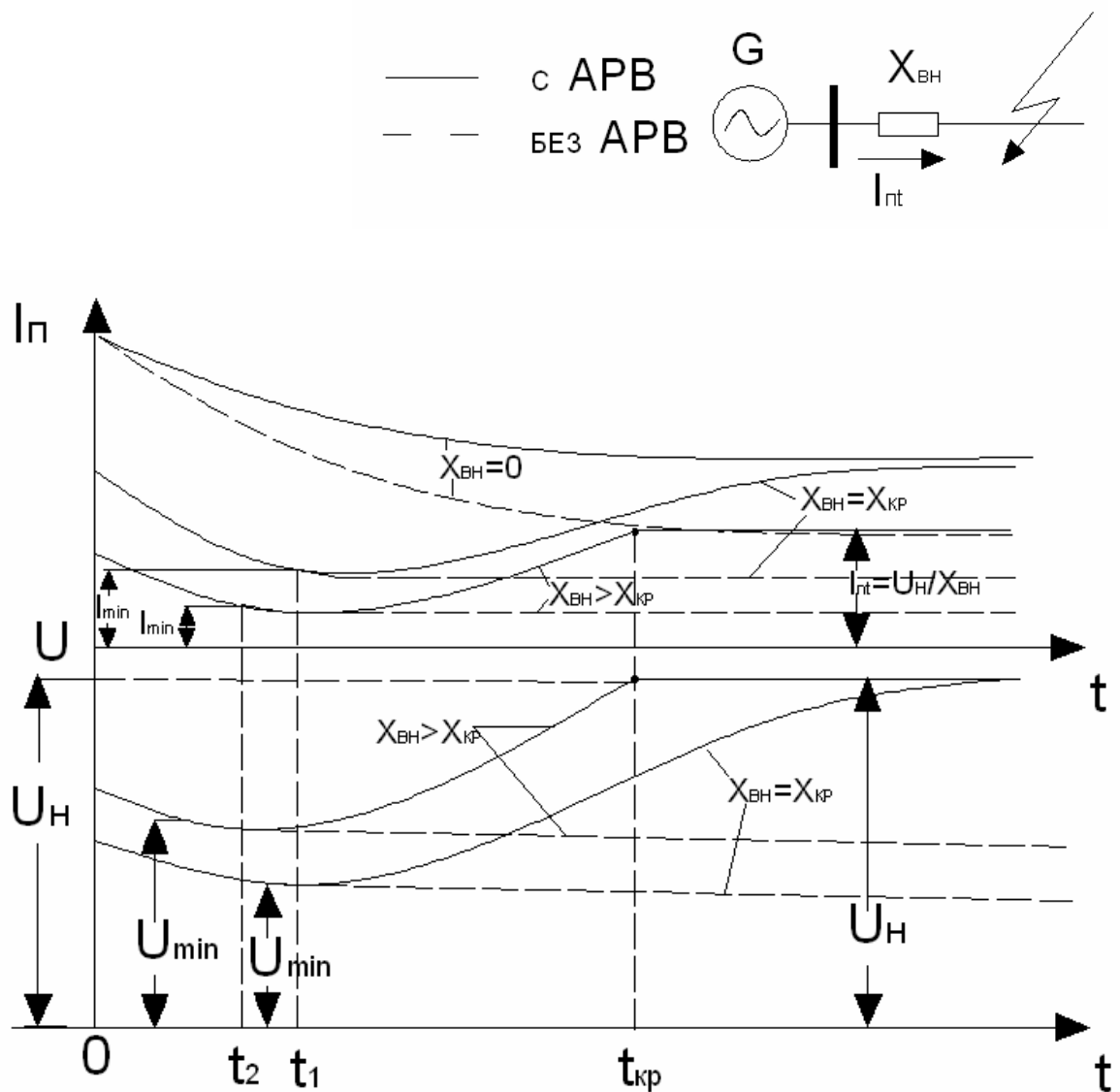


Рисунок 3.4

При $X_{BH} > X'_{d}$ установившийся ток $I_{\infty} > I'(0)$, причём наибольшее различие между ними наступает при $X_{BH} = X_{KP}$. С дальнейшим ростом X_{BH} различие между токами снова уменьшается.

Как видно из рисунка, при $X_{BH} > X_{KP}$ напряжение, возрастая, достигает номинального значения через некоторый промежуток времени, называемый критическим временем (t_{KP}) и далее остается неизменным и равным $\frac{U_H}{X_{BH}}$.

Необходимо помнить, что с увеличением удаленности КЗ затухание и нарастание токов происходит медленнее. Однако, вследствие меньшего снижения напряжения его восстановление под действием АРВ происходит в более короткий отрезок времени (хотя и с меньшей скоростью). Таким образом критическое время уменьшается с ростом удаленности КЗ.

Минимум тока или напряжения зависит от параметров генератора и удаленности КЗ, с увеличением которой он наступает раньше и в пределе наступает при $t=0$.

При анализе переходного процесса представляет интерес и зависимость действующего значения полного тока статора при КЗ в его цепи.

Если не учитывать вторую гармонику, т.е. для простоты считать, что начальное значение периодической составляющей полностью уравнивается одной апериодической составляющей, то выражение для полного тока будет иметь вид:

$$I_{t_A} = \sqrt{\left(I + I'_{CB(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T'd}} + \Delta I_{пр} \cdot e^{-\frac{t}{T'd}} \cdot F(t) \right)^2 + 2(I'_{a(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T'd}})^2} \quad (3.13)$$

То же выражение, но без учета АРВ, имеет вид:

$$I_{t_A} = \sqrt{\left(I + I'_{CB(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T'd}} \right)^2 + 2(I'_{a(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T'd}})^2} \quad (3.14)$$

В этих выражениях:

$I = \frac{E_{q0}}{X_d + X_{вн}}$ - ток установившегося КЗ при предшествующем токе

возбуждения I_f ;

$I'_{CB(0)} = I'_0 - I = \frac{E'_{q0}}{X'd + X_{вн}} - \frac{E_{q0}}{X_d + X_{вн}}$ - начальный свободный переходной ток;

$\Delta I_{пр}$ – приращение тока под действием АРВ;

$I'_{CB(0)} = [U_{q0} \cos \gamma_0 + U_{d0} \cos \gamma_0] \frac{X_q + X'd + 2X_{вн}}{2(X'd + X_{вн})(X'q + X_{вн})}$ - начальное значение

апериодической составляющей тока (для случая пренебрежения 2-й гармоникой X_q принимается равным X_d).

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1 Собрать схему лабораторных испытаний, приведенную на рисунке 3.5 (ВСЕ модули стенда должны быть **ОТКЛЮЧЕНЫ!**).

3.3.1.1 Особенности работы со схемой.

На рисунке представлена схема радиального питания нагрузки S_n через две последовательно включенные линии электропередачи. Для каждой ЛЭП существует возможность установить переключатель её длины SA1 в одно из трёх положений. При проведении экспериментов необходимо, чтобы сумма значений переключателей SA1 обеих ЛЭП всегда была равна 2 (двум). В этом случае суммарная длина ЛЭП1 и ЛЭП2 будет оставаться неизменной, равной 4 (четырёх) условным единицам, или 100%. Однако, в зависимости от соотношения положений переключателей SA1 первой и второй линий, можно получить различные расстояния до точки короткого замыкания, расположенной между двумя ЛЭП. Варианты, которые можно получить, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

№ точки КЗ	Расстояние до точки КЗ, %	Положение SA1 ЛЭП1	Положение SA1 ЛЭП2
К1	25%	1	3
К2	50%	2	2
К3	75%	3	1

Дополнительно можно получить точку К4, при коротком замыкании на шинах нагрузки (за ЛЭП2). Трёхфазный выключатель Q используется для имитации короткого замыкания в точках К1, К2, К3, К4 (на схеме показан вариант подключения выключателя для создания короткого замыкания в точках К1, К2 и К3). Для обеспечения работы автоматического регулятора возбуждения и возможности осциллографирования действующих значений токов и напряжений к датчику А1 модуля ввода-вывода подводится ток фазы А статорной обмотки синхронного генератора, а к датчику напряжения А5 – линейное напряжение U_{ab} статорной обмотки генератора. Измерения фазных токов, линейных и фазных напряжений генератора производится с помощью универсального измерителя мощности, включенного между статорной обмоткой генератора и генераторным выключателем (рисунок 3.5). Измерения осуществляются относительно нейтрали статорной обмотки генератора. Измерение частоты и грубое измерение линейного напряжения производится с помощью измерительного модуля, содержащего 2 вольтметра и 2 частотомера, которые включаются на линейное напряжение генератора (два других прибора не используются). В качестве нагрузки S_n рекомендуется использовать модуль индуктивной нагрузки, включенный по схеме «звезда без нулевого провода».

Нейтраль трансформатора со стороны первичной обмотки (со стороны генератора) подключается к нейтрали статорной обмотки генератора;

3.3.2 Установить переключатели SA1 модулей ЛЭП в положения, соответствующие точке короткого замыкания K1. Отключить ёмкостные составляющие ЛЭП1, ЛЭП2, установив переключатели SA2 и SA3 в положение 1;

3.3.3 Установить переключатель величины индуктивности SA1 модуля индуктивной нагрузки в положение 3;

3.3.4 Перевести переключатели режима управления всех задействованных модулей в положение «Руч.»;

3.3.5 Установить потенциометры задания RP1 модуля частотного преобразователя и модуля возбуждения в крайнее **левое** положение;

3.3.6 Подать питание на стенд, включив автомат модуля питания стенда;

3.3.7 Включить все задействованные модули, имеющие индивидуальный тумблер подачи питания «Сеть»;

3.3.8 Переключатель «ВПЕРЁД – НАЗАД» на панели модуля частотного преобразователя перевести из нейтрального положения в положение «ВПЕРЁД»;

3.3.9 Плавно увеличивая напряжение задания модуля частотного преобразователя (потенциометр RP1), установить уставку частоты вращения приводного двигателя на уровне 50 Гц;

3.3.10 Плавно увеличивая напряжение задания модуля возбуждения (потенциометр RP1), установить ток возбуждения, соответствующий номинальному линейному напряжению генератора 220 В (следить по показаниям универсального измерителя мощности);

3.3.11 При необходимости, скорректировать уставку частотного преобразователя, если частота по показаниям частотомера не равна 50 Гц;

3.3.12 Записать величину действующего значения линейного напряжения генератора на холостом ходу;

3.3.13 Включить генераторный выключатель;

3.3.14 Записать величины действующих значений линейного напряжения и фазного тока генератора при работе на индуктивную нагрузку;

3.3.15 Включить выключатель Q, имитирующий трёхфазное короткое замыкание в точке K1;

3.3.16 Записать величины действующих значений линейного напряжения и фазного тока генератора при коротком замыкании в точке K1;

3.3.17 Выключить выключатель Q;

3.3.18 Выключить генераторный выключатель;

3.3.19 Установить переключатели SA1 модулей обеих ЛЭП в положения, соответствующие точке короткого замыкания K2;

3.3.20 Включить генераторный выключатель;

3.3.21 Включить выключатель Q, имитирующий трёхфазное короткое замыкание в точке K2;

3.3.22 Записать величины действующих значений линейного напряжения и фазного тока генератора при коротком замыкании в точке K2;

3.3.23 Выключить выключатель Q;

3.3.24 Выключить генераторный выключатель;

- 3.3.25 Аналогичным образом провести испытания для случая короткого замыкания в точке К3;
- 3.3.26 Подсоединить выключатель Q в конец ЛЭП2 (в точку подключения нагрузки) и провести испытания при коротком замыкании в точке К4;
- 3.3.27 Построить зависимости действующего значения установившегося тока статора и линейного напряжения синхронного генератора от удалённости места повреждения без учёта влияния АРВ;
- 3.3.28 Отключить питание стенда;
- 3.3.29 Соединить кабелем разъём XS1 на лицевой панели модуля возбуждения с разъёмом XS2 на лицевой панели модуля ввода-вывода;
- 3.3.30 Установить потенциометры задания RP1 модуля частотного преобразователя и модуля возбуждения в крайнее **левое** положение;
- 3.3.31 Перевести переключатель режима управления модуля возбуждения в положение «Авт.»;
- 3.3.32 Установить переключатели SA1 модулей ЛЭП в положения, соответствующие точке короткого замыкания К1;
- 3.3.33 Подать питание на стенд, включив автомат модуля питания стенда;
- 3.3.34 Включить все задействованные модули, имеющие индивидуальный тумблер подачи питания «Сеть»;
- 3.3.35 Плавно увеличивая напряжение задания модуля частотного преобразователя (потенциометр RP1), установить уставку частоты вращения приводного двигателя на уровне 50 Гц;
- 3.3.36 На персональном компьютере запустить «менеджер автоматического управления» (команда: Пуск – Программы – Модель энергосистемы – Автоматическое управление – Менеджер управления);
- 3.3.37 Из контекстного меню «менеджера автоматического управления» необходимо выбрать команду «Загрузить состояние» и в появившемся диалоговом окне открыть файл настроек, расположенный в папке «с:\auto\projects\АРВ»;
- 3.3.38 Из контекстного меню «менеджера автоматического управления» выбрать команду «Управление»;
- 3.3.39 Подать команду на включение модуля возбуждения. Для этого установить переключатель SX1 в окне «Универсальный пульт управления» во включенное состояние (отображается «галочка»);
- 3.3.40 В том же окне выделить виртуальный регулятор А17 щелчком левой кнопки мыши или нажатием клавиши «tab» несколько раз (вокруг регулятора появится пунктирная рамка);
- 3.3.41 Медленно повышая величину задания на регуляторе А17 (стрелка вверх на клавиатуре), установить линейное напряжение на статорной обмотке 220 В;
- 3.3.42 Повторить пункты 3.3.12...3.3.25 для получения токов и напряжений при коротких замыканиях в различных точках и работе автоматического регулятора возбуждения. **ВНИМАНИЕ!** При проведении экспериментов **СЛЕДИТЬ ЗА ТОКОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ**, который **НЕ ДОЛЖЕН БЫТЬ БОЛЬШЕ 1,6 А ВО ВСЕХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**. Если это не так, то следует

как можно быстрее отключить короткое замыкание (выключатель Q), отключить возбуждение (переключатель SX1 на ПК), проверить правильность сборки схемы (особенно обратить внимание на наличие обратной связи по напряжению через датчик напряжения A5) и, если необходимо, снизить величину уставки по напряжению (виртуальный потенциометр A17 на ПК) для проведения опыта на пониженном напряжении (в этом случае все токи возбуждения будут меньше);

3.3.43 Построить зависимости действующего значения установившегося тока статора и линейного напряжения синхронного генератора от удалённости места повреждения с учётом влияния АРВ;

3.3.44 Установить переключатели SA1 модулей ЛЭП в положения, соответствующие точке короткого замыкания КЗ;

3.3.45 На ПК из контекстного меню «менеджера автоматического управления» выбрать команду «Регистратор сигналов»;

3.3.46 В появившемся диалоговом окне задать следующие настройки: *тип регистратора* – зависимость сигнала от времени; *функции* – выбрать $Y0=A1$, $Y1=A5$; *тип измерений* – по таймеру с интервалом в 55мс; *управление регистратором* – ручное;

3.3.47 Нажать кнопку «Запуск» (при этом генератор должен работать на нагрузку с напряжением статорной обмотки, близким к номинальному);

3.3.48 Включить выключатель Q, имитируя короткое замыкание;

3.3.49 Когда ток и напряжение достигнут установившегося значения, отключить короткое замыкание (выключатель Q);

3.3.50 Нажать кнопку «Стоп» регистратора сигналов;

3.3.51 На экране монитора появится запись зависимости действующих значений тока и напряжения генератора от времени, которую нужно сохранить в файл формата Excel, нажав кнопку «Сохранить как...» (**процесс сохранения может занять несколько минут**), а затем распечатать.

Второй вариант: скопировать содержимое экрана кнопкой «PrtSc» и распечатать;

3.3.52 Повторить опыт при отсутствии АРВ. Для этого необходимо отключить возбуждение, остановить приводной двигатель, перевести переключатель режима управления модуля возбуждения положение «Руч.» и выполнить действия в соответствии с пунктами 3.3.5..3.3.12 и 3.3.42..3.3.49;

3.3.53 Отключить питание стенда;

3.3.54 Проанализировать полученные результаты, сделать выводы и оформить отчёт.

2.4 Требования к оформлению отчёта

Отчёт должен содержать расчётную схему, схему замещения, исходные данные. К отчёту прилагаются распечатки осциллограмм переходного процесса, которые анализируются в соответствии с заданием на работу. Результаты анализа и выводы включаются в отчёт.

2.5 Контрольные вопросы.

2.5.1 В каких режимах могут работать при КЗ генераторы с АРВ и в чём суть таких режимов?

2.5.2 Что такое критическое сопротивление $X_{кр}$ и критический ток $I_{кр}$?

2.5.3 Чем объясняется уменьшение периодической составляющей тока КЗ от генератора с АРВ в начальный момент короткого замыкания?

2.5.4 От чего зависит характер изменения во времени действующего значений периодической составляющей тока КЗ и напряжения генератора с АРВ?

2.5.5 Что такое критическое время $t_{кр}$?

2.6 Дополнительная литература

2.6.1 Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах/С.А.Ульянов. – М: Энергия, 1970. с.104-109, 168-177, 191-200, 215-221.

4 Лабораторная работа №3 Анализ переходного процесса при различных видах несимметричного короткого замыкания

4.1 Цель работы

Исследовать влияние автоматического регулирования возбуждения на величины, характер и длительность изменения действующих значений тока и напряжения синхронного генератора при несимметричных коротких замыканиях в питающейся от него электрической сети, а также проанализировать соотношения фазных токов при различных видах КЗ.

4.2 Основные положения

Необходимые теоретические сведения, касающиеся влияния АРВ генератора на характер переходного процесса при трехфазном КЗ изложены в лабораторной работе №2.

Влияние АРВ в случае несимметричных КЗ проявляется аналогично, поэтому содержание дальнейшего материала будет касаться только особенностей переходного процесса, связанных с нарушением симметрии цепи в результате возникновения однофазного, двухфазного или двухфазного на землю коротких замыканий.

Известно [4.1], что токи обратной и нулевой последовательности и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Таким образом, задача расчета любого несимметричного короткого замыкания состоит прежде всего в определении величины тока прямой последовательности в месте КЗ.

Выражение для тока прямой последовательности в общем виде при любом (n) виде несимметричного КЗ записываются следующим образом (активные сопротивления элементов и электрической дуги в месте КЗ не учитываются):

$$I_{kl}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(n)}}, \quad (4.1)$$

где $X_{\Delta}^{(n)}$ - дополнительное сопротивление;

$X_{1\Sigma}$ - результирующее сопротивление схемы замещения прямой последовательности;

E_{Σ} - эквивалентная ЭДС прямой последовательности.

Величина $X_{\Delta}^{(n)}$ зависит от вида короткого замыкания и при известных результирующих сопротивлениях схем обратной ($X_{2\Sigma}$) и нулевой ($X_{0\Sigma}$) последовательностей определяется:

- для трехфазного КЗ $X_{\Delta}^{(3)} = 0$;
- для двухфазного КЗ $X_{\Delta}^{(2)} = X_{2\Sigma}$;
- для однофазного КЗ $X_{\Delta}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$;
- для двухфазного КЗ на землю $X_{\Delta}^{1,1} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}$.

Фазные токи в месте короткого замыкания также пропорциональны току прямой последовательности, при этом модуль фазного тока при любом виде несимметричного КЗ может быть представлен как:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{k1}^{(n)}, \quad (4.2)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент пропорциональности.

$$(m^{(3)} = 1; m^{(2)} = \sqrt{3}; m^{(1)} = 3; m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}})$$

Основываясь на обобщенной записи выражения (4.2) Н.Н.Щедрин впервые сформулировал положение, которое сейчас называется правилом эквивалентности прямой последовательности:

«ТОК ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЛЮБОГО НЕСИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ МОЖЕТ БЫТЬ ОПРЕДЕЛЕН КАК ТОК ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ В ТОЧКЕ, УДАЛЕННОЙ ОТ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ТОЧКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ $X_{\Delta}^{(n)}$, КОТОРОЕ НЕ ЗАВИСИТ ОТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И ДЛЯ КАЖДОГО ВИДА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ РЕЗУЛЬТИРУЮЩИМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНО РАССМАТРИВАЕМОЙ ТОЧКИ СХЕМЫ».

Необходимо знать, что правило справедливо при условии, что рассматривается только основная гармоника тока несимметричного КЗ.

Напряжение прямой последовательности в месте КЗ:

$$U_{k1}^{(n)} = I_{k1}^{(n)} \cdot X_{\Delta}^{(n)} \quad (4.3)$$

Из правила эквивалентности следует, что ток и напряжение прямой последовательности могут быть получены как результат расчета некоторого эквивалентного трехфазного КЗ, смысл которого иллюстрирует рисунке 4.1.

Установленная идентичность между током прямой последовательности несимметричного короткого замыкания и током при некотором эквивалентном

трехфазном КЗ указывает, что все выражения для тока трехфазного короткого замыкания, используемые в лабораторной работе №2, можно распространить на случай несимметричного КЗ.

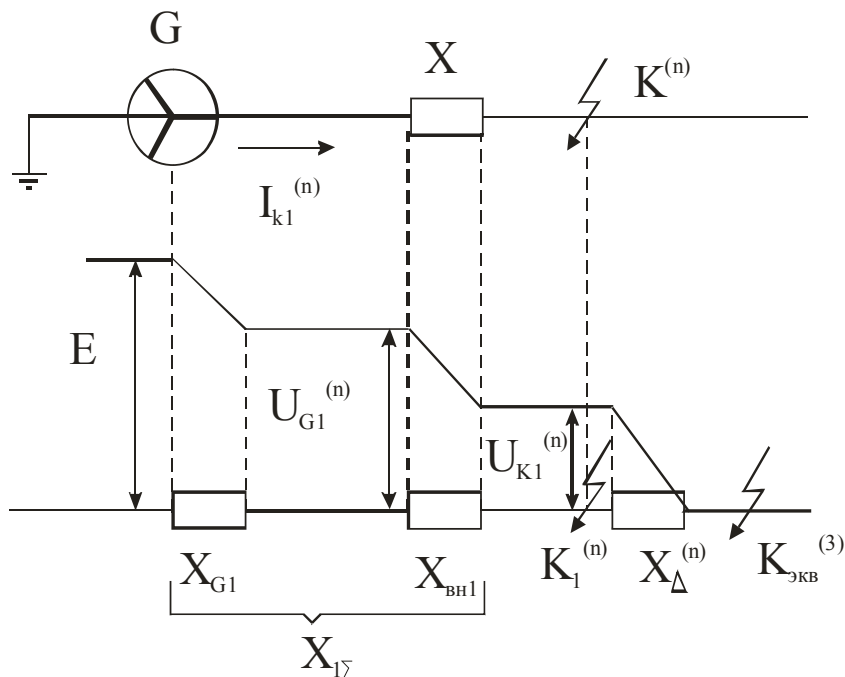


Рисунок 4.1- Иллюстрация правила эквивалентности

Таким образом, помня о том, что речь идет о периодической составляющей тока КЗ, выражение для изменяющегося во времени действующего значения тока прямой последовательности будет иметь вид:

$$I_{1t}^{(n)} = I_{1t(\sigma/APB)}^{(n)} + \Delta I_{1np} \cdot F^{(n)}(t) \leq \frac{U_H}{X_{BH1} + X_{\Delta}^{(n)}}. \quad (4.4)$$

Данное выражение ограничено условием, что под действием АРВ напряжение прямой последовательности не может превзойти нормальное значение, т.е. при этом значении напряжения изменение тока прямой последовательности прекращается.

Более подробно составляющие выражения (4.4) могут быть записаны:

$$I_{1t(\sigma/APB)}^{(n)} = \frac{E_{q0}}{x_d + x_{BH1} + x_{\Delta}^{(n)}} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d + x_{BH1} + x_{\Delta}^{(n)}} - \frac{E_{q0}}{x_d + x_{BH1} + x_{\Delta}^{(n)}} \right) e^{-t/T_d^{(n)}}; \quad (4.5)$$

$$\Delta I_{1np}^{(n)} \cdot F^{(n)}(t) = \left(\frac{E_{qnp}}{x_d + x_{BH1} + x_{\Delta}^{(n)}} - \frac{E_{q0}}{x_d + x_{BH1} + x_{\Delta}^{(n)}} \right) F^{(n)}(t), \quad (4.6)$$

где

$$F^{(n)}(t) = 1 - \frac{T_d'^{(n)} e^{-t/T_d'^{(n)}} - T_e e^{-t/T_e}}{T_d'^{(n)} - T_e} \quad \text{при } T_d'^{(n)} \neq T_e ;$$

$$F^{(n)}(t) = 1 - e^{-t/T_d'^{(n)}} \left(1 + \frac{t}{T_d'^{(n)}}\right) \quad \text{при } T_d'^{(n)} = T_e .$$

В этих выражениях:

E_{q0} - синхронная ЭДС генератора;

E'_{q0} - переходная ЭДС генератора;

E_{qnp} - предельное значение ЭДС генератора;

X_d - синхронная реактивность генератора в продольной оси;

X'_d - переходная ЭДС генератора в продольной оси;

$X_{вн1}$ - внешнее индуктивное сопротивление прямой последовательности (от шин генератора до места КЗ);

$X_{\Delta}^{(n)}$ - дополнительное сопротивление;

T_e - постоянная времени нарастания напряжения обмотки возбуждения генератора;

$$T_d'^{(n)} = T_{f(0)} \frac{X'_d + X_{вн1} + X_{\Delta}^{(n)}}{X_d + X_{вн1} + X_{\Delta}^{(n)}} - \text{постоянная времени затухания свободного}$$

переходного тока ($T_{f(0)}$ - постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутом статоре).

Примечание - Все приведенные выше выражения записаны для случая, когда не учитывается влияние демпферных обмоток.

Необходимо отметить, что величина тока прямой последовательности в месте короткого замыкания, а также связанные с ней величины токов других последовательностей зависят от сопротивлений всех последовательностей элементов рассматриваемой схемы. К примеру, если нейтраль трансформатора, на выводах которого имеется однофазное или двухфазное КЗ на землю, заземлить через какое-либо сопротивление, то это скажется на величине токов всех последовательностей, хотя токи прямой и обратной последовательностей через это сопротивление и не протекают.

Зная величины и закон изменения во времени тока $I_{1t}^{(n)}$ по выражению (4.3) можно определить соответствующее значение напряжения прямой последовательности в месте КЗ и закон его изменения.

Напряжение прямой последовательности на шинах генератора согласно рисунку 4.1 находится:

$$U_{Glt}^{(n)} = I_{lt}^{(n)} x_{\Delta}^{(n)} + I_{lt}^{(n)} x_{вн1} = I_{lt}^{(n)} (x_{вн1} + x_{\Delta}^{(n)}) \quad (4.7)$$

При анализе переходных процессов, протекающих при КЗ, представляет интерес сравнение различных видов короткого замыкания. Сделать такое сравнение позволяет правило эквивалентности прямой последовательности.

Если сравнить между собой величины дополнительных сопротивлений, то нетрудно заметить, что они находятся в следующих соотношениях:

$$x_{\Delta}^{(1)} > x_{\Delta}^{(2)} > x_{\Delta}^{(1,1)} > x_0^{(3)} = 0. \quad (4.8)$$

В соответствии с этим

$$I_{k1}^{(1)} < I_{k1}^{(2)} < I_{k1}^{(1d)} < I_k^{(3)}, \quad (4.9)$$

$$U_{k1}^{(1)} > U_{k1}^{(2)} > U_{k1}^{(1,1)} > U_k^{(3)} = 0. \quad (4.10)$$

Постоянные времени затухания свободного переходного тока также связаны неравенствами:

$$T_d^{(1)} > T_d^{(2)} > T_d^{(1,1)} > T_d^{(3)}. \quad (4.11)$$

На рисунке 4.2 показаны кривые изменения тока и напряжения прямой последовательности генератора при различных видах КЗ и некоторой величине внешней реактивности $X_{вн} > X_{кр}$.

Увеличение внешней реактивности статора, как известно, замедляет форсировку возбуждения. Однако благодаря тому, что при этом напряжение прямой последовательности падает меньше, его восстановление (если это вообще возможно) происходит за более короткий промежуток времени. Следовательно, величины критического времени при различных видах КЗ в одной и той же точке связаны неравенствами:

$$t_{кр}^{(1)} < t_{кр}^{(2)} < t_{кр}^{(1,1)} < t_{кр}^3. \quad (4.12)$$

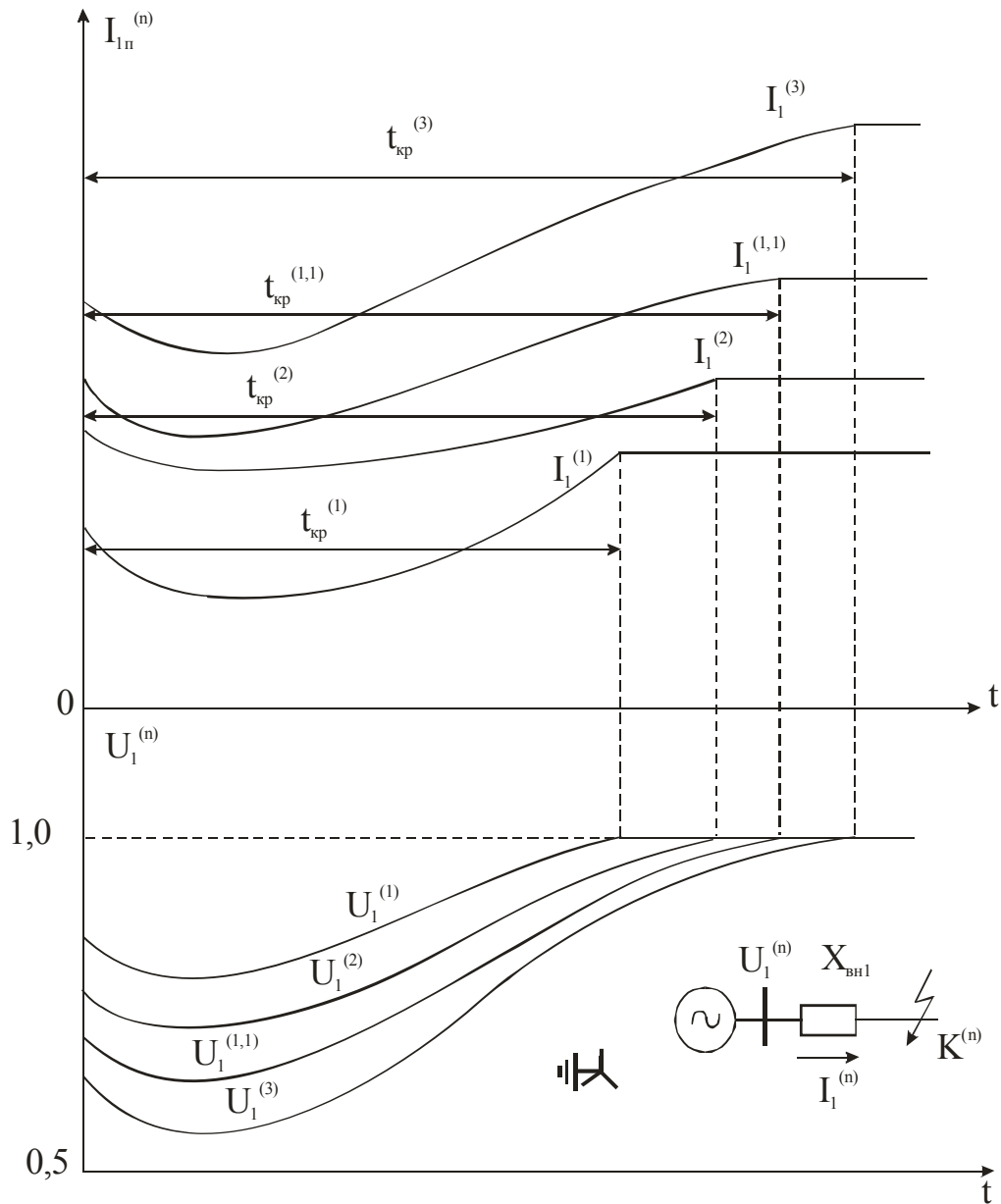


Рисунок 4.2

Анализируя кривые $I_1^{(n)} = f(t)$ и $U_1^{(n)} = f(t)$, можно заключить, что в случае $X_{вн} < X_{кр}$, при трехфазном КЗ напряжение генератора под действием АРВ не достигнет нормальной величины. Однако при несимметричном коротком замыкании, при котором $(X_{вн1} + X_{\Delta}^{(n)}) > X_{кр}$ напряжение прямой последовательности будет доведено до нормального значения.

Таким образом, чем больше дополнительная реактивность $X_{\Delta}^{(n)}$, тем медленнее осуществляется форсировка возбуждения, но вместе с тем раньше наступает установившейся режим короткого замыкания.

Рассмотрим примерные пределы, в которых могут находиться величины фазных токов при несимметричных КЗ по сравнению с величинами токов трехфазного короткого замыкания. Знание этих пределов представляет практический интерес, т.к. позволяет по известной для данной точки величине

тока трехфазного КЗ оценить в первом приближении возможные наибольшие и наименьшие значения тока при несимметричных коротких замыканиях.

Примечание - Приводимые ниже предельные соотношения справедливы только для токов в месте КЗ и не могут быть распространены на токи остальных ветвей рассматриваемой схемы.

Абсолютная величина соотношения фазного тока в месте любого (n) несимметричного КЗ к току трехфазного короткого замыкания называется **КОЭФФИЦИЕНТОМ НЕСИММЕТРИИ** и может быть представлена как

$$K_{(n-3)} = \frac{I_k^{(n)}}{I_k^{(3)}} = m^{(n)} \frac{E^{(n)}}{E^{(3)}} \cdot \frac{1}{1 + (x_{\Delta}^{(n)} / x_{1\Sigma})} \quad (4.13)$$

В случае приближенной оценки пределов изменения коэффициента несимметрии различием величин $E^{(n)}$ и $E^{(3)}$ пренебрегают и тогда

$$K_{(n-3)} = \frac{m^{(n)}}{1 + (x_{\Delta}^{(n)} / x_{1\Sigma})} \quad (4.14)$$

Рассмотрим, какие пределы наиболее характерны для коэффициента несимметрии.

1 Двухфазное короткое замыкание.

1.1. КЗ вблизи генератора.

1.1.1 $t=0$

В начальный момент короткого замыкания $X_{1\Sigma} \approx X_{2\Sigma}$, т.к. эти сопротивления по сути есть не что иное, как сопротивления прямой и обратной последовательностей генератора.

В этом случае

$$K_{(2-3)} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

1.1.2 $t=\infty$

В установившемся режиме КЗ $X_{1\Sigma} \gg X_{2\Sigma}$, поэтому $K_{(2-3)} \rightarrow \sqrt{3}$.

Таким образом при КЗ вблизи генератора имеем:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \leq K_{(2-3)} < \sqrt{3}$$

1.2 Удаленное КЗ.

При достаточно большой удаленности КЗ токи двух- и трехфазного короткого замыкания изменяются во времени мало, поэтому в течении всего процесса короткого замыкания между ними сохраняется приблизительно постоянное соотношение

$$I_k^{(2)} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} I_k^{(3)} = 0,87 \cdot I_k^{(3)}$$

2 Однофазное короткое замыкание.

Пределы изменения $K_{(1,1-3)}$ достаточно широки, т.к. реактивность $X_{0\Sigma}$ может изменяться практически от 0 до ∞ .

2.1 $t=0$

В начальный момент короткого замыкания в любой точке, практически, имеет место соотношение $X_{1\Sigma} \approx X_{2\Sigma}$, в том числе и при КЗ на шинах генератора.

Тогда при $X_{0\Sigma} \rightarrow 0$ $K_{(1-3)} \rightarrow 1,5$, а при $X_{0\Sigma} = \infty$, что соответствует полному отсутствию заземленных нейтралей, $K_{(1-3)} = 0$.

Таким образом в данном случае коэффициент несимметрии находится в диапазоне $0 \leq K_{(1-3)} < 1,5$ и изменяется в функции $X_{0\Sigma} / X_{1\Sigma}$, как показано на рисунке 4.3.

2.2 $t=\infty$.

В установившемся режиме КЗ сопротивление $X_{1\Sigma}$ может быть больше $X_{2\Sigma}$ и тогда при $X_{0\Sigma} \rightarrow 0$ $K_{(1-3)}$ будет больше 1,5. С увеличением различия между $X_{1\Sigma}$ и $X_{2\Sigma}$ коэффициент несимметрии возрастает, стремясь к 3.

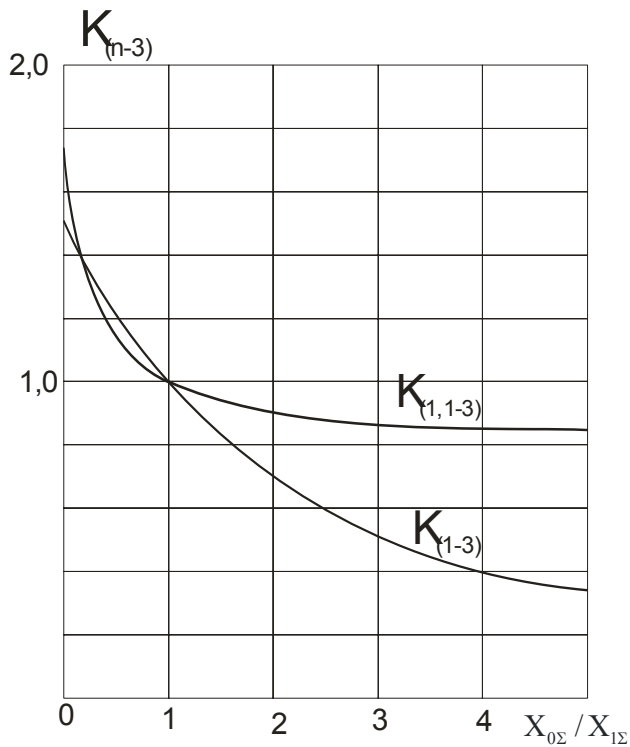


Рисунок 4.3

Таким образом в этом случае диапазон изменения коэффициента несимметрии следующий:

$$0 \leq K_{(1-3)} < 3$$

3 Двухфазное короткое замыкание на землю.

При этом виде КЗ пределы изменения коэффициента несимметрии те же, что при двухфазном коротком замыкании, т.е. $\sqrt{3}/2 < K_{(1,1-3)} < \sqrt{3}$.

Изменение коэффициента $K_{(1,1-3)}$ в функции $x_{0\Sigma} / x_{1\Sigma}$ при условии $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma}$ показано на рисунке. Нетрудно заметить, что в диапазоне $x_{0\Sigma} / x_{1\Sigma} = 0.2 \div 1.0$ ток однофазного КЗ немного больше тока двухфазного КЗ на землю, в то время как при всех остальных значениях $x_{0\Sigma} / x_{1\Sigma}$ имеет место обратное соотношение, которое прогрессивно увеличивается с ростом отношения $x_{0\Sigma} / x_{1\Sigma}$.

4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1 Собрать схему лабораторных испытаний, показанную на рисунке 4.4 (ВСЕ модули стенда должны быть **ОТКЛЮЧЕНЫ!**).

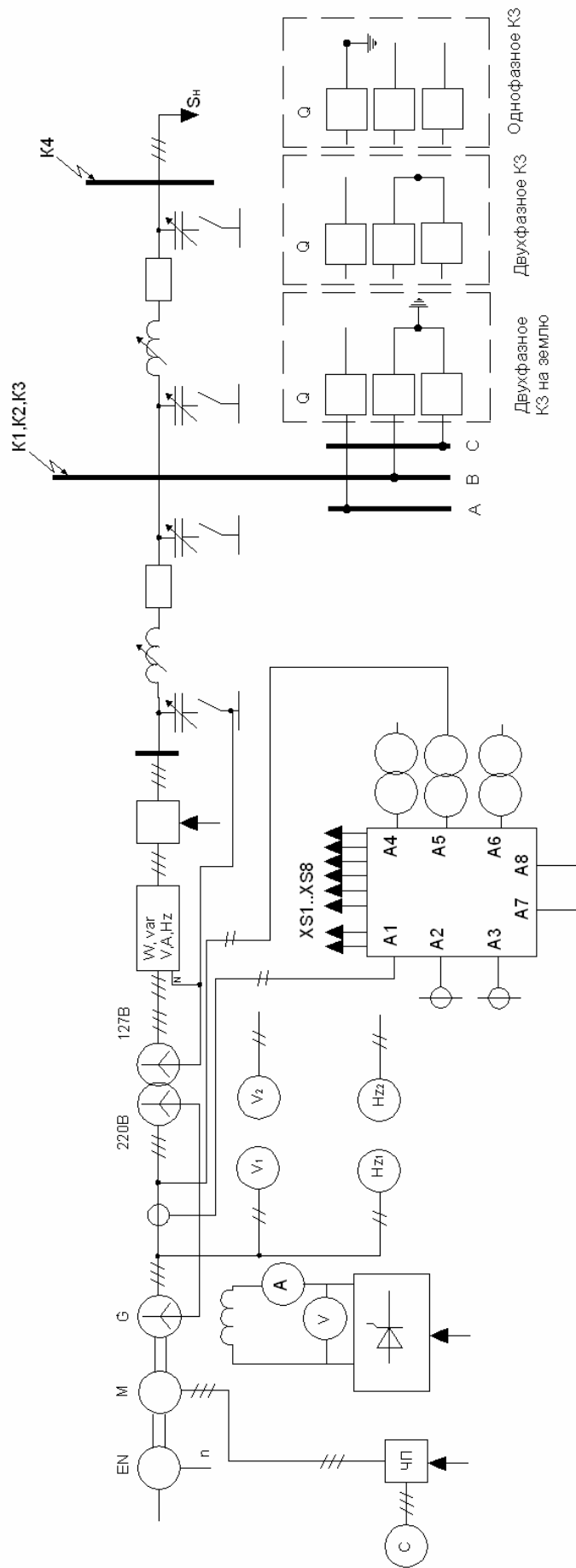


Рисунок 4.4 – Схема лабораторных испытаний

4.3.1.1 Особенности работы со схемой:

На рисунке представлена схема радиального питания нагрузки S_n через две последовательно включенные линии электропередачи, работающая с **глухозаземлённой нейтралью**. Для каждой ЛЭП существует возможность установить переключатель её длины SA1 в одно из трёх положений. При проведении экспериментов необходимо, чтобы сумма значений переключателей SA1 обеих ЛЭП всегда была равна 2 (двум). В этом случае суммарная длина ЛЭП1 и ЛЭП2 будет оставаться неизменной, равной 4 (четырёх) условным единицам, или 100%. Однако, в зависимости от соотношения положений переключателей SA1 первой и второй линий, можно получить различные расстояния до точки короткого замыкания, расположенной между двумя ЛЭП. Варианты, которые можно получить, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

№ точки КЗ	Расстояние до точки КЗ, %	Положение SA1 ЛЭП1	Положение SA1 ЛЭП2
К1	25%	1	3
К2	50%	2	2
К3	75%	3	1

Дополнительно можно получить точку К4, при коротком замыкании на шинах нагрузки (за ЛЭП2). Трёхфазный выключатель Q используется для имитации короткого замыкания в точках К1, К2, К3, К4 (на схеме показан вариант подключения выключателя для создания короткого замыкания в точках К1, К2 и К3). Для обеспечения работы автоматического регулятора возбуждения и возможности осциллографирования действующих значений токов и напряжений к датчику А1 модуля ввода-вывода подводится ток фазы А статорной обмотки синхронного генератора, а к датчику напряжения А5 – линейное напряжение U_{ab} статорной обмотки генератора. Измерения фазных токов, линейных и фазных напряжений генератора производится с помощью универсального измерителя мощности, включенного за трансформатором (между трансформатором и ЛЭП). Измерения осуществляются относительно нейтрали ЛЭП. Измерение частоты и грубое измерение линейного напряжения производятся с помощью измерительного модуля, содержащего 2 вольтметра и 2 частотомера, которые включаются на линейное напряжение генератора (два других прибора не используются). В качестве нагрузки S_n рекомендуется использовать модуль индуктивной нагрузки, включенный по схеме «звезда без нулевого провода». Нейтраль трансформатора со стороны первичной обмотки (со стороны генератора) подключается к нейтрали статорной обмотки генератора;

4.3.2 Установить переключатели SA1 модулей ЛЭП в положения, соответствующие точке короткого замыкания КЗ. Ёмкостную составляющую ЛЭП1 (линия, находящаяся ближе к генератору) установить в среднее положение (переключатели SA2 и SA3 в положение 2). Ёмкостную составляющую ЛЭП2

(линия, находящаяся ближе к нагрузке) отключить (переключатели SA2 и SA3 в положение 1);

4.3.3 Установить переключатель величины индуктивности SA1 модуля индуктивной нагрузки в положение 3;

4.3.4 перевести переключатели режима управления всех задействованных модулей в положение «Руч.»;

4.3.5 Установить потенциометры задания RP1 модуля частотного преобразователя и модуля возбуждения в крайнее **левое** положение;

4.3.6 Подать питание на стенд, включив автомат модуля питания стенда;

4.3.7 Включить все задействованные модули, имеющие индивидуальный тумблер подачи питания «Сеть»;

4.3.8 Переключатель «ВПЕРЁД – НАЗАД» на панели модуля частотного преобразователя перевести из нейтрального положения в положение «ВПЕРЁД»;

4.3.9 Плавно увеличивая напряжение задания модуля частотного преобразователя (потенциометр RP1), установить уставку частоты вращения приводного двигателя на уровне 50 Гц;

4.3.10 Плавно увеличивая напряжение задания модуля возбуждения (потенциометр RP1), установить ток возбуждения, соответствующий номинальному линейному напряжению генератора 220 В (следить по показаниям универсального измерителя мощности);

4.3.11 При необходимости, скорректировать уставку частотного преобразователя, если частота по показаниям частотомера не равна 50 Гц;

4.3.12 Записать величину действующего значения линейного напряжения генератора на холостом ходу;

4.3.13 Включить генераторный выключатель;

4.3.14 Записать величины действующих значений линейного напряжения и фазного тока генератора при работе на индуктивную нагрузку;

4.3.15 Включить выключатель Q, имитирующий двухфазное короткое замыкание в точке К3;

4.3.16 По показаниям универсального измерителя мощности записать величины действующих значений напряжений и токов всех фаз блока генератор – трансформатор при коротком замыкании в точке К3;

4.3.17 Выключить выключатель Q;

4.3.18 Выключить генераторный выключатель;

4.3.19 Прodelать аналогичные опыты при двухфазном КЗ на землю и однофазном КЗ, подключая соответствующим образом выключатель Q;

4.3.20 Установить переключатели SA1 модулей обеих ЛЭП в положения, соответствующие точке короткого замыкания К2;

4.3.21 Включить генераторный выключатель;

4.3.22 Включить выключатель Q, имитирующий двухфазное короткое замыкание в точке К2;

4.3.23 Записать величины действующих значений линейного напряжения и фазного тока генератора при коротком замыкании в точке К2;

4.3.24 Выключить выключатель Q;

4.3.25 Выключить генераторный выключатель;

- 4.3.26 Прodelать аналогичные опыты при двухфазном КЗ на землю и однофазном КЗ, подключая соответствующим образом выключатель Q;
- 4.3.27 Подсоединить выключатель Q в конец ЛЭП2 (в точку подключения нагрузки) и провести испытания при различных видах несимметричного КЗ в точке К4;
- 4.3.28 Построить зависимости действующего значения установившегося тока статора и линейного напряжения синхронного генератора от удалённости места повреждения без учёта влияния АРВ для каждого вида КЗ;
- 4.3.29 Отключить питание стенда;
- 4.3.30 Сравнить токи при различных видах КЗ и сделать выводы;
- 4.3.31 Соединить кабелем разъём XS1 на лицевой панели модуля возбуждения с разъёмом XS2 на лицевой панели модуля ввода-вывода;
- 4.3.32 Установить потенциометры задания RP1 модуля частотного преобразователя и модуля возбуждения в крайнее **левое** положение;
- 4.3.33 Перевести переключатель режима управления модуля возбуждения в положение «Авт.»;
- 4.3.34 Установить переключатели SA1 модулей ЛЭП в положения, соответствующие точке короткого замыкания К1;
- 4.3.35 Подать питание на стенд, включив автомат модуля питания стенда;
- 4.3.36 Включить все задействованные модули, имеющие индивидуальный тумблер подачи питания «Сеть»;
- 4.3.37 Плавно увеличивая напряжение задания модуля частотного преобразователя (потенциометр RP1), установить уставку частоты вращения приводного двигателя на уровне 50 Гц;
- 4.3.38 На персональном компьютере запустить «менеджер автоматического управления» (команда: Пуск – Программы – Модель энергосистемы – Автоматическое управление – Менеджер управления);
- 4.3.39 Из контекстного меню «менеджера автоматического управления» необходимо выбрать команду «Загрузить состояние» и в появившемся диалоговом окне открыть файл настроек, расположенный в папке «с:\auto\projects\АРВ»;
- 4.3.40 Из контекстного меню «менеджера автоматического управления» выбрать команду «Управление»;
- 4.3.41 Подать команду на включение модуля возбуждения. Для этого установить переключатель SX1 в окне «Универсальный пульт управления» во включенное состояние (отображается «галочка»);
- 4.3.42 В том же окне выделить виртуальный регулятор A17 щелчком левой кнопки мыши или нажатием клавиши «tab» несколько раз (вокруг регулятора появится пунктирная рамка);
- 4.3.43 Медленно повышая величину задания на регуляторе A17 (стрелка вверх на клавиатуре), установить линейное напряжение на статорной обмотке 220 В;
- 4.3.44 Провести серию испытаний при различных видах несимметричного КЗ в различных точках сети и работе автоматического регулятора возбуждения.
- ВНИМАНИЕ!** При проведении экспериментов **СЛЕДИТЬ ЗА ТОКОМ**

ВОЗБУЖДЕНИЯ, который **НЕ ДОЛЖЕН БЫТЬ БОЛЬШЕ 1,6 А ВО ВСЕХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**. Если это не так, то следует как можно быстрее отключить короткое замыкание (выключатель Q), отключить возбуждение (переключатель SX1 на ПК), проверить правильность сборки схемы (особенно обратить внимание на наличие обратной связи по напряжению через датчик напряжения A5) и, если необходимо, снизить величину уставки по напряжению (виртуальный потенциометр A17 на ПК) для проведения опыта на пониженном напряжении (в этом случае все токи возбуждения будут меньше);

4.3.45 Построить зависимости действующего значения установившегося тока статора и линейного напряжения синхронного генератора от удалённости места повреждения с учётом влияния APB для каждого вида короткого замыкания;

4.3.46 Установить переключатели SA1 модулей ЛЭП в положения, соответствующие точке короткого замыкания КЗ;

4.3.47 На ПК из контекстного меню «менеджера автоматического управления» выбрать команду «Регистратор сигналов»;

4.3.48 В появившемся диалоговом окне задать следующие настройки: *тип регистратора* – зависимость сигнала от времени; *функции* – выбрать $Y0=A1$, $Y1=A5$; *тип измерений* – по таймеру с интервалом в 55мс; *управление регистратором* – ручное;

4.3.49 Нажать кнопку «Запуск» (при этом генератор должен работать на нагрузку с напряжением статорной обмотки, близким к номинальному);

4.3.50 Включить выключатель Q, имитируя короткое замыкание;

4.3.51 Когда ток и напряжение достигнут установившегося значения, отключить короткое замыкание (выключатель Q);

4.3.52 Нажать кнопку «Стоп» регистратора сигналов;

4.3.53 На экране монитора появится запись зависимости действующих значений тока и напряжения генератора от времени, которую нужно сохранить в файл формата Excel, нажав кнопку «Сохранить как...» (**процесс сохранения может занять несколько минут**), а затем распечатать.

Второй вариант: скопировать содержимое экрана кнопкой «PrtSc» и распечатать;

4.3.54 Выключить генераторный выключатель;

4.3.55 Провести аналогичную процедуру при двухфазном на землю и однофазном коротких замыканиях, подключая соответствующим образом выключатель Q;

4.3.56 Отключить питание стенда;

4.3.57 Проанализировать полученные результаты, сделать выводы и оформить отчёт.

4.4 Требования к оформлению отчёта

Отчёт должен содержать расчётную схему, схему замещения, исходные данные. К отчёту прилагаются построенные зависимости токов и напряжений при переходном процессе, а также осциллограммы которые анализируются в

соответствии с заданием на работу. Результаты анализа и выводы включаются в отчёт.

4.5 Контрольные вопросы

1. Как формулируется и используется «правило эквивалентности прямой последовательности»?
2. В чем выражается влияние АРВ на ток прямой последовательности при различных видах КЗ?
3. Какие факторы влияют на время восстановления напряжения?
4. Какую роль при несимметричном КЗ играет характер заземления нейтралей трансформаторов?
5. Что такое коэффициент несимметрии? В чем его практическое значение?

4.6 Дополнительная литература

- 4.6.1 Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах/С.А.Ульянов. - М.: Энергия, 1970, с.325-346;
- 4.6.2 Куликов, Ю.А, Переходные процессы в электрических системах/Ю.А.Куликов. - М.: МИР, 2003, с.84-118;
- 4.6.3 Крючков, И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах/И.П.Крючков. - М.: Издательство МЭИ, 2000, с.121-157.

5 Лабораторная работа №4 Исследование переходных процессов при замыкании на землю в распределительных сетях 6-35 кВ

5.1 Цель работы

Исследовать различные режимы работы сети с изолированной нейтралью. Выявить зависимость тока замыкания на землю от протяжённости электрически связанных линий электропередачи, а также от величины индуктивного тока, создаваемого дугогасящим устройством.

5.2 Основные положения

Распределительные сети 6-35 кВ работают с изолированной нейтралью трансформаторов, генераторов или с резонансно-компенсированной нейтралью, когда нейтраль заземляется через индуктивное сопротивление большой величины.

Наиболее частым повреждением в таких сетях является замыкание одной фазы на землю (простое замыкание), сопровождаемое перекосом фазных напряжений, протеканием в месте повреждения ёмкостных токов и рядом других, важных для эксплуатации, факторов. Поэтому изучение явлений, связанных с замыканием фазы на землю, представляет большой практический интерес.

В рассматриваемых распределительных сетях при нормальном режиме работы помимо рабочих токов по проводам протекают и ёмкостные токи, которые замыкаются через изолирующую среду, распределяясь как между проводами, так и между проводами и землёй. Обычно ёмкости проводов воздушных или кабельных линий по отношению к земле, а также ёмкости между проводами равны между собой, поэтому ёмкостные токи симметричны, их геометрическая сумма равна нулю и ток в земле отсутствует.

При возникновении металлического замыкания на землю какой-либо из фаз симметрия напряжения в системе нарушается. Напряжение повреждённой фазы снижается до нуля, а напряжения здоровых фаз повышается в $\sqrt{3}$ раз, т.е. становится равным линейному напряжению. Одновременно на нейтрали появляется потенциал по отношению к земле, по величине равный напряжению повреждённой фазы, но с обратным знаком.

В связи с нарушением симметрии напряжения нарушается и симметрия ёмкостных токов, в результате чего в земле будет протекать ток. Ток, поступая в землю в месте замыкания, возвращается в схему по неповреждённым фазам через их ёмкостные проводимости.

Ёмкостная проводимость повреждённой фазы оказывается зашунтированной рассматриваемым замыканием, и ток в этой фазе за местом замыкания отсутствует.

Ёмкостные сопротивления элементов электрической системы значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, что позволяет

пренебречь последними и, следовательно, считать, что величина этого тока практически не зависит от места замыкания в рассматриваемой электрически связанной сети. Ток в месте замыкания на землю определяется по формуле:

$$I_3 = 3j \frac{U_{\phi.cр}}{X_{c0}}, \quad (5.1)$$

где $U_{\phi.cр}$ - среднее фазное напряжение той ступени, где рассматривается замыкание на землю;

X_{c0} - результирующее ёмкостное сопротивление нулевой последовательности воздушных и кабельных линий, электрически связанных с местом замыкания.

Для грубой оценки величины тока замыкания на землю можно использовать формулу:

$$I_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi.cр}}{N} \cdot l, \quad (5.2)$$

где l - суммарная длина воздушных или кабельных линий, электрически связанных с местом замыкания на землю, км;

N - коэффициент, принимаемый равным для воздушных линий 350 и для кабельных 10.

На практике замыкания на землю часто возникают через электрическую дугу, которая вызывает перенапряжение, опасное для изоляции электроустановки. Опытным путём было установлено (а затем регламентировано ПУЭ), что для обеспечения самопогасания дуги необходимо, чтобы ток замыкания на землю не превышал:

- при 6 кВ – 30А,
- при 10 кВ – 20А,
- при 20кВ – 15А,
- при 35кВ – 10А.

Для ограничения тока замыкания на землю нейтрали трансформаторов заземляют через специальную катушку индуктивности. Индуктивность такой катушки можно выбрать так, чтобы в цепи, где протекает ток нулевой последовательности был обеспечен резонанс между индуктивностью и ёмкостью ($X_{c0} = \infty$), т.е. к полной компенсации тока замыкания на землю. Данное условие будет выполнено при

$$X_L = \frac{X_{c0}}{3}. \quad (5.3)$$

Такие катушки называются дугогасящими. Наиболее часто в качестве подобных катушек используют дугогасящие реакторы. Их выполняют с регулированием индуктивности для того, чтобы производить настройку при изменениях в защищаемой сети.

Реально, ток в месте замыкания на землю никогда не может быть скомпенсирован до нуля. Даже при полной настройке дугогасящих устройств будет протекать остаточный ток, обусловленный активными потерями в устройстве компенсации, утечками на землю и высшими гармониками.

Остаточный ток определяется по формуле:

$$I_{ост} = I_c \cdot \sqrt{t^2 + \left(\frac{I_{акт}}{I_c}\right)^2}, \quad (5.4)$$

где $t = \frac{I_L - I_c}{I_c}$ - коэффициент настройки дугогасящего устройства;

I_L - ток в катушке индуктивности;

I_c - ток, обусловленный ёмкостью сети;

$I_{акт}$ - активная составляющая тока.

5.3 Порядок выполнения работы

5.3.1 Собрать схему лабораторных испытаний, показанную на рисунке 5.1 (ВСЕ модули стенда должны быть **ОТКЛЮЧЕНЫ!**).

5.3.1.1 Особенности работы со схемой:

На схеме источник питания, представляющий собой блок генератор – трансформатор, обеспечивает электроснабжение радиальной распределительной сети с изолированной нейтралью. Сеть состоит из двух линий электропередачи, запитанных от одного общего источника. Одна из линий находится на холостом ходу (под напряжением, но без нагрузки), вторая работает на индуктивную нагрузку S_n . В конце нагруженной линии предусматривается возможность создания замыкания на землю одной вазы (точка З1) с помощью выключателя Q. Измерение токов фаз осуществляется с помощью универсального измерителя мощности (**измерения производятся относительно нейтрали ЛЭП**). Измерение частоты и грубое измерение линейного напряжения производятся с помощью измерительного модуля, содержащего 2 вольтметра и 2 частотомера, которые включаются на линейное напряжение генератора (два других прибора не используются). В качестве нагрузки S_n рекомендуется использовать модуль индуктивной нагрузки, включенный по схеме «звезда без нулевого провода». Нейтраль трансформатора со стороны первичной обмотки (со стороны генератора) подключается к нейтрали статорной обмотки генератора;

На рисунке 5.2 показан вариант схемы сети, работающей с **резонансно – компенсированной нейтралью**. В качестве компенсирующего реактора

используется модуль линейного реактора, все три индуктивности которого включены последовательно в соответствии с рисунком 5.2;

5.3.2 Установить переключатели SA1 модулей ЛЭП в положение 3. Ёмкостную составляющую линии, питающей индуктивную нагрузку, установить в среднее положение (переключатели SA2 и SA3 в положение 2), ёмкостную составляющую линии, находящейся на холостом ходу, отключить (переключатели SA2 и SA3 в положение 1);

5.3.3 Установить переключатель величины индуктивности SA1 модуля индуктивной нагрузки в положение 3;

5.3.4 Перевести переключатели режима управления всех задействованных модулей в положение «Руч.»;

5.3.5 Установить потенциометры задания RP1 модуля частотного преобразователя и модуля возбуждения в крайнее **левое** положение;

5.3.6 Подать питание на стенд, включив автомат модуля питания стенда;

5.3.7 Включить все задействованные модули, имеющие индивидуальный тумблер подачи питания «Сеть»;

5.3.8 Переключатель «ВПЕРЁД – НАЗАД» на панели модуля частотного преобразователя перевести из нейтрального положения в положение «ВПЕРЁД»;

5.3.9 Плавно увеличивая напряжение задания модуля частотного преобразователя (потенциометр RP1), установить уставку частоты вращения приводного двигателя на уровне 50 Гц;

5.3.10 Плавно увеличивая напряжение задания модуля возбуждения (потенциометр RP1), установить ток возбуждения, соответствующий номинальному линейному напряжению генератора 220 В (следить по показаниям универсального измерителя мощности);

5.3.11 При необходимости, скорректировать уставку частотного преобразователя, если частота по показаниям частотомера не равна 50 Гц;

5.3.12 Записать величины действующих значений фазных токов и напряжений источника питания на холостом ходу;

5.3.13 Включить выключатель источника питания;

5.3.14 Записать величины действующих значений фазных токов и напряжений источника при работе на индуктивную нагрузку;

5.3.15 Включить выключатель Q, имитирующий замыкание на землю одной фазы в точке 31;

5.3.16 По показаниям универсального измерителя мощности записать величины действующих значений напряжений и токов всех фаз блока генератор – трансформатор при замыкании в точке 31;

5.3.17 Выключить выключатель Q;

5.3.18 Выключить генераторный выключатель;

5.3.19 Перевести переключатели SA2 и SA3 рабочей линии в положение 2, соответствующее удвоенному значению ёмкостной составляющей ЛЭП, что может быть интерпретировано как увеличение длины линии электропередачи;

5.3.20 Повторить опыт замыкания и записать полученные значения фазных токов и напряжений;

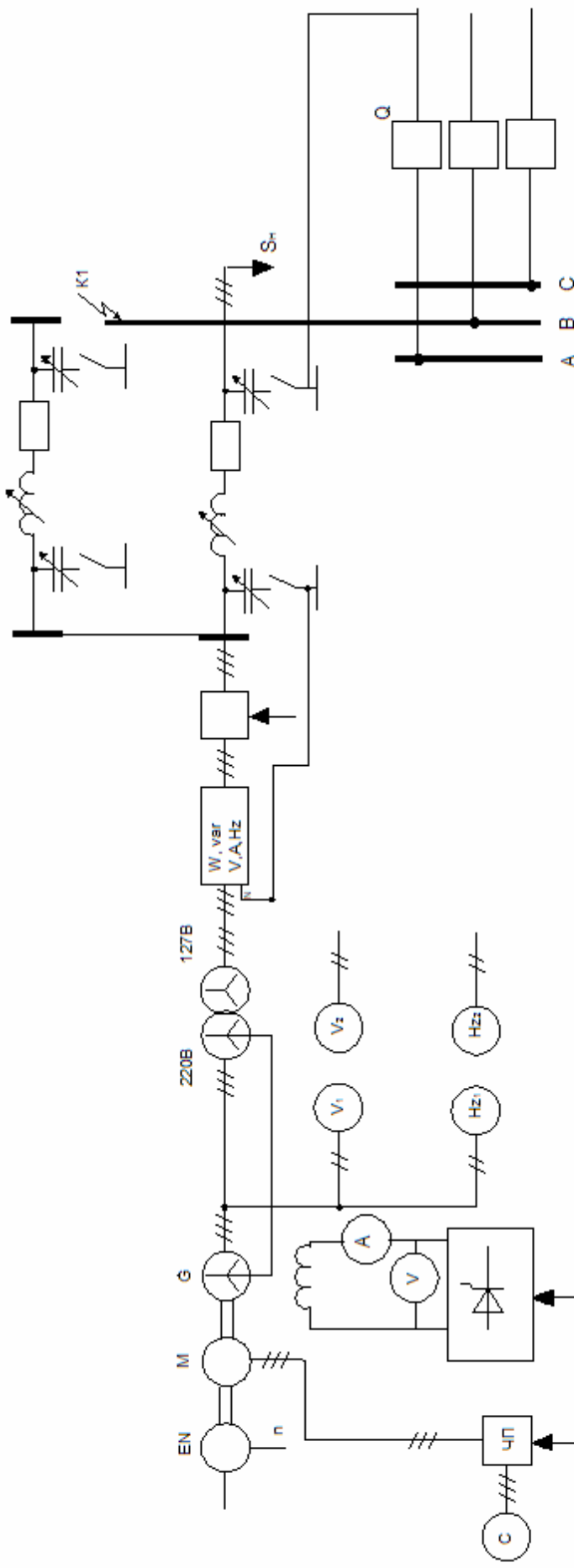


Рисунок 5.1 - Схема лабораторных испытаний (изолированная нейтраль)

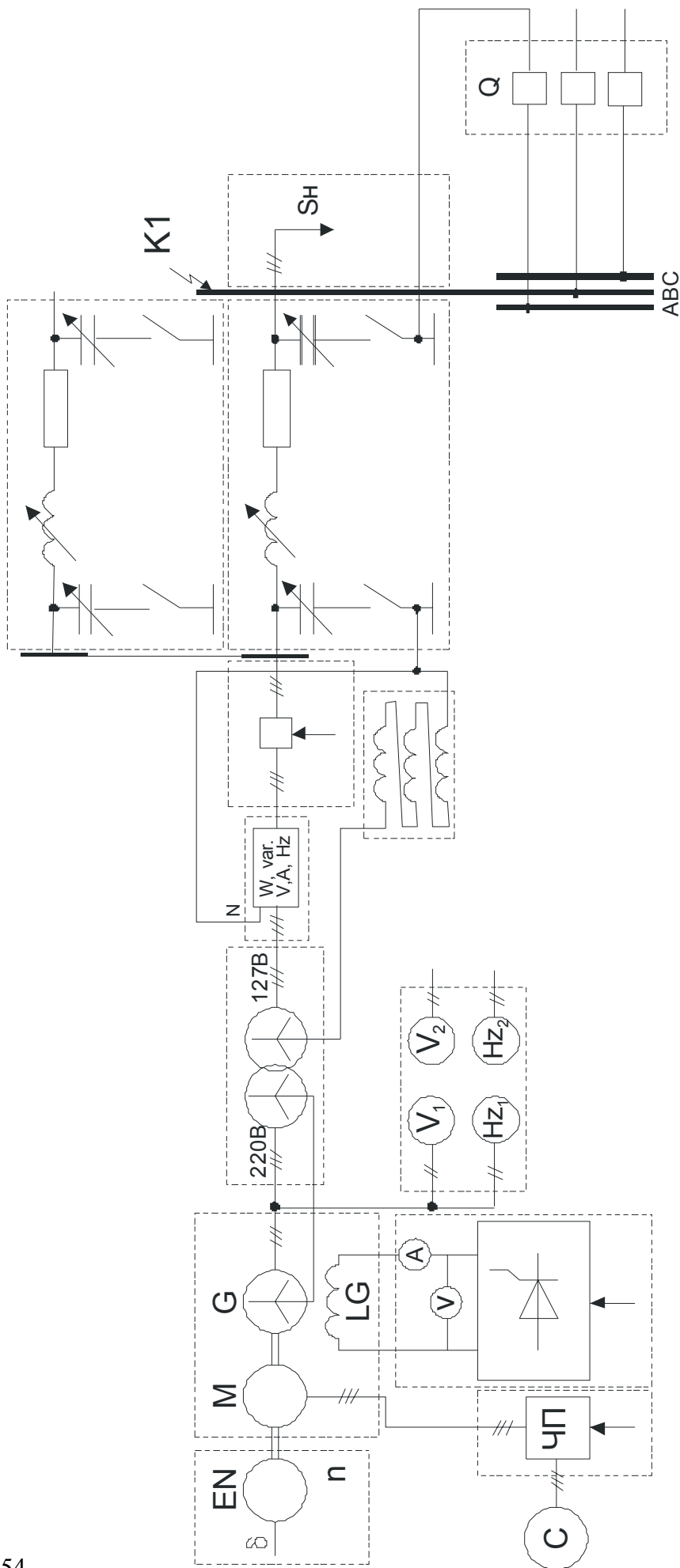


Рисунок 5.2-Схема лабораторных испытаний (резонансно-компенсированная нейтраль).

5.3.21 Включить ёмкостную составляющую ЛЭП, находящейся на холостом ходу. Для этого необходимо перевести переключатели SA2 и SA3 этой ЛЭП в положение 2. Это эквивалентно увеличению суммарной протяжённости линий электропередачи в сети с изолированной нейтралью;

5.3.22 Не меняя параметров линий электропередачи, добавить в схему компенсирующий реактор в соответствии с рисунком 5.2;

5.3.23 Провести опыт замыкания и записать действующие значения токов и напряжений всех фаз;

5.4 Требования к оформлению отчёта

Отчёт должен содержать расчётную схему, схемы замещения всех последовательностей, таблицы измеренных величин. В отчёт включаются векторные диаграммы, построенные для случаев недокомпенсации, перекомпенсации ёмкостного тока и резонансной настройки, а также результаты анализа и выводы.

5.5 Контрольные вопросы

5.5.1 Каков принцип компенсации ёмкостных токов в сетях с изолированной нейтралью? Какие последствия могут иметь место, если не производить компенсацию?

5.5.2 Что такое остаточный ток в месте замыкания на землю и способы его уменьшения?

5.5.3 Какие типы дугогасящих устройств применяются в электрических сетях, их достоинства и недостатки?

5.6 Дополнительная литература

5.6.1 Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах/С.А.Ульянов. - М.: Энергия, 1970, с.434-440;

5.6.2 Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах/Ю.А.Куликов. - М.: МИР, 2003, с.145-151;