

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**Часть I**

**Электромагнитные переходные процессы  
в электрических системах**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к лабораторным работам**

ТАШКЕНТ - 2022

УДК 621.311.2

Махмудов Т.Ф, Нурматов О.Ё. Переходные процессы (Часть 1. Электромагнитные переходные процессы). / Методические указания к лабораторным работам. – Ташкент: ТашГТУ, 2022 – 53 с.

Методические указания включают описания лабораторных работ по курсу «Переходные процессы» (Часть 1. Электромагнитные переходные процессы).

Данные работы охватывают комплекс вопросов исследования электромагнитных переходных процессов, возникающих в электрических системах при коротких замыканиях, вопросы расчета и анализа режимов симметричных и несимметричных коротких замыканий аналитическими и практическими методами.

В описании каждой лабораторной работы приведены необходимые теоретические сведения и перечень контрольных вопросов.

Комплекс лабораторных работ имеет целью закрепление студентами изучаемого теоретического материала, а также приобретение навыков в решении практических задач расчета электромагнитных переходных процессов, а именно: симметричных и несимметричных коротких замыканий с помощью современных компьютерных средств.

Данные методические указания разработаны для студентов направления 60710600 - Электроэнергетика (производство, передача и распределение энергии).

Печатаются по решению научно-методического совета ТашГТУ. Протокол №10 от 29 июня 2022г.

Рецензенты: проф. Таслимов А.Д. (ТашГТУ);

доц. Мирзаев А.Т. (АО «НЭС Узбекистана»)

## Введение

Все системы производства и распределения электрической энергии работают в различных режимах. В самом общем случае устойчивого режима работы в таких системах никогда не встречается, так как в любой момент времени уровень потребления энергии может измениться. Это вызывает перераспределение потоков мощности. Однако в большинстве случаев изменение в системе не носит спонтанного характера, поэтому такие режимы работы относят к устойчивым режимам.

Среди нормальных режимов работы выделяются случаи кратковременных воздействий на систему, вызывающих всплеск токов потребителей, которые превышают номинальные значения трансформаторов, кабелей, ЛЭП, выключателей и других устройств систем распределения электрической энергии. Анализ таких режимов работы вызывает особый интерес, так как аппараты коммутации и передачи электрической энергии должны предусматривать прохождение таких токов.

К аварийным ситуациям относятся и нарушения, вызванные обрывами проводов или значительными асимметриями трехфазной системы. Такие отклонения могут также привести к выходу из строя элементов энергосистем.

Для выбора аппаратуры защиты всех элементов энергосистем при их проектировании необходимо уметь прогнозировать возможные нарушения нормального режима работы. В настоящее время используется давно устоявшийся метод анализа аварийных режимов работы, базирующийся на упрощении расчетов, связанных с идеализацией параметров элементов систем. С другой стороны, в значительной степени искусственно упрощается и структура самой анализируемой системы путем замены группы потребителей одним эквивалентным потребителем. Такое упрощение вызвано сложностью расчетов. С внедрением вычислительной техники математические вычисления могут быть выполнены с помощью персональных компьютеров. Но использование математических средств требует составления программ вычислений по традиционным формулам, поэтому такой подход к решению задач проектирования просто неэффективен.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМЕ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**Цель работы:** освоение методики определения токов короткого замыкания в электроэнергетических системах путем моделирования в среде MatLAB.

#### Рабочее задание

#### Подготовка к лабораторной работе

Подготовка к лабораторной работе предполагает:

– Используя рекомендованные для курса учебники, материал лекций и вспомогательной литературы, изучить теоретические основы вычисления токов короткого замыкания в системах передачи электрической энергии.

– По заданным в табл. 1.1 номинальным значениям напряжений источника, линии, напряжения нагрузки и ее мощности выбрать типы трансформаторов и линии электропередач простейшей системы, схема которой представлена на рис. 1.1.

Примечание. Схема составлена с учетом предположения, что источником электрической энергии для системы является генератор бесконечно большой мощности. В представленной модели генератор заменен сетью Net.

– Составить схему замещения простейшей цепи. Рекомендуется привести параметры элементов системы к линии электропередачи.

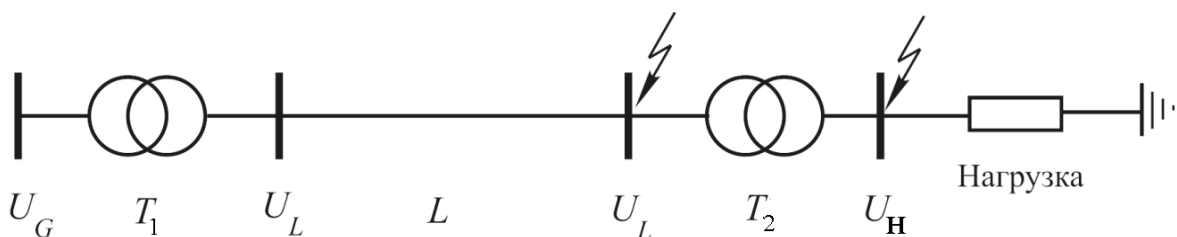


Рис. 1.1 Простейшая схема электрической системы

Таблица 1.1

Номер варианта	$U_{Г}$ , кВ	$U_{Д}$ кВ	$U_{Н}$ кВ	$P$ , МВт	$\cos \varphi$	$l$ , км
1	6,6	500	38,5	100	0,6	200
2	10,5	330	38,5	125	0,65	250
3	6,3	220	11	32	0,7	170
4	11	115	6,6	16	0,75	130
5	6,6	115	10,5	16	0,8	220
6	10,5	500	6	120	0,85	250
7	6,3	330	15,75	200	0,9	100
8	11	230	6,6	200	0,95	150
9	11	115	6,6	16	0,62	100
10	10,5	115	38,5	25	0,67	200
11	6,3	500	10,5	125	0,72	250
12	15	330	6,6	200	0,77	100
13	8,5	220	6,6	200	0,82	150
14	11	115	6,6	40	0,87	200
15	6,6	115	11	40	0,92	150
16	8,5	500	11	125	0,97	200
17	11	330	6,6	200	0,6	250
18	10,5	220	8,5	200	0,65	200
19	6,6	115	11	63	0,7	140
20	11	115	6,6	63	0,75	250
21	11	500	10	125	0,8	100
22	10,5	330	15	200	0,85	150
23	6,6	220	11	40	0,9	160
24	6,6	115	11	80	0,95	150
25	11	115	6,6	15	0,62	200
26	10,5	500	38,5	250	0,67	150
27	6,3	330	11	200	0,72	220
28	6,6	220	11	40	0,77	200
29	6,3	115	10,5	10	0,82	250
30	11	115	6,6	10	0,87	150
31	6,3	500	38,5	250	0,92	170
32	10	330	38,5	125	0,97	130
33	11	220	6,6	40	0,6	170
34	10,5	115	6,6	63	0,65	180
35	6,6	115	11	63	0,7	230

– Используя традиционные методы расчета электрических цепей, вычислить токи короткого замыкания входной и выходной обмоток первого трансформатора при трехфазном коротком замыкании на шинах первичной и вторичной обмоток второго трансформатора.

– На основании паспортных данных элементов системы и предыдущих вычислений рассчитать параметры элементов для использования при моделировании. Следует обратить внимание на то, что в модели используются параметры элементов в абсолютных и относительных единицах. Методика вычислений параметров представлена в учебниках и в методическом пособии «Справочник элементов энергосистем среды MatLAB». На рис. 1.2 представлена модель простейшей системы передачи электрической энергии

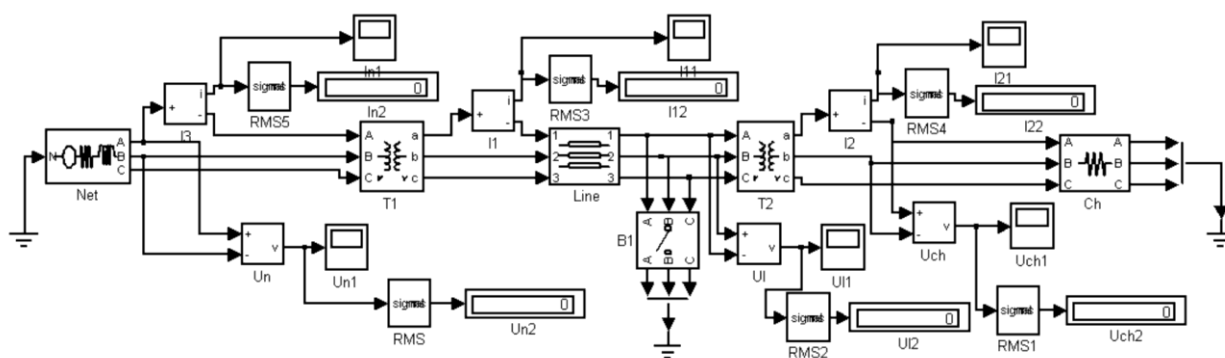


Рис. 1.2 Модель простейшей системы передачи электрической энергии

## Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования заключаются в следующем:

– Открыть файл модели простейшей системы передачи электрической энергии LR11.

– Последовательно открывая окна параметров элементов модели электрической системы, ввести цифровые данные, полученные в результате предварительного расчета.

– При заполнении параметров выключателя установить его начальное положение «открыто». Время срабатывания выключателя установить равным 1 с.

– Запустить моделирование и дождаться его окончания.

– С помощью осциллографов проконтролировать законы изменения мгновенных значений токов и напряжений во времени.

– Запомнить полученные с помощью осциллографов кривые для дальнейшего анализа и составления отчета.

– Открыть файл модели простейшей системы передачи электрической энергии LR12. Следует обратить внимание на то, что короткозамыкатель подключен к выходу второго трансформатора. Это сделано для того, чтобы проанализировать влияние параметров второго трансформатора на силу токов короткого замыкания.

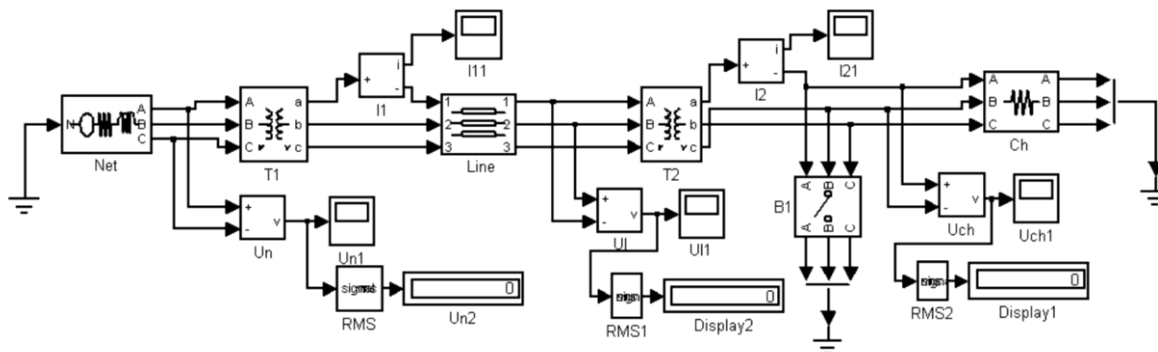


Рис. 1.3 Модель простейшей системы передачи электрической энергии

- Установить параметры элементов модели так, как это было сделано ранее (рис. 1.3).
- Запустить симуляцию модели и дождаться ее окончания.
- С помощью осциллографов проследить изменение токов и напряжений системы при коротком замыкании на шинах нагрузки.
- Запомнить графики изменения токов и напряжений элементов системы для дальнейшего анализа и составления отчета.
- По законам изменения токов, полученных с помощью осциллографов 1 и 3 определить действующие значения токов вторичной обмотки первого трансформатора и нагрузки. Полученные значения занести в таблицу зависимости токов от длины линии.
- Открыть окно параметров линии и уменьшить ее длину в два раза.
- Запустить симуляцию модели и по ее окончании измерить токи вторичной обмотки первого трансформатора и нагрузки. Полученные значения занести в таблицу.
- Открыть окно параметров линии, сначала восстановить прежнее значение длины, а затем увеличить его в два раза. Запустить симуляцию модели и измерить значения токов. Занести полученные значения в таблицу.
- Повторить подобные исследования, увеличивая длину линии в три, четыре и пять раз.
- Запустить симуляцию модели при расчетных значениях параметров второго трансформатора. Измерить значения токов

короткого замыкания и занести в таблицу зависимости токов от сопротивления короткого замыкания. Значения сопротивлений записывать в относительных единицах. За базисное значение принять рассчитанное ранее сопротивление короткого замыкания.

- Открыть окно параметров второго трансформатора. Увеличить активные сопротивления и индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора в два раза.

- Запустить симуляцию модели и по ее окончании измерить токи вторичной обмотки первого трансформатора и ток нагрузки. Занести полученные значения в таблицу.

- Повторить исследования, увеличивая значения сопротивления в 3, 4, 5 и 6 раз.

- По окончании исследований показать результаты преподавателю.

### **Обработка экспериментальных данных**

Обработка предполагает следующие этапы:

- Проанализировать графики изменения токов и напряжений, полученные с помощью осциллографов при трехфазном коротком замыкании на шинах первичной обмотки второго трансформатора. Обратить внимание на изменение напряжения на выходе первого трансформатора в момент наступления короткого замыкания. Определить силу токов линии и нагрузки после нарушения режима работы. Сравнить полученные значения с результатами предварительных расчетов. Сделать выводы.

- Проанализировать графики изменения токов и напряжений, полученные с помощью осциллографов при трехфазном коротком замыкании на шинах нагрузки. Обратить внимание на изменение напряжений на входе и выходе линии в момент короткого замыкания. Определить силу токов линии и нагрузки после нарушения режима работы. Проанализировать результаты и сделать выводы.

- Построить графики зависимости токов трехфазного короткого замыкания при изменении длины линии и пояснить полученные зависимости.

- Построить графики зависимости токов трехфазного короткого замыкания при изменении параметров второго трансформатора и прокомментировать полученные зависимости.



## **Составление отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- а) титульный лист стандартной формы;
- б) цель работы;
- в) схему и параметры системы передачи электрической энергии;
- г) краткое содержание рабочего задания;
- д) полное содержание предварительного расчета простейшей системы передачи электрической энергии с соответствующими схемами и пояснениями;
- е) пояснение принципа составления модели электрической цепи;
- ж) полное содержание результатов экспериментальной части с графиками и таблицами данных;
- з) анализ результатов предварительного расчета и результатов эксперимента;
- и) выводы, сделанные по результатам выполнения лабораторной работы.

### **Описание модели и рекомендации по выполнению лабораторной работы**

Для анализа работы электрических сетей в режиме трехфазного короткого замыкания предлагается испытать простейшую систему передачи электрической энергии, состоящую из трехфазного источника электрической энергии, повышающего трансформатора, линии электропередачи, понижающего трансформатора и потребителя электрической энергии.

Модель полностью соответствует схеме электропередачи и предусматривает два возможных нарушения режима в форме трехфазного короткого замыкания на входных зажимах второго трансформатора и короткого замыкания на шинах вторичной обмотки того же трансформатора. Измерение токов короткого замыкания осуществляется с помощью соответствующих осциллографов или амперметров с цифровой индикацией. Все измерительные блоки состоят из датчика тока или напряжения, преобразователя мгновенного значения соответствующей величины в действующее значение, осциллографа и цифрового индикатора. В зависимости от цели анализа, осциллограф может быть подключен к выходу датчика тока или напряжения для наблюдения изменения мгновенного значения

тока, или к выходу преобразователя синусоидальной величины в действующее значение.

Трехфазное короткое замыкание осуществляется с помощью трехфазного выключателя, который подключен в месте ожидаемого короткого замыкания. В окне параметров выключателя необходимо задать переходное сопротивление замкнутых контактов. Это сопротивление должно иметь минимальное значение. Если при моделировании имеются проблемы в форме малого быстродействия, то сопротивление может быть увеличено в разумных пределах.

Расчет токов короткого замыкания производится по обычной методике путем исключения магнитных связей в системе. Рекомендуется привести цепь к линии электропередачи. Реальные значения токов короткого замыкания источника электрической энергии и вторичной обмотки второго трансформатора следует вычислить, используя коэффициент трансформации трансформаторов.

При анализе осциллограмм токов следует обратить внимание на изменение тока непосредственно после момента короткого замыкания. По изменению мгновенного значения тока можно определить его свободную составляющую и постоянную времени переходного процесса. Рекомендуется это использовать при анализе переходного процесса в простейшей системе при трехфазном коротком замыкании.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как определяется полный ток короткого замыкания в простейшей цепи для любого момента времени?
2. Что называется фазой включения?
3. Аперриодическая составляющая тока к.з. Ее начальное значение.
4. От чего зависит и как определяется постоянная времени затухания аперриодической составляющей тока к.з.  $T_a$ ?
5. Что называется ударным током к.з. и какие упрощающие условия принимают при его определении?
6. Что показывает ударный коэффициент и каковы пределы его изменения?
7. Как определяется наибольшее действующее значение тока к.з.?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ

**Цель работы:** определение степени влияния параметров трансформатора на характер электромагнитных переходных процессов путем моделирования в среде MatLAB.

#### Рабочее задание

#### Подготовка к лабораторной работе

Подготовка заключается в следующем:

– Используя рекомендованные для изучения курсов «Электромагнитные переходные процессы в электрических системах» и «Электромеханика» учебники, материал лекций и вспомогательной литературы, изучить работу трехфазного трансформатора в различных режимах. Рассмотреть схему замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора и увязать назначение каждого элемента схемы с физическими процессами в трансформаторе.

– По заданным в табл. 2.1 номинальным значениям напряжений источника, напряжения нагрузки и ее мощности выбрать тип трансформатора (схема включения трансформатора представлена на рис. 2.1).

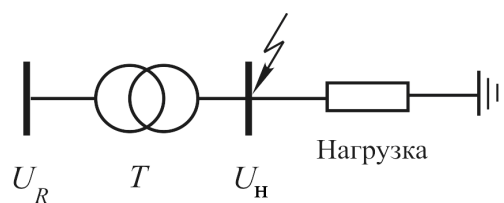


Рис. 2.1 Схема включения трансформатора

– Вычислить токи короткого замыкания входной и выходной обмоток трансформатора при трехфазном коротком замыкании на шинах вторичной обмотки трансформатора.

– Вычислить сопротивление нагрузки, при которой обеспечивается номинальная мощность трансформатора.

– На основании паспортных данных элементов системы и предыдущих вычислений рассчитать параметры элементов для использования при моделировании.

Таблица 2.1

Номер варианта	$U_n$ , кВ	$U_{ch}$ , кВ	$P$ , МВт	$\cos \varphi$
1	500	38,5	200	0,6
2	330	38,5	125	0,65
3	220	10	32	0,7
4	115	6,6	16	0,75
5	115	11	16	0,8
6	500	6,6	125	0,85
7	330	15,75	200	0,9
8	230	6,6	200	0,95
9	115	6,6	16	0,62
10	115	38,5	25	0,67
11	500	10,5	250	0,72
12	330	6,6	200	0,77
13	230	6,6	200	0,82
14	115	6,6	40	0,87
15	115	11	40	0,92
16	500	11	125	0,97
17	330	6,6	200	0,6
18	230	8,5	200	0,65
19	115	11	63	0,7
20	115	6,6	63	0,75
21	500	10	125	0,8
22	330	15,75	200	0,85
23	220	11	40	0,9
24	115	11	80	0,95
25	115	15,75	200	0,62
26	500	38,5	250	0,67
27	330	11	200	0,72
28	220	11	60	0,77
29	115	10,5	10	0,82
30	115	6,6	10	0,87
31	500	11	250	0,92
32	330	38,5	125	0,97
33	220	6,6	63	0,6
34	115	6,6	6,3	0,65
35	115	11	6,3	0,7

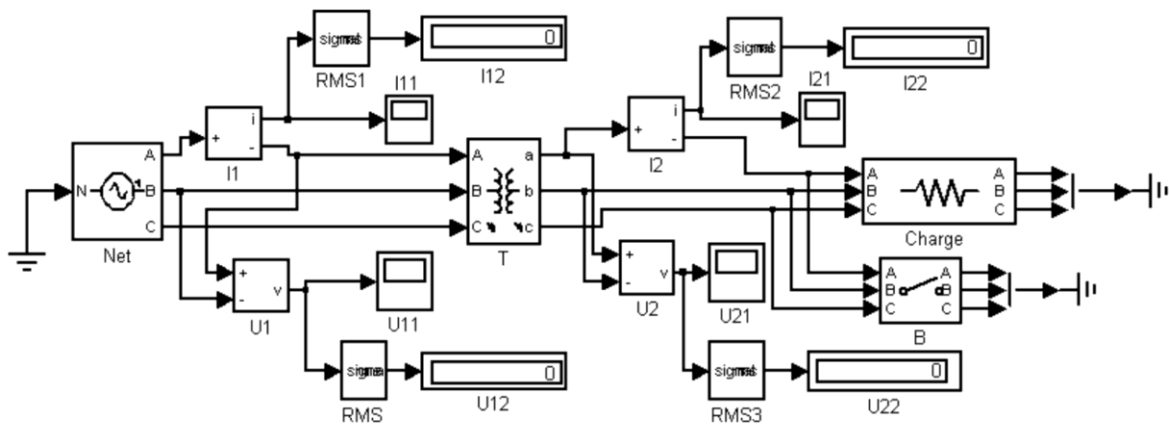


Рис. 2.2 Модель цепи подключения трансформатора с нагрузкой к сети

Методика вычисления параметров представлена в учебниках и в методическом пособии «Справочник элементов энергосистем среды MatLAB». На рис. 2.2 представлена модель цепи подключения трансформатора с нагрузкой к сети. Для измерения тока первичной обмотки трансформатора используется датчик тока с осциллографом. Для измерения напряжений и токов вторичной обмотки используется измерительный блок с первым осциллографом. Трехфазное короткое замыкание имитируется трехфазным короткозамыкателем.

### Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования заключаются в следующем:

1. Подготовить модель для исследований.
  - Открыть файл модели для исследования переходных процессов в трансформаторе LR2.
  - Последовательно открывая окна параметров элементов модели, ввести цифровые данные, полученные в результате предварительного расчета.
  - При заполнении параметров выключателя установить его начальное положение «открыто». Время срабатывания выключателя установить равным 0,1 с.
  - Сопротивление замкнутых контактов короткозамыкателя установить равным 0,1 Ома.
2. Исследовать работу трансформатора в нормальном режиме.
  - Установить время симуляции модели равной 1 с.
  - Установить момент срабатывания короткозамыкателя В равным 2 с.
  - Запустить моделирование и дождаться его окончания.

- С помощью осциллографов проконтролировать законы изменения мгновенных значений токов и напряжений во времени.

- Записать значения токов и напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора, работающего в нормальном режиме.

- Запомнить полученные с помощью осциллографов кривые для дальнейшего анализа и составления отчета.

3. Определить влияние сопротивления обмоток трансформатора на характер переходного процесса в трансформаторе:

- открыв окно параметров короткозамыкателя В, установить момент его срабатывания равным 0,1 с;

- уменьшить активное сопротивление первичной и вторичной обмоток в два раза;

- запустив моделирование, измерить установившееся значение токов короткого замыкания первичной и вторичной обмоток;

- используя осциллограммы токов, определить длительность переходного процесса в трансформаторе. Запомнить осциллограммы токов и напряжений в файлах;

- увеличивая активное сопротивление первичной и вторичной обмотки в 2, 3, ... , 6 раз, составить зависимость установившихся токов короткого замыкания первичной и вторичной обмоток трансформатора от активного сопротивления обмоток трансформатора.

4. Исследовать влияние индуктивностей рассеивания трансформаторов на характер переходного процесса в трансформаторе:

- восстановить исходное значение активного сопротивления обмоток трансформатора. Уменьшить индуктивность обмоток трансформатора в два раза. С помощью модели определить ток короткого замыкания и длительность переходного процесса. Полученные значения занести в таблицу зависимости тока и длительности переходного процесса от индуктивности катушек;

- восстановить прежнее значение индуктивности и провести необходимые измерения. Увеличивая индуктивность в 2, 3, ..., 6 раз установить зависимость тока короткого замыкания и длительность переходного процесса от индуктивности обмоток трансформатора;

- восстановить исходные параметры трансформатора;

5. Исследовать влияние переходного сопротивления контактов короткозамыкателя на силу тока короткого замыкания:

- открыв окно параметров выключателя В, установить сопротивления замкнутых контактов равными 0,1 Ома;
  - запустить симуляцию модели, и по окончании симуляции определить напряжения и токи короткого замыкания. Записать показания приборов в таблицу;
  - увеличить сопротивление контактов в 2, 4, 8 и т. д. раз, определить его влияние на токи короткого замыкания трансформатора.
6. По окончании исследований показать результаты преподавателю.

### **Обработка экспериментальных данных**

Обработка предполагает следующее:

- проанализировать графики изменения токов и напряжений, полученные с помощью осциллографов при трехфазном коротком замыкании на шинах вторичной обмотки трансформатора. Определить токи обмоток после нарушения режима работы. Сравнить полученные значения с результатами предварительных расчетов. Сделать выводы;
- проанализировать графики изменения токов и напряжений, полученные с помощью осциллографов при трехфазном коротком замыкании на шинах нагрузки. Обратит внимание на изменение напряжения на выходе трансформатора в момент короткого замыкания. Сделать выводы;
- построить графики зависимости токов трехфазного короткого замыкания и длительности переходного процесса при изменении активного сопротивления обмоток и пояснить полученные зависимости;
- построить графики зависимости токов короткого замыкания и длительности переходного процесса от индуктивности обмоток трансформатора. Пояснить поведение графиков;
- построить графики зависимости токов трехфазного короткого замыкания от сопротивления дуги и прокомментировать полученные зависимости.

### **Составление отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- а) титульный лист стандартной формы;
- б) цель работы;
- в) схему и параметры системы передачи электрической энергии;

- г) краткое содержание рабочего задания;
- д) полное содержание предварительного расчета параметров исследуемой электрической цепи с соответствующими схемами и пояснениями;
- е) пояснение принципа составления модели электрической цепи;
- ж) полное содержание результатов экспериментальной части с графиками и таблицами данных;
- з) анализ результатов предварительного расчета и результатов эксперимента;
- и) выводы, сделанные по результатам выполнения лабораторной работы.

### **Описание модели и рекомендации по выполнению лабораторной работы**

Модель для исследования переходных процессов в трансформаторе составлена на основании предположения, что он подключен к сети бесконечно большой мощности. Для контроля изменения токов и напряжений на входе и выходе трансформатора включены измерители токов и напряжений с подключенными осциллографами и преобразователями мгновенных значений синусоидальных величин в действующие значения. Цифровые индикаторы, подключенные к этим блокам, позволяют измерять установившиеся значения токов и напряжений.

При нарушениях нормального режима работы в форме короткого замыкания сила токов в значительной степени зависит от эквивалентного сопротивления дуги. Имитация сопротивления дуги производится в лабораторной работе изменением переходного сопротивления контактов выключателя. Изменяя переходное сопротивление контактов выключателя, можно установить зависимость токов короткого замыкания от этого сопротивления.

В соответствии с теорией переходных процессов токи короткого замыкания первичной и вторичной обмоток можно рассматривать в виде суммы свободной и принужденной составляющих. Принужденную составляющую называют еще установившимся значением тока. Действующее значение установившегося тока определяется с помощью измерительных приборов. Свободная составляющая токов изменяется во времени по закону затухающей экспоненты. Именно эта составляющая определяет длительность переходного процесса.



Постоянная времени затухания экспоненты зависит от параметров исследуемой цепи и, в частности, от индуктивностей рассеивания трансформатора и от сопротивления обмоточных проводов. Чем больше индуктивность обмоток трансформатора, тем медленнее затухает свободная составляющая. С другой стороны, чем больше сопротивление провода обмоток или сопротивление дуги, тем быстрее затухает переходной процесс.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Основные допущения, применяемые при расчетах токов к.з.
2. Основные последствия к.з. и необходимость проведения расчетов токов к.з.
3. Понятие «математической модели» электрической системы.
4. Основные методы расчета и анализа к.з.
5. Порядок расчета тока к.з.
6. Схемы замещения основных элементов ЭС: генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и т.д., используемые при расчетах к.з.
7. Приведение параметров элементов схем замещения к одной ступени напряжения: «точное» и «приближенное».

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЕГО ШИНАХ

**Цель работы:** определение степени влияния параметров генератора на характер электромагнитных переходных процессов при трехфазном коротком замыкании на его шинах путем моделирования в среде MatLAB.

#### Рабочее задание

#### Подготовка к лабораторной работе

Подготовка к работе предполагает:

– Используя рекомендованные для изучения курсов «Электромагнитные переходные процессы в электрических системах» и «Электромеханика» учебники, материал лекций и вспомогательной литературы, изучить работу синхронного генератора.

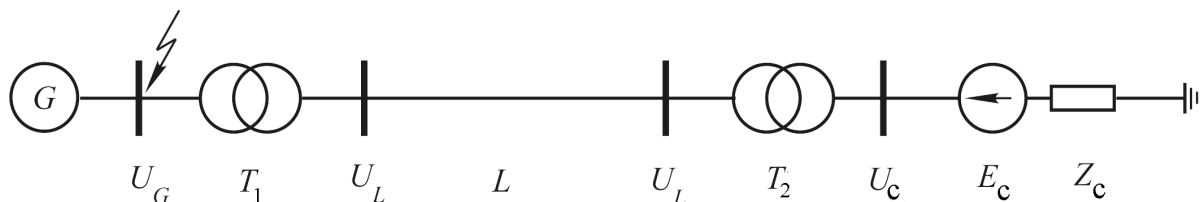


Рис. 3.1 Схема электрической системы

– Для представленной на рис. 3.1 системы по заданным в табл. 3.1 номинальным значениям напряжений источника, напряжения линии и сети, передаваемой мощности выбрать тип генератора.

– По заданным в таблице значениям выбрать типы трансформаторов и линии для обеспечения передачи электрической энергии заданной мощности в сеть. Для моделирования сети использовать блок реального трехфазного источника. Внутреннее сопротивление источника большой мощности принять активным. Абсолютное значение внутреннего сопротивления источника вычислить из условия уменьшения напряжения сети при увеличении

отдаваемой указанной в таблице вариантов мощности на 0,5 % от номинального значения. Внутреннее сопротивление сети можно вычислить по формуле

$$R_c = 0.005 U_H^2 / S_H.$$

Таблица 3.1

Номер варианта	$U_G$ , кВ	$U_L$ , кВ	$U_C$ , кВ	$P$ , МВт	$\cos \varphi$	$l$ , км
1	15,75	500	121	200	0,6	200
2	10,5	330	242	125	0,65	250
3	6,3	220	121	32	0,7	170
4	11	115	230	16	0,75	130
5	6,6	115	330	16	0,8	220
6	10,5	500	230	125	0,85	250
7	11	330	330	200	0,9	100
8	11	220	121	200	0,95	150
9	11	115	115	12	0,62	100
10	10,5	115	121	25	0,67	200
11	6,3	500	230	125	0,72	250
12	15	330	330	200	0,77	100
13	8,5	121	500	200	0,82	150
14	11	115	330	40	0,87	200
15	10,5	115	121	40	0,92	150
16	10,5	500	115	125	0,97	200
17	11	330	115	200	0,6	250
18	10,5	220	230	200	0,65	200
19	10,5	115	330	63	0,7	140
20	11	115	115	63	0,75	250
21	11	500	121	125	0,8	100
22	15,75	330	115	200	0,85	150
23	10,5	220	121	40	0,9	160
24	10,5	115	330	80	0,95	150
25	13,5	115	230	15	0,62	200
26	10,5	500	121	250	0,67	150
27	15,75	330	242	200	0,72	220
28	6,6	220	121	40	0,77	200
29	11	115	121	10	0,82	250
30	11	115	230	10	0,87	150
31	11	500	121	250	0,92	170

32	11	330	242	125	0,97	130
33	11	220	121	40	0,6	170
34	10,5	115	230	6,6	0,65	180
35	6,6	115	230	6,3	0,9	160

– Вычислить установившееся значение тока статора при коротком замыкании на шинах генератора.

– На основании паспортных данных элементов системы и предыдущих вычислений рассчитать параметры элементов для использования при моделировании. Следует обратить внимание на то, что в модели используются параметры элементов в абсолютных и относительных единицах. Методика вычислений параметров представлена в учебниках и в методическом пособии «Справочник элементов энергосистем среды MatLAB».

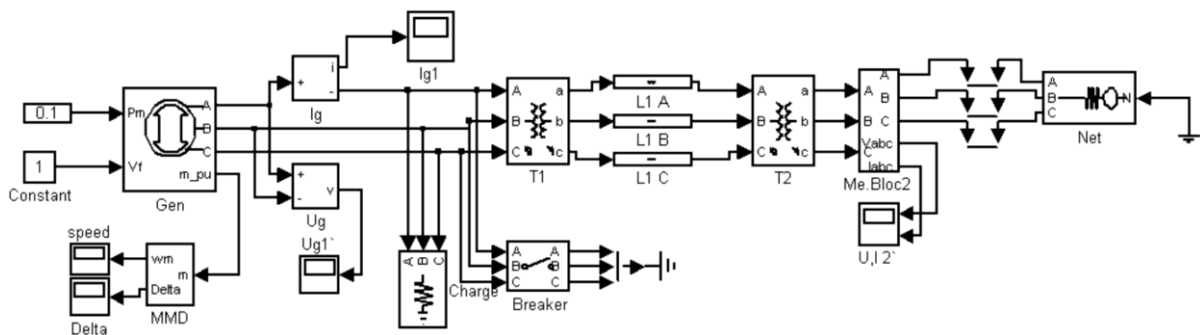


Рис. 3.2 Модель цепи подключения генератора к мощной сети

На рис. 3.2 представлена модель цепи подключения генератора к мощной сети. Измерение частоты вращения генератора и пространственного угла сдвига оси полюсов индуктора относительно оси магнитного поля машины, работающей в режиме холостого хода осуществляется блоком измерения параметров электрических машин с осциллографом. Для измерения напряжений и токов на выходе генератора используется измерительный блок трехфазной сети. Трехфазное короткое замыкание имитируется трехфазным короткозамыкателем.

## Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования заключаются в следующем:

- Открыть файл модели для исследования переходных процессов в трехфазном генераторе.
- Последовательно открывая окна параметров элементов модели, ввести параметры, полученные в результате предварительного расчета.
- При заполнении параметров выключателя установить его начальное положение «открыто». Моменты срабатывания короткозамыкателя установить равными 5 и 5,5 с.
- Установить внутреннее сопротивление сети в соответствии с результатами расчета.
- Запустить моделирование и дождаться его окончания.
- С помощью осциллографов проконтролировать законы изменения мгновенных значений токов и напряжений генератора во времени.
- Сохранить полученные с помощью осциллографов кривые для дальнейшего анализа и составления отчета.
- Уменьшить активное и реактивное сопротивления статорной обмотки в два раза. Запустив моделирование, зарегистрировать с помощью осциллографа изменение тока статора в момент короткого замыкания.
- Увеличивая активное сопротивление и реактивные сопротивления статорной обмотки в 2, 3, ..., 6 раз, составить зависимость тока максимального значения короткого замыкания от относительного изменения сопротивлений обмоток статора генератора.
- Восстановить исходные значения сопротивлений обмоток генератора. Постоянную инерции генератора установить равной 1 с.
- Запустить моделирование и запомнить осциллограмму тока статорной обмотки. Запомнить осциллограмму изменения частоты вращения и угла  $\delta$  во времени. Объяснить изменение тока обмотки статора, частоты вращения и угла  $\delta$  во времени.
- Изменяя длительность нарушения режима с 0,2 с до 1,5 с, проанализировать изменение скорости вращения ротора во времени. Зафиксировать длительность воздействия, при которой наблюдается нарушение устойчивости генератора. Нарушение устойчивости можно зафиксировать по отклонению относительной скорости вращения ротора от единичного значения. Для отчета сохранить осциллограмму тока, скорости вращения и угла  $\delta$  для двух значений длительности: длительности воздействия без нарушения устойчивого режима и длительности воздействия с нарушением устойчивости генератора.

– Восстановить исходные параметры модели. Установить длительность нарушения режима, при котором нарушалась устойчивость генератора. Установить постоянную времени механической инерции генератора равной 1 с.

– Запустить симуляцию модели при расчетных значениях параметров генератора, длительности нарушения режима и механической постоянной времени (момента инерции вращающейся части генератора), равной 1 с. Проанализировать изменение тока, скорости вращения и угла  $\delta$  во времени. Обосновать поведение осциллограмм.

– Увеличивая механическую постоянную времени, добиться устойчивого режима работы генератора. Запомнить осциллограммы тока, скорости и угла  $\delta$  для значений механической постоянной времени, при которых наблюдается нарушение устойчивости генератора и отсутствие нарушения устойчивости.

– Для одного из режимов работы зафиксировать осциллограмму напряжения и тока сети.

– По окончании исследований показать результаты преподавателю.

### **Обработка экспериментальных данных**

Обработка данных заключается в следующем:

– Проанализировать графики изменения токов и напряжений, полученные с помощью осциллографов при трехфазном коротком замыкании на шинах генератора. Определить токи статорной обмотки после нарушения режима работы. Сравнить полученные значения с результатами предварительных расчетов. Не следует забывать о том, что мгновенное значение тока статора при нарушении нормального режима работы содержит свободную составляющую. Сделать выводы.

– Проанализировать график изменения напряжения на шинах генератора при трехфазном коротком замыкании. Сделать выводы.

– Построить графики зависимости токов трехфазного короткого замыкания от относительного значения сопротивления. Пояснить поведение графика и сделать выводы.

– Прокомментировать нарушение режима работы генератора при изменении длительности короткого замыкания. Увязать это явление с требованиями к параметрам элементов релейной защиты электроэнергетических систем.

– На основании проведенных экспериментов определить влияние механической постоянной времени ротора на устойчивость работы генератора. Сделать выводы.

### **Составление отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- а) титульный лист стандартной формы;
- б) цель работы;
- в) схему и параметры системы передачи электрической энергии;
- г) краткое содержание рабочего задания;
- д) полное содержание предварительного расчета параметров исследуемой электрической цепи с соответствующими схемами и пояснениями;
- е) пояснение принципа составления модели электрической цепи;
- ж) полное содержание результатов экспериментальной части с графиками и таблицами данных;
- з) анализ результатов предварительного расчета и результатов эксперимента;
- и) выводы, сделанные по результатам выполнения лабораторной работы.

### **Описание модели и рекомендации по выполнению лабораторной работы**

Для исследования переходных процессов в генераторе, энергия которого передается через простейшую систему в магистральную линию, составлена модель, состоящая из генератора, трансформатора, линии электропередачи, второго трансформатора и сети. Для обеспечения нормальной работы модели к шинам генератора подключена небольшая нагрузка Charge, которая не оказывает влияния на работу всей системы передачи электрической энергии. На вход блока, моделирующего генератор, подается механическая энергия с мощностью, равной 0,1 номинальной мощности генератора. На вход блока подано напряжение возбуждения в относительных единицах, равное номинальному напряжению.

Измерительный выход блока генератора используется для определения изменения скорости вращения ротора и угла  $\delta$  во

времени. Для контроля этих величин к измерительному блоку электрических машин подключены осциллографы.

Для измерения тока и напряжения на выходе генератора включены датчик тока и датчик напряжения с осциллографами. Короткозамыкатель В имитирует нарушение нормального режима работы системы передачи электрической энергии от генератора в сеть, которая представлена в форме источника трехфазного напряжения с внутренним сопротивлением, не равным нулю. Система передачи энергии состоит из повышающего трансформатора, линии электропередачи, второго трансформатора и сети. Для контроля напряжения и тока системы на выходе второго трансформатора включен трехфазный блок измерения, на измерительные выходы которого подключены осциллографы для контроля напряжений и токов.

В лабораторной работе рассматривается влияние на силу тока короткого замыкания параметров синхронного генератора. Следует отметить то, что при коротком замыкании на шинах генератора ток статорной обмотки может рассматриваться в виде двух составляющих. Свободная составляющая тока короткого замыкания изменяется по экспоненциальному закону во времени. Принужденная составляющая в нашем случае изменяется по синусоидальному закону во времени. Для определения принужденной составляющей необходимо обеспечить установившийся режим переходного процесса генератора, работающего на систему. Это невозможно выполнить по той причине, что генератор, работающий в режиме короткого замыкания, выходит из синхронизма с сетью. Поэтому о влиянии параметров генератора на ток короткого замыкания следует судить по максимальному мгновенному значению тока обмотки статора сразу после момента короткого замыкания.

Момент нарушения режима работы устанавливается моментом срабатывания короткозамыкателя В. В реальных условиях нарушение режима наблюдается тогда, когда генератор работает в установившемся режиме. При моделировании системы, как и в реальных условиях, после запуска симуляции наблюдается переходной электромеханический процесс, связанный с механической инерционностью ротора. Качания ротора генератора можно наблюдать по осциллограмме угла  $\delta$  во времени и по осциллограмме изменения скорости ротора генератора. Длительность электромеханического переходного процесса зависит от момента



инерции ротора. При необходимости уменьшения длительности переходного процесса величину момента инерции можно уменьшить. Длительность нарушения режима не должна привести к нарушению стабильности системы. По умолчанию установлен момент короткого замыкания равным 5 с, а длительность нарушения режима равна 0,5 с.

Представляет особый интерес изменение тока сети при коротком замыкании на зажимах генератора. Резкое изменение тока сети говорит о том, что при коротком замыкании на шинах генератора ток сети резко возрастает и через контакты короткозамыкателя (а в реальных условиях через электрическую дугу) протекает не только ток генератора, но и ток сети. Сеть в этом случае работает тоже в режиме короткого замыкания.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как изменяется ток к.з. в сложных ЭС, имеющих источники различной мощности?
2. Какими схемами замещения представляются «машинные» элементы ЭС в начальный момент к.з.?
3. Расчет начального значения периодической составляющей тока к.з.
4. Основные случаи определения ударного тока к.з.
5. Расчетные кривые. Порядок их использования для расчета изменения во времени периодической составляющей тока к.з.
6. Особенности расчета к.з. и замыканий в распределительных сетях и системах электроснабжения.
7. Влияние параметров режима на параметры элементов ЭС.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЕ, ВЫЗВАННЫХ ПРЯМЫМ ПУСКОМ МОЩНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** определение влияния параметров асинхронного двигателя на характер электромагнитных переходных процессов в простейшей системе при прямом пуске мощного асинхронного двигателя.

#### Рабочее задание

##### Подготовка к лабораторной работе

Подготовка к работе заключается в следующем:

– Используя рекомендованные для изучения курсов «Электромагнитные переходные процессы в электрических системах» и «Электромеханика» учебники, материал лекций и вспомогательной литературы изучить особенности прямого пуска асинхронного двигателя. Изучить схему замещения асинхронного двигателя и увязать назначение каждого элемента схемы с физическими процессами в двигателе.

– Для системы, представленной на рис. 4.1, по заданным в табл. 4.1 номинальным значениям напряжений мощности выбрать тип асинхронного двигателя. Характер нагрузки потребителя, включенного параллельно двигателю считать активным. Мощность потребителя принять равной половине мощности двигателя. Вычислить сопротивление нагрузки по известной мощности и номинальному напряжению.

– Линию электропередачи заменить сосредоточенными сопротивлениями. Для этого определить резистивное сопротивление и индуктивность, используя первичные параметры и длину выбранного типа линии.

– По заданным в таблице значениям выбрать типы трансформаторов. Мощность трансформатора  $T_1$  должна быть больше мощности трансформатора  $T_2$ .

– В качестве источника использован генератор большой мощности, поэтому для его моделирования использовать блок идеального источника трехфазного напряжения.

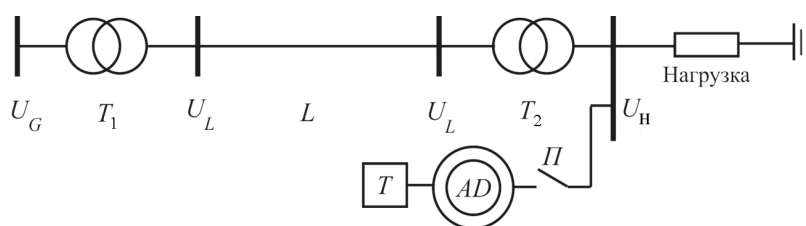


Рис. 4.1 Схема электрической системы

Таблица 4.1

Номер варианта	$U_G$ , кВ	$U_L$ , кВ	$U_H$ , кВ	$P$ , МВт	$\cos \varphi$	$l$ , км	$P_{ад}$ , МВт
1	6,6	500	6	40	0,6	200	0,5
2	10,5	230	6	12	0,65	250	0,6
3	6,3	220	6	32	0,7	170	0,7
4	11	110	6	16	0,75	130	0,8
5	6,6	115	6	16	0,8	220	0,9
6	10,5	500	6	12	0,85	250	1
7	6,3	230	6	10	0,9	100	0,3
8	11	220	6	10	0,95	150	0,6
9	11	121	6	16	0,62	100	1
10	10,5	115	6	25	0,67	200	0,5
11	6,3	110	6	25	0,72	250	0,6
12	15	220	6	20	0,77	100	0,7
13	8,5	220	6	20	0,82	150	0,8
14	11	115	6	40	0,87	200	0,9
15	6,6	115	6	40	0,92	150	1,2
16	8,5	500	6	12	0,97	200	0,3
17	11	230	6	20	0,6	250	2
18	10,5	220	6	20	0,65	200	1,2
19	6,6	115	6	63	0,7	140	0,5
20	11	115	6	63	0,75	250	0,6
21	11	500	6	12	0,8	100	0,7
22	10,5	230	6	20	0,85	150	0,8
23	6,6	220	6	40	0,9	160	0,9
24	6,6	115	6	30	0,95	150	1,4
25	11,5	115	6	15	0,62	200	1,2

26	10,5	500	6	50	0,67	150	0,3
27	6,3	230	6	20	0,72	220	1
28	6,6	220	6	40	0,77	200	0,5
29	6,6	115	6	10	0,82	250	0,6
30	11	115	6	10	0,87	150	0,7
31	6,3	220	6	25	0,92	170	0,8
32	10	115	6	12	0,97	130	0,9
33	11	220	6	40	0,6	170	0,5
34	10,5	115	6	6,6	0,65	180	0,2
35	6,6	115	6	6,3	0,7	230	0,4

– На основании паспортных данных элементов системы рассчитать параметры элементов для использования при моделировании. Методика вычисления параметров представлена в учебниках и в методическом пособии «Справочник элементов энергосистем среды MatLAB». На рис. 4.2 представлена модель электрической цепи подключения мощного асинхронного двигателя к сети. Пуск двигателя осуществляется с помощью трехфазного выключателя.

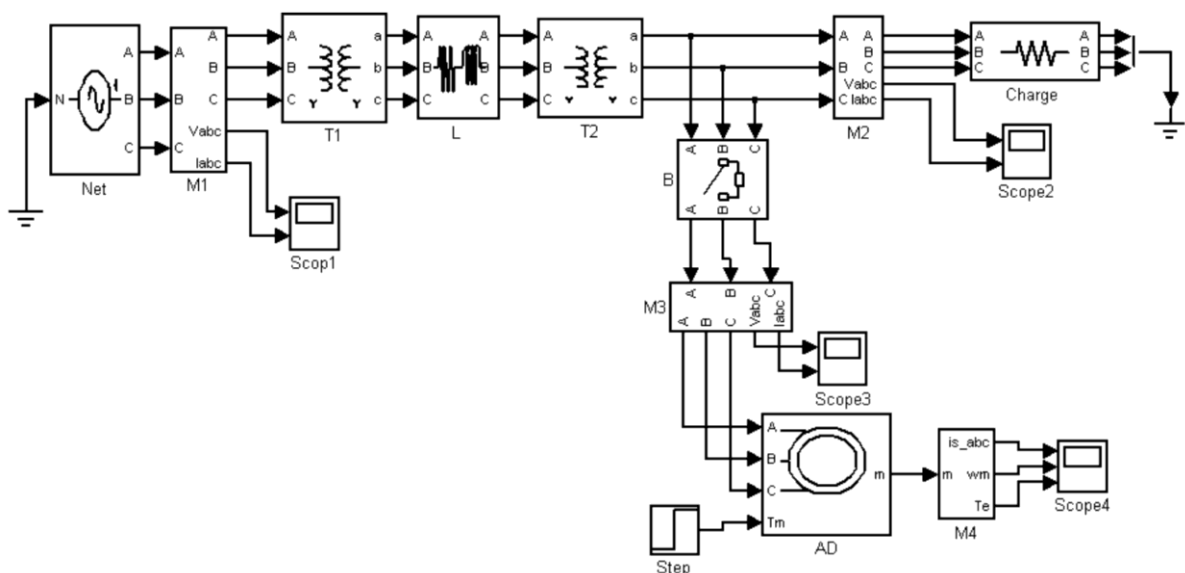


Рис. 4.2 Модель электрической цепи подключения мощного асинхронного двигателя к сети

– Механический момент нагрузки асинхронного двигателя  $T_{ch}$  равен половине номинального момента. Время появления механического момента нагрузки двигателя должно совпадать с моментом пуска двигателя.

### **Экспериментальные исследования**

Экспериментальные исследования предполагают следующие действия:

– Открыть файл модели для исследования переходных процессов в системе при прямом пуске мощного асинхронного двигателя.

– Последовательно открывая окна параметров элементов модели, ввести цифровые значения, полученные в результате предварительного расчета.

– При заполнении параметров выключателя установить его начальное положение «open». Моменты срабатывания короткозамыкателя и блока  $T_{ch}$  установить равными 0,2 с.

– Установить сопротивление линии и нагрузки в соответствии с результатами расчета.

– Установить коэффициент механической инерционности двигателя равным 0,5 с.

– Запустить симуляцию модели и дождаться ее окончания. Открыть осциллограф контроля параметров на выходе измерителя М4. По кривой изменения электромагнитного момента проверить правильность расчета электрических параметров статора и ротора двигателя. Максимальное значение электромагнитного момента должно быть равным 2...3 относительным единицам. Скорректировать значение максимального момента можно путем изменения сопротивления статорной обмотки или изменением индуктивностей статорной и роторной обмоток. Пусковой момент двигателя должен иметь значение в пределах 0,8...1,2 относительных единиц. Скорректировать значение можно изменением резистивного сопротивления ротора.

– С помощью осциллографов проконтролировать законы изменения мгновенных значений токов и напряжений во всех контрольных точках.

– Проконтролировать осциллограммы измерителя М4.

– Запомнить полученные с помощью осциллографов кривые для дальнейшего анализа и составления отчета.

- Увеличить коэффициент механической инерционности ротора в два раза.
- Запустить симуляцию модели и дождаться ее окончания.
- Запомнить полученные с помощью осциллографов кривые для дальнейшего анализа и составления отчета.
- Результаты экспериментальных исследований предъявить преподавателю для проверки.

### **Обработка экспериментальных данных**

Обработка заключается в следующем:

- Проанализировать графики изменения всех токов и напряжений при прямом пуске асинхронного двигателя и при начальном значении коэффициента механической инерции двигателя. Объяснить изменение напряжений и токов во времени. Обосновать поведение графиков. Сделать выводы.
- Сравнить графики изменений токов и напряжений во всех контрольных точках при различных значениях коэффициента инерции ротора двигателя. Обратит внимание на изменение длительности пуска двигателя. Сделать выводы.
- Проанализировать графики изменения токов статорных обмоток, частоты вращения ротора и электромагнитного момента при исходном значении коэффициента инерции ротора. Сделать выводы.
- Сравнить силы токов обмоток статора в момент подключения двигателя к шинам питания и в установившемся режиме после запуска двигателя. Объяснить неравенство значений.
- Сравнить графики изменения токов статорных обмоток, частоты вращения ротора и электромагнитного момента при исходном и измененном значениях коэффициента инерции ротора двигателя. Обосновать причины различий в поведении графиков. Сделать выводы.

### **Составление отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- а) титульный лист стандартной формы;
- б) цель работы;
- в) схему и параметры системы передачи электрической энергии;
- г) краткое содержание рабочего задания;

- д) полное содержание предварительного расчета параметров исследуемой электрической цепи с соответствующими схемами и пояснениями;
- е) модель и пояснение принципа составления модели электрической цепи;
- ж) полное содержание результатов экспериментальной части с графиками;
- з) анализ результатов предварительного расчета и результатов эксперимента;
- и) выводы, сделанные по результатам выполнения лабораторной работы.

### **Описание модели и рекомендации по выполнению лабораторной работы**

Модель системы питания (см. рис. 4.2) состоит из блока сети бесконечной мощности, представленного источником трехфазной ЭДС с внутренним сопротивлением, равным нулю. К сети подключен трансформатор, имитирующий подстанцию. От трансформатора напряжение подается на линию электропередачи. Для ускорения работы модели линия имитируется трехфазным сопротивлением  $L$ , параметры которого должны быть рассчитаны на основании первичных параметров выбранной линии и ее длины. Линия работает на трансформатор Т2, к вторичной обмотке которого подключена нагрузка Charge. Асинхронный двигатель АД подключается к системе с помощью пускателя В. Механическая нагрузка двигателя осуществляется блоком  $T_{ch}$ . Для контроля токов и напряжений сети, нагрузки и асинхронного двигателя в модели используются измерительные блоки трехфазной сети М1, М2, М3 с подключенными к ним осциллографами Scope1, Scope2, Scope3. Осциллографы позволяют контролировать изменение напряжений и токов в точках контроля.

Для контроля токов статора, скорости вращения ротора и электромагнитного момента, развиваемого двигателем, используется измерительный блок М4. Осциллограф Scope4, подключенный к измерительному блоку, позволяет получать графики изменения величин во времени.

Прямой пуск асинхронного двигателя, мощность которого соизмерима с мощностью сети, всегда приводит к резкому увеличению тока.

Это обусловлено тем, что в момент подключения двигателя к сети скорость ротора равна нулю и асинхронный двигатель эквивалентен трансформатору с короткозамкнутой вторичной обмоткой. Ток статора двигателя велик. При этом напряжение на зажимах асинхронного двигателя уменьшается. Увеличение скорости вращения ротора приводит к некоторому снижению тока, однако его значение остается достаточно большим в течение всего времени пуска двигателя. Изменение механического момента сопротивления на валу двигателя вызывает изменение установившегося тока двигателя и длительности пуска.

Снижение напряжения на нагрузке в процессе пуска двигателя обусловлено увеличением падений напряжений на трансформаторах и линии, вызванных увеличением токов этих элементов при пуске.

Длительность пуска двигателя в значительной степени определяется моментом инерции ротора двигателя. В свою очередь момент инерции определяется геометрическими размерами ротора. Чем меньше диаметр ротора двигателя при одной и той же его массе, тем меньше момент инерции ротора и тем меньше длительность пуска такого двигателя. Изменяя момент инерции ротора, можно убедиться в справедливости этого утверждения.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. На основании паспортных данных расчет параметров элементов системы электропередачи.
2. Методы пуска асинхронной нагрузки на работу с сетью.
3. К чему приведет снижение напряжения на шинах асинхронной нагрузки?
4. Объясните появление резкого броска тока при включении мощного асинхронного двигателя методом прямого пуска в сеть.
5. Чем объясняется длительность пуска асинхронного двигателя?
6. Сравните характеристики пуска асинхронного двигателя при различных постоянных инерции.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА УДАРНЫЙ ТОК ЛИНИИ

**Цель работы:** исследование влияния параметров элементов электрической системы на величину ударного тока линии путем моделирования в среде MatLAB.

#### Рабочее задание

#### Подготовка к лабораторной работе

Подготовка к работе заключается в следующем:

– Используя рекомендованные для курса учебники, материал лекций и вспомогательной литературы, изучить теоретические основы вычисления токов короткого замыкания в системах передачи электрической энергии.

Таблица 5.1

Номер варианта	$U_n$ , кВ	$U_{л}$ , кВ	$U_c$ , кВ	$P$ , МВт	$\cos \varphi$	$L$ , км
1	2	3	4	5	6	7
1	6,6	500	121	200	0,6	200
2	10,5	330	115	125	0,65	250
3	6,3	220	121	32	0,7	170
4	11	110	230	16	0,75	130
5	6,6	115	330	16	0,8	220
6	10,5	500	121	125	0,85	250
7	6,3	330	330	200	0,9	100
8	11	220	121	200	0,95	150
9	11	115	115	16	0,62	100
10	10,5	115	121	25	0,67	200
11	11	500	121	250	0,72	250
12	38,5	242	121	200	0,77	100
13	8,5	220	115	200	0,82	150
14	11	115	330	40	0,87	200
15	6,6	330	121	40	0,92	150
16	8,5	500	121	125	0,97	200

Продолжение табл. 5.1

17	11	330	115	200	0,6	250
18	10,5	121	230	200	0,65	200
19	6,6	115	330	63	0,7	140
20	11	115	115	63	0,75	250
21	11	500	121	125	0,8	100
22	10,5	330	242	200	0,85	150
23	6,6	220	121	40	0,9	160
24	6,6	500	121	80	0,95	150
25	11	121	230	15	0,62	200
26	10,5	500	121	250	0,67	150
27	6,3	121	500	200	0,72	220
28	6,6	220	121	40	0,77	200
29	11	115	220	10	0,82	250
30	11	121	230	10	0,87	150
31	6,3	500	121	250	0,92	170
32	10	330	242	125	0,97	130
33	11	242	330	40	0,6	170
34	10,5	121	500	40	0,65	180
35	6,6	115	330	40	0,97	130

– По заданным в табл. 5.1 номинальным значениям напряжений источника, линии, напряжения нагрузки и ее мощности выбрать типы трансформаторов и линии электропередач простейшей системы, схема которой представлена на рис. 5.1.

Примечание. Схема составлена на основании предположения, что источником электрической энергии для системы является магистральная сеть.

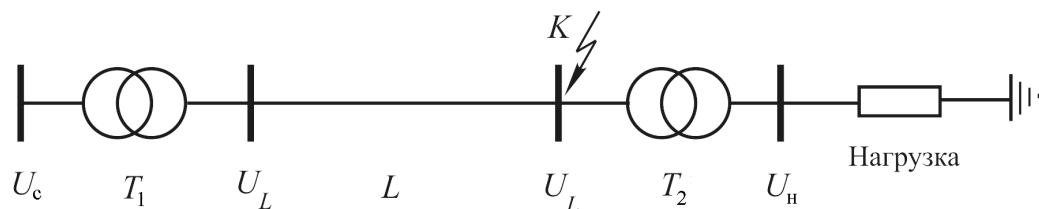


Рис. 5.1 Схема простой электрической системы

– Составить схему замещения простейшей цепи. Рекомендуется привести параметры элементов системы к линии электропередачи.

При составлении схемы замещения не пренебрегать активными сопротивлениями элементов. Сопротивление нагрузки считать активным. Сопротивление нагрузки вычислить по заданной мощности и номинальному напряжению.

– Используя традиционные методы расчета электрических цепей, вычислить ток короткого замыкания линии. Место короткого замыкания показано на схеме.

– Вычислить ударный ток линии, используя результаты предыдущих расчетов.

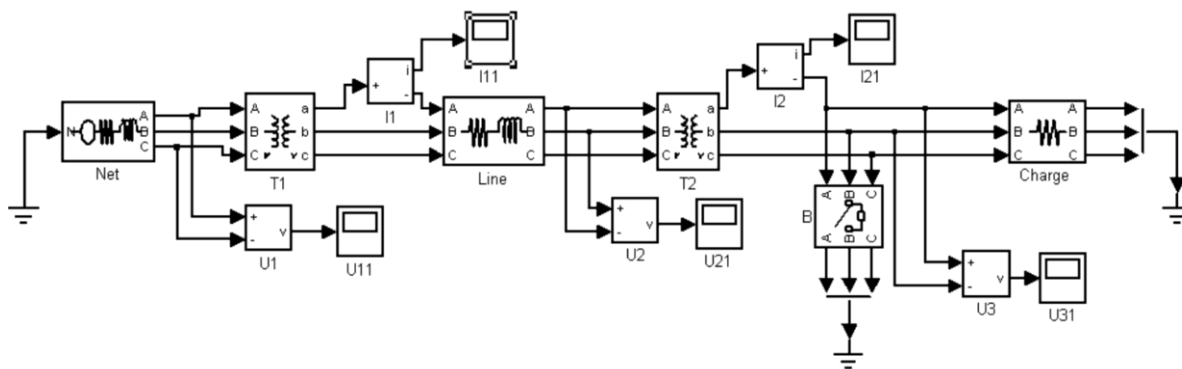


Рис. 5.2 Модель простейшей системы передачи электрической энергии

– На основании паспортных данных элементов системы и предыдущих вычислений рассчитать параметры элементов для использования при моделировании. Следует обратить внимание на то, что в модели используются параметры элементов в абсолютных и относительных единицах. Методика вычислений параметров представлена в учебниках и в методическом пособии «Справочник элементов энергосистем среды MatLAB». На рис. 5.2 представлена модель простейшей системы передачи электрической энергии. Сопротивление нагрузки считать активным.

## Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования предполагают следующие действия:

1. Исследование влияния активного сопротивления элементов системы передачи электрической энергии на характер переходного процесса в системе:

– Открыть файл модели простейшей системы передачи электрической энергии.

– Последовательно открывая окна параметров элементов модели электрической системы, ввести цифровые данные, полученные в результате предварительного расчета. Начальную фазу напряжения  $U_A$  установить равной  $60^\circ$ .

– При заполнении параметров выключателя установить его начальное положение «открыто». Время срабатывания выключателя установить равным 0,2 с. Длительность симуляции установить равной 3 с.

– Запустить моделирование и дождаться его окончания.

– С помощью осциллографов проконтролировать законы изменения мгновенных значений токов и напряжений во времени.

– Сохранить полученные с помощью осциллографов кривые для дальнейшего анализа и составления отчета. Отдельным файлом запомнить осциллограмму изменения тока линии.

– По осциллограмме тока линии определить длительность переходного процесса в системе.

– Открывая окна параметров элементов системы, уменьшить активные сопротивления линии и трансформатора в два раза. Запустить симуляцию модели и по осциллограмме тока линии определить длительность переходного процесса.

– Повторить эксперимент для различных значений сопротивлений системы. Составить зависимость длительности переходного процесса от сопротивления.

– Запомнить график изменения тока линии во времени при минимальных значениях сопротивлений.

2. Определение ударного тока линии при коротком замыкании в системе:

– Восстановить исходные значения сопротивлений. Проверить момент срабатывания выключателя. Он должен быть равным 0,2 с.

– Запустить симуляцию модели и по осциллограмме тока линии определить максимальное значение тока линии, которое имеет место непосредственно после момента нарушения режима. Занести полученное значение в таблицу.

– Установить время срабатывания короткозамыкателя равным 0,201 с.

– Запустить симуляцию модели и дождаться ее окончания. С помощью осциллографа проследить изменение тока линии. Измерить максимальное значение тока. Занести полученное значение в таблицу.

– Увеличивая момент срабатывания короткозамыкателя через тысячную долю секунды, получить зависимость максимального значения тока от момента короткого замыкания. В таблице должно быть не менее 10 значений.

– По полученной зависимости определить ударный ток линии, соответствующий заданным параметрам системы.

### **Обработка экспериментальных данных**

Обработка данных заключается в следующем:

– Построить график зависимости длительности переходного процесса от относительных значений сопротивлений линии и трансформатора. Обосновать поведение графиков. Сделать выводы.

– Построить график зависимости максимального значения тока фазы  $A$  от момента наступления короткого замыкания. Определить ударный ток фазы. Сравнить полученное экспериментальным путем значение ударного тока с током, полученным расчетным путем. Оценить несоответствие значений и объяснить причины расхождения.

– Используя осциллограмму тока линии при минимальном сопротивлении, построить график изменения свободной составляющей переходного процесса во времени. По полученному графику определить постоянную времени переходного процесса.

### **Составить отчет**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- а) титульный лист стандартной формы;
- б) цель работы;
- в) схему и параметры системы передачи электрической энергии;
- г) краткое содержание рабочего задания;
- д) полное содержание предварительного расчета простейшей системы передачи электрической энергии с соответствующими схемами и пояснениями;
- е) пояснение принципа составления модели электрической цепи;
- ж) полное содержание результатов экспериментальной части с графиками и таблицами данных;
- з) анализ результатов предварительного расчета и результатов эксперимента;

и) выводы, сделанные по результатам выполнения лабораторной работы.

### **Описание модели и рекомендации по выполнению лабораторной работы**

Для анализа влияния параметров элементов электрических сетей на ударный ток линии предлагается испытать простейшую систему передачи электрической энергии, состоящую из трехфазного источника электрической энергии, повышающего трансформатора, линии электропередачи, понижающего трансформатора и потребителя электрической энергии.

Модель полностью соответствует схеме электропередачи и предусматривает нарушение режима в форме трехфазного короткого замыкания на входных зажимах второго трансформатора. Измерение токов короткого замыкания и напряжений на элементах системы осуществляется с помощью соответствующих осциллографов. Все измерительные блоки состоят из датчика тока или напряжения и осциллографа. Осциллографы подключены к выходу соответствующего датчика тока или напряжения.

Трехфазное короткое замыкание осуществляется с помощью трехфазного выключателя, который подключен в месте ожидаемого короткого замыкания. В окне параметров выключателя необходимо задать переходное сопротивление замкнутых контактов. Это сопротивление должно иметь минимальное значение. Если при моделировании имеются проблемы в форме малого быстродействия, то сопротивление может быть увеличено в разумных пределах.

Расчет токов короткого замыкания производится по обычной методике путем исключения магнитных связей в системе. Рекомендуется привести цепь к линии электропередачи. При этом рекомендуется преобразования вести в именованных единицах.

При анализе осциллограмм токов следует обратить внимание на изменение тока непосредственно после момента короткого замыкания. По изменению мгновенного значения тока можно определить его свободную составляющую и постоянную времени переходного процесса. Рекомендуется это использовать при анализе переходного процесса в простейшей системе при трехфазном коротком замыкании.

Ударным током называют максимально возможное мгновенное значение тока короткого замыкания, которое может быть в данной точке короткого замыкания. Это значение определяется по

амплитуде тока короткого замыкания с учетом мгновенного значения свободной составляющей рассматриваемого тока. Расчетное значение ударного тока вычисляется по формуле

$$I_y = I_m e^{-\frac{0,01}{\tau}},$$

где  $I_y$  – ударный ток короткого замыкания;

$I_m$  – амплитуда принужденного значения тока короткого замыкания;

$\tau$  – постоянная времени переходного процесса приведенной схемы замещения.

С помощью моделирования ударный ток определяется путем изменения момента короткого замыкания через малый отрезок времени. При выполнении лабораторной работы рекомендуется взять этот отрезок равным 0,001 с. За 10...15 шагов один из трех токов фаз достигнет своего максимального значения.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Составление схемы замещения электрической сети, определение параметров её элементов.
2. Влияние активного сопротивления элементов системы на величину тока короткого замыкания.
3. Влияние длительности переходного процесса на мгновенные значения токов и напряжений.
4. Постройте график зависимости длительности переходного процесса от относительных значений сопротивлений линии и трансформатора.
5. Постройте график зависимости максимального значения тока фазы  $A$  от момента наступления короткого замыкания.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ НАРУШЕНИИ РЕЖИМА РАБОТЫ

**Цель работы:** освоение методики определения токов электроэнергетических систем при несимметричном нарушении режима расчетным путем и путем моделирования системы в среде MatLAB.

#### Рабочее задание

##### Подготовка к лабораторной работе

Подготовка к работе заключается в следующем:

– Используя рекомендованные для курса учебники, материал лекций и вспомогательной литературы, изучить теоретические основы вычисления токов систем передачи электрической энергии при несимметричных нарушениях режима.

– По заданным номинальным значениям напряжений источника, линии, напряжения нагрузки и ее мощности выбрать типы трансформаторов и линии электропередач простейшей системы, схема которой представлена на рис. 6.1.

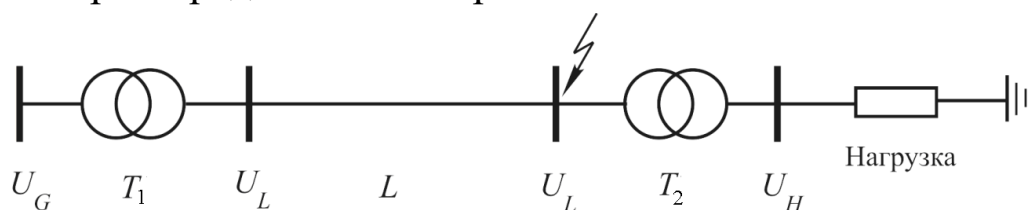


Рис. 6.1 Схема простейшей электрической системы

**Примечание.** Схема составлена с учетом предположения, что источником электрической энергии для системы является генератор бесконечной мощности. При моделировании необходимо представить его сетью с внутренним сопротивлением равным нулю.

– Дальнейший расчет вести с учетом того, что все обмотки трансформатора соединены «звездой» с заземленной нейтралью.



– Рассчитать фазные напряжения и токи фаз в месте нарушения режима. Варианты нарушения симметрии системы приведены в табл. 6.1. Возможны три варианта асимметрии: 1 – короткое замыкание фазы на землю, 2 – межфазное короткое замыкание и 3 – межфазное короткое замыкание на землю.

Таблица 6.1

Номер варианта	$U_{Г}$ , кВ	$U_{Л}$ , кВ	$U_{Н}$ , кВ	$P$ , МВт	$\cos \varphi$	$l$ , км	Тип повреждения
1	6,6	500	38,5	100	0,6	200	1
2	10,5	330	38,5	125	0,65	250	2
3	6,3	220	11	32	0,7	170	3
4	11	115	6,6	16	0,75	130	1
5	6,6	115	10,5	16	0,8	220	2
6	10,5	500	6	120	0,85	250	3
7	6,3	330	15,75	200	0,9	100	1
8	11	230	6,6	200	0,95	150	2
9	11	115	6,6	16	0,62	100	3
10	10,5	115	38,5	25	0,67	200	1
11	6,3	500	10,5	125	0,72	250	2
12	15	330	6,6	200	0,77	100	3
13	8,5	220	6,6	200	0,82	150	1
14	11	115	6,6	40	0,87	200	2
15	6,6	115	11	40	0,92	150	3
16	8,5	500	11	125	0,97	200	1
17	11	330	6,6	200	0,6	250	2
18	10,5	220	8,5	200	0,65	200	3
19	6,6	115	11	63	0,7	140	1
20	11	115	6,6	63	0,75	250	2
21	11	500	10	125	0,8	100	3
22	10,5	330	15	200	0,85	150	1
23	6,6	220	11	40	0,9	160	2
24	6,6	115	11	80	0,95	150	3
25	11	115	6,6	15	0,62	200	1
26	10,5	500	38,5	250	0,67	150	2
27	6,3	330	11	200	0,72	220	3
28	6,6	220	11	40	0,77	200	1
29	6,3	115	10,5	10	0,82	250	2

30	11	115	6,6	10	0,87	150	3
31	6,3	500	38,5	250	0,92	170	1
32	10	330	38,5	125	0,97	130	2
33	11	220	6,6	40	0,6	170	3
34	10,5	115	6,6	63	0,65	180	1
35	6,6	115	11	63	0,7	230	2

– Используя приведенную в учебниках методику, составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Не следует забывать о том, что для составления схемы замещения необходимо разложить напряжение в месте нарушения режима на симметричные составляющие.

– Используя традиционные методы расчета электрических цепей, вычислить токи фаз в месте нарушения режима.

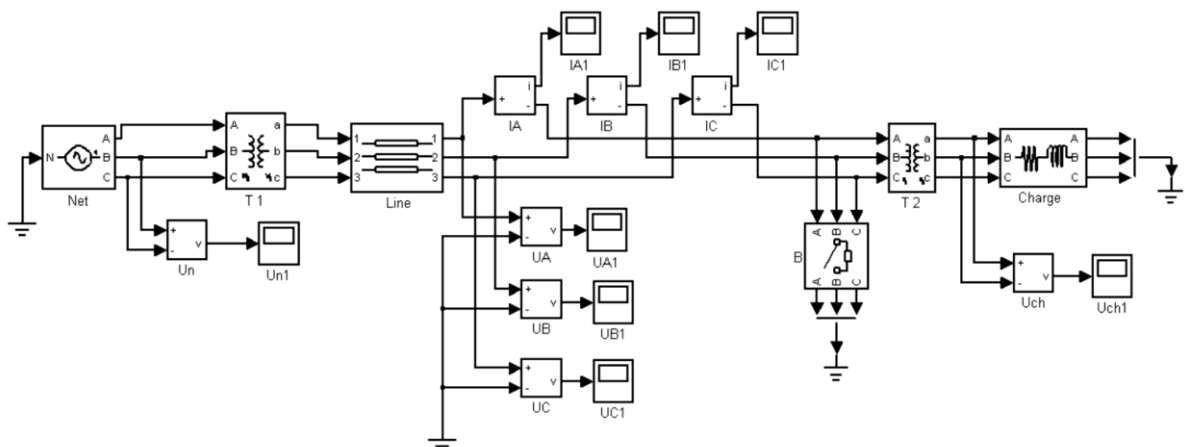


Рис. 6.2 Модель простейшей системы передачи электрической энергии

– На основании паспортных данных элементов системы и предыдущих вычислений рассчитать параметры элементов для использования при моделировании. Следует обратить внимание на то, что в модели используются параметры элементов в абсолютных и относительных единицах. Методика вычислений параметров представлена в учебниках и в методическом пособии «Справочник элементов энергосистем среды MatLAB». На рис. 6.2 представлена модель простейшей системы передачи электрической энергии. Для контроля входного напряжения системы используется датчик напряжения  $U_n$ . Для контроля напряжения на нагрузке используется датчик напряжения  $U_{ch}$  с осциллографом. Для измерения токов и

напряжений в месте нарушения режима используются датчики фазных токов и напряжений, включенных в конце линии электропередачи на входе трансформатора.

### Экспериментальные исследования

– Открыть файл модели простейшей системы передачи электрической энергии LR6.

– Последовательно открывая окна параметров элементов модели электрической системы, ввести цифровые данные, полученные в результате предварительного расчета.

– При заполнении параметров выключателя установить его начальное положение «открыто». В зависимости от варианта нарушения режима настроить подключение короткозамыкателя с помощью окна параметров выключателя. Время срабатывания выключателя установить равным 0,2 с. Для реализации однофазного короткого замыкания на землю необходимо оставить «галочку» только в фазе *A*. Для реализации двухфазного короткого замыкания на землю «галочки» должны стоять в фазах *C* и *B*. Для реализации двухфазного короткого замыкания «галочки» окна параметров должны стоять в фазах *C* и *B*. Кроме этого, необходимо настроить шину выхода выключателя. Открыв параметры шины, установить количество входов, равное 3. Количество выходов установить равным 0. При этом подключение к земле удалить. Запустив симуляцию модели, убедиться в том, что напряжение на нагрузке равно номинальному значению в интервале времени от 0 до 0,2 с. Если напряжение на шинах нагрузки не соответствует норме, скорректировать напряжение путем изменения напряжения питания источника.

– Запустить моделирование и дождаться его окончания. Следует помнить о том, что осциллографы показывают мгновенные значения токов и напряжений. Действующие значения синусоидальных функций меньше амплитудных значений в 1,41 раза.

– С помощью осциллографов проконтролировать законы изменения мгновенных значений фазных токов и фазных напряжений во времени.

– Запомнить полученные с помощью осциллографов кривые для дальнейшего анализа и составления отчета.

## **Обработка экспериментальных данных**

- Проанализировать графики изменения токов и напряжений, полученные с помощью осциллографов. Обратить внимание на изменение напряжений в месте нарушения режима. Проанализировать изменение токов источника и нагрузки во времени при нарушении симметрии системы. Сделать выводы.
- Сравнить экспериментальные данные с результатами предварительного расчета. Сделать выводы.

### **Составить отчет о выполнении лабораторной работы**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- а) титульный лист стандартной формы;
- б) цель работы;
- в) схему и параметры системы передачи электрической энергии;
- г) краткое содержание рабочего задания. Схемы замещения системы для прямой, обратной и нулевой последовательности;
- д) полное содержание предварительного расчета простейшей системы передачи электрической энергии, работающей в заданном режиме с соответствующими схемами и пояснениями;
- е) пояснение принципа составления модели электрической цепи;
- ж) полное содержание результатов экспериментальной части с графиками и таблицами данных;
- з) анализ результатов предварительного расчета и результатов эксперимента;
- и) выводы, сделанные по результатам выполнения лабораторной работы.

### **Описание модели и рекомендации по выполнению лабораторной работы**

Построение компьютерной модели, которая используется в данной лабораторной работе, практически ничем не отличается от аналогичных моделей других лабораторных работ. Поэтому вычисление параметров элементов модели не составит особого труда. Параметры источников, трансформаторов и нагрузки такие же, как и в других моделях. Отличие данной модели заключается в том, что регистрирующие приборы включены для контроля токов и

напряжений всех фаз в месте нарушения режима. Кроме этого, модель предусматривает контроль линейных напряжений источника и нагрузки.

Методика расчетов несимметричных режимов простейших систем достаточно детально представлена в учебниках.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Метод симметричных составляющих. Соотношения между фазными величинами и симметричными составляющими.
2. Виды несимметричных коротких замыканий. Уравнения граничных условий в точке несимметрии для различных видов к.з.
3. Правило эквивалентности прямой последовательности.
4. Составление схем замещения различных последовательностей для расчета несимметричных к.з.
5. Параметры обратной последовательности синхронных машин.
6. Параметры схемы замещения нулевой последовательности ЛЭП.
7. Схемы замещения нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов.
8. Построение векторных диаграмм токов и напряжений для различных видов к.з.

## Литература

1. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М., Махмудов Т.Ф., Нурматов О.Ё. Переходные процессы. - Ташкент, ТашДТУ, 2021, 214 с.
2. Крючков И.П., Старшинов В.А., Гусов М.А., Пираторов М.В. Переходные процессы в электрических системах / учебник для ВУЗов, М.: Издательский дом, МЭИ, 2008, 416 с.
3. Овчинников В.В. Расчет и анализ устойчивости электрических систем, Учебно - методическое пособие по курсовому проектированию. – Киров, Изд. ВятГУ, 2007, 74 с.
4. Хайдаров С.Д., Шарипов О.В. Конспект лекций по курсу «Переходные процессы – Часть 2». –Т.: ТашГТУ, 2001, 86 с.
5. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб. для вузов / С. А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
6. Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В. А. и др. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 416 с.
7. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 283 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Трансформаторы

Таблица П.1.1

Технические данные автотрансформаторов

Тип автотрансформатора	$S_{\text{ном}}$ , МВА	Пределы регулирования, %	$U_{\text{ном}}$ , кВ обмоток			$u_k$ , % обмоток			$\Delta P_k$ , кВт	$\Delta P_x$ , кВт	$I_x$ , %
			В	С	Н	В-С	В-Н	С-Н			
АТДТНГ-32000/220/110	32	$\pm 6 \times 2$	230	121	6,6;11; 38,5	11	34	21	145	32	0,6
АТДЦТН-200000/220/110	200	$\pm 6 \times 2$	230	121	6,6;11; 38,5	11	32	20	430	125	0,5
АТДЦТН-250000/220/100	250	$\pm 6 \times 2$	230	121	10,5; 38,5	11,5	33,4	20,8	520	145	0,5
АТДЦТН-125000/330/110	125	$\pm 6 \times 2$	330	115	10,5; 38,5	10	35	22	370	115	0,5
АТДЦТН-200000/330/110	200	$\pm 6 \times 2$	330	115	6,6;11; 13,8; 15,75; 38,5	10	35	22	740	190	0,6
АТДЦТН-240000/330/220	240	$\pm 6 \times 2$	330	242	11; 38,5	9,5	74	60	430	130	0,6
АТДЦТН-125000/500/110	125	$\pm 6 \times 2$	500	121	6,6;11; 38,5	10,5	24	13	330	125	0,5
АТДЦТН-250000/500/100	250	$\pm 6 \times 2$	500	121	11/38,5	10,5	24	13	550	250	0,5

Таблица П.1.2

Технические данные трехобмоточных трансформаторов

Тип автотрансформатора	$S_{\text{ном}}$ , МВА	Пределы регулирования, %	$U_{\text{ном}}$ , кВ обмоток			$u_k$ , % обмоток			$\Delta P_k$ , кВт	$\Delta P_x$ , кВт	$I_x$ , %
			В	С	Н	В=С	В=Н	С=Н			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_B = 110$ кВ											
ТМТН-6300/110	6,3	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	60	14	1,20
ТДТН-1000/110	10	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	80	19	1,10
ТДТН-16000/110	16	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	6,6; 11	17 (10,5)	10,5 (17)	6	105	26	1,05
ТДТН-25000/110	25	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	145	36	1,00

Окончание табл. П.1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ТДТН-40000/110	40	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	230	50	0,90
ТДТН-63000/110	63	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	310	70	0,85
ТДТН-80000/110	80	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	390	82	0,85
$U_B = 220$ кВ											
ТДТН-25000/220	25	$\pm 8 \times 1,5$	230	38,5	6,6; 11	12,5	20	6,5	135	50	1,2
ТДТН-40000/220	40	$\pm 8 \times 1,5$	230	38,5	6,6; 11	12,5	22	9,5	220	55	1,1
ТДТН-63000/220	63	$\pm 8 \times 1,5$	230	38,5	6,6; 11	12,5	24	10,5	320	91	1,0

Таблица П.1.3

**Технические данные двухобмоточных трансформаторов**

Тип авто- трансформатора	$S_{ном}$ , МВА	Пределы регулируе- ния, %	$U_{ном}$ , кВ обмоток		$u_k$ , %	$\Delta P_k$ , кВт	$\Delta P_x$ , кВт	$I_x$ , %
			В	Н				
$U_B = 110$ кВ								
ТД-40000/110	40	$\pm 2 \times 2,5$	121	6,3; 10,5	10,5	175	42	0,7
ТД-80000/110	80	$\pm 2 \times 2,5$	121	3,15; 6,3	10,5	315	89	0,6
ТДН-16000/110	16	$\pm 9 \times 1,78$	115	6,3; 11	10,5	85	19	0,7
ТДН-40000/110	40	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	10,5	175	42	0,65
ТДЦН-63000/110	63	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	10,5	245	59	0,6
ТДЦН-80000/110	80	$\pm 9 \times 1,78$	115	38,5	10,5	310	70	0,55
ТДЦ-125000/110	125	$\pm 2 \times 2,5$	121	10,5; 13,8	10,5	400	100	0,5
ТДЦ-200000/110	200	—	121	13,8; 15,75; 18	10,5	550	140	0,5
ТДЦ-250000/110	250	—	121	13,8; 15,75; 18	10,5	640	200	0,5
ТДЦ-400000/110	400	—	121	20	10,5	900	320	0,45
ТРДН-32000/220	32	$\pm 8 \times 1,5$	230	6,6/11	12	167	53	0,9
ТРДН-40000/220	40	$\pm 8 \times 1,5$	230	11/11 6,6/6,6	12	170	50	0,9
ТРДЦН-63000/220	63	$\pm 8 \times 1,5$	230	6,6/6,6 11/11	12	300	82	0,80
ТРДЦН- 1000000/220	100	$\pm 8 \times 1,5$	230	11/11 38,5	12	360	115	0,70
ТДЦ- 200000/220	200	—	242	13,8; 15,75; 18	11	580	200	0,45



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Параметры воздушных линий

Таблица П.2.1

Параметры двухцепных воздушных линий электропередачи

Габариты опоры, м	Марка провода	$r_1$ , Ом/км	$x_1$ , Ом/км	$z_1$ , Ом/км	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$x_{01-2}$ , Ом/км
Двухцепная опора ПБ-110-2, трос С-50 заземлен							
	АС-70	0,460	0,415	0,619	0,687	1,415	0,931
	АС-95	0,330	0,404	0,522	0,557	1,404	0,931
	АС-120	0,270	0,396	0,480	0,497	1,396	0,931
	АС-150	0,210	0,389	0,442	0,437	1,389	0,931
	АС-185	0,170	0,383	0,419	0,397	1,383	0,931
	АС-240	0,132	0,374	0,397	0,359	1,374	0,931
	АСО-240	0,131	0,374	0,397	0,358	1,374	0,931
	АСО-300	0,106	0,369	0,384	0,328	1,371	0,931

Таблица П.2.2

Расчетные параметры прямой последовательности линий 110-750 кВ со сталеалюминиевыми проводами

Марка провода	Число проводов в фазе	$r_1$ , Ом/км	$x_1$ , Ом/км				
			110 кВ $D_{cp} = 5 м$	220 кВ $D_{cp} = 8 м$	330 кВ $D_{cp} = 11 м$	500 кВ $D_{cp} = 14 м$	750 кВ $D_{cp} = 19,5 м$
1	2	3	4	5	6	7	8
АС-50	1	0,630	0,450	—	—	—	—
АС-70	1	0,450	0,440	—	—	—	—
АС-95	1	0,330	0,429	—	—	—	—
АС-120	1	0,270	0,423	—	—	—	—
АС-150	1	0,210	0,416	—	—	—	—
АС-185	1	0,170	0,409	—	—	—	—
АСО-240	1	0,130	0,401	0,430	—	—	—
	2	0,065	—	0,309	0,328	—	—
АСО-300	1	0,108	0,392	0,422	—	—	—
	2	0,054	—	0,306	0,325	—	—
АСО-330	3	0,031	—	—	—	0,299	—
АСО-400	1	0,080	0,382	0,414	—	—	—
	2	0,040	—	0,301	0,321	—	—
	3	0,026	—	—	—	0,298	—
АСУ-400	4	0,020	—	—	—	—	0,280

1	2	3	4	5	6	7	8
АСО-500	1	0,065	–	0,410	0,429	–	–
	2	0,032	–	0,305	0,318	–	–
	3	0,022	–	–	–	0,295	–
	4	0,016	–	–	–	–	0,279
АСО-600	1	0,053	–	0,403	0,423	–	–
	2	0,026	–	–	0,315	0,330	–
	3	0,018	–	–	–	0,293	–
	4	0,013	–	–	–	–	0,278
АСО-700	2	0,022	–	–	–	0,326	–
	3	0,015	–	–	–	0,291	–
	4	0,011	–	–	–	–	0,274

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Параметры асинхронных двигателей

Таблица П.3.1

**Технические данные асинхронных  
электродвигателей 6 кВ серий ДАЗО и ДАЗО2**

Тип	Номинальные данные					Пусковые характеристики			
	$P$ , кВт	$I$ , А	$N$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos \varphi$	$I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$	$M_{\text{вх}} / M_{\text{ном}}$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
14-49- 8/10	250	34	744	89,0	0,79	5,7	0,8	2,8	125
	125	22	596	86,0	0,64	6,6	1,4	4,0	
15-41- 8/10	500	62	743	91,0	0,85	5,6	0,8	2,6	300
	250	35	595	89,0	0,78	5,8	1,0	2,9	
15-49- 8/10	630	78	743	91,0	0,86	5,5	0,8	2,4	350
	320	43	594	90,0	0,80	5,7	0,9	2,7	
15-59- 8/10	800	95	742	92,0	0,88	5,4	0,8	2,5	425
	400	53	594	90,5	0,80	5,9	5,9	1,0	2,9
15-69- 8/10	1000	115	743	92,5	0,9	5,9	0,9	2,6	500
	500	65	595	91,0	0,81	5,9	1,0	2,9	
17-39- 8/10	500	61,5	741	91,0	0,85	5,2	0,65	2,1	288
	250	35,0	594	89,5	0,76	6,1	0,85	2,6	
17-39- 10/12	400	52,0	592	91,0	0,80	4,9	0,65	2,1	288
	230	39,0	496	89,0	0,63	6,2	1,1	3,2	
17-44- 8/10	630	76,5	741	91,5	0,85	5,2	0,65	2,1	313
	320	44,0	594	90,5	0,77	6,1	0,9	2,7	
17-54- 6/8	800	94,5	990	91,3	0,88	5,7	0,7	2,5	388
	400	51,5	745	90,3	0,82	7,1	1,0	3,3	
17-64- 8/10	800	96	743	92,5	0,86	6,4	0,85	2,5	463
	400	53	595	91,5	0,79	6,7	0,95	2,8	

Окончание табл. П3.1

500М-4	800	90	1485	95,0	0,90	6,7	1,2	2,2	26,2
560S-4	10000	113	1485	95,0	0,90	6,0	1,0	2,1	42,5
14-59-6	1250	144	990	94,8	0,88	6,0	1,0	2,4	173
15-41-6	1600	187	990	94,8	0,87	6,0	1,1	2,4	175
15-54-8	1600	185	740	94,8	0,88	5,2	1,0	2,0	430
15-56-10	1250	149	590	94,0	0,83	5,0	1,0	2,1	550
16-44-10	1600	188	590	94,5	0,83	5,7	1,0	2,2	813
16-41-16	800	108	370	93,8	0,76	4,9	1,0	2,0	825
16-51-16	1000	133	370	94,0	0,77	5,0	1,0	2,0	998
16-64-16	1250	162	370	94,5	0,79	4,7	1,0	2,0	1238

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Параметры турбогенераторов

Таблица П.4.1

#### Номинальные данные турбогенераторов

Тип	$S_{\text{ном}}$ , МВА	$P_{\text{ном}}$ , МВт	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$I_{\text{ном}}$ , кА	$\cos \varphi$	$U_{\text{фном}}$ , В	$I_{\text{фном}}$ , А	$I_{\text{фх}}$ А
Т2-12-2	15,0	12,0	6,3	1375	0,8	225	288	111
	15,0	12,0	10,5	825	0,8	226	289	111
Т-20-2	25,0	20,0	10,5	1375	0,8	192	548	208
ТВС-30	37,5	30,0	6,3	3440	0,8	222	456	156
ТВС-32	40,0	32,0	6,3	3670	0,8	221	492	165
	40,0	32,0	10,5	2200	0,8	219	488	155
ТВФ-63-2	78,5	63,0	6,3	7210	0,8	200	1450	538
	78,5	63,0	10,5	4330	0,8	177	1280	450
ТВФ-100-2	117,58	100	10,5	6475	0,85	270	1605	640
ТВ2-100-2	117,5	100	13,8	4955	0,85	219	650	268
ТВФ-120-2	125	100	10,5	6875	0,85	277	1715	634
ТВ2-150-2	166,5	150	18,0	5350	0,9	427	668	321
ТВВ-200-2	253,3	200	15,75	8625	0,85	315	2660	1025
ТГВ-200	235	200	15,75	8625	0,85	420	1890	720
ТГВ-300	353	300	20,0	10200	0,85	420	3050	1057

Таблица П.4.2

#### Электрические параметры турбогенераторов

Тип	$R_{\text{ст}}$ , Ом	$R_f$ , Ом	$X_d$ , о.е.	$X'_d$ , о.е.	$X''_d$ , о.е.	$X_{\sigma}$ , о.е.	$X_2$ , о.е.
Т2-12-2	0,00724	0,53	2,09	0,23	0,116	0,092	0,142
	0,0278	0,53	2,09	0,23	0,116	0,091	0,142
Т-20-2	0,0078	0,174	2,46	0,294	0,159	0,159	0,194
ТВС-30	0,00198	0,324	2,53	0,257	0,152	0,118	0,186
ТВС-32	0,00451	0,305	2,52	0,251	0,151	0,126	0,184
	0,00451	0,305	2,7	0,27	0,159	0,134	0,194

Окончание табл. П.4.2

ТВФ-63-2	0,00066	0,096	1,915	0,275	0,18	0,18	0,22
	0,00221	0,096	2,199	0,224	0,139	0,139	0,17
ТВФ-100-2	0,00104	0,185	1,79	0,26	0,183	0,157	0,223
ТВ2-100-2	0,00145	0,335	1,8	0,2	0,14	0,113	0,17
ТВФ-120-2	0,00104	0,120	1,907	0,278	0,192	0,167	0,234
ТВ2-150-2	0,00141	0,436	1,49	0,18	0,122	0,097	0,149
ТВФ-200-2	0,00041	0,123	1,88	0,25	0,165	0,140	0,201
ТВВ-200-2	0,00154	0,0878	1,88	0,275	0,191	0,166	0,230
ТГВ-200	0,00115	0,174	1,85	0,295	0,19	0,165	0,232
ТГВ-300	0,00128	0,103	2,2	0,3	0,195	0,17	0,238

Таблица П.4.3

**Показатели инерционности турбогенераторов**

Тип	$T'_{d0}$ с.	$T'_d$ с.	$T''_d$ с.	$T_a$ с.
Т2-12-2	6,72	0,72	0,091	0,106
	6,72	0,72	0,091	0,078
Т-20-2	6,58	0,79	0,98	0,23
ТВС-30	10,0	1,01	0,121	0,21
ТВС-32	10,7	1,07	0,133	0,249
	10,7	1,07	0,130	0,246
ТВФ-63-2	6,09	0,87	0,109	0,344
	8,68	0,86	0,111	0,222
ТВФ-100-2	6,5	0,95	0,119	0,417
ТВ2-100-2	13,0	1,46	0,192	0,386
ТВФ-120-2	6,45	0,94	0,120	0,40
ТВ2-150-2	11,9	1,44	0,18	0,442
ТВФ-200-2	6,83	0,91	0,114	0,51
ТВВ-200-2	6,38	0,934	0,117	0,31
ТГВ-200	6,85	1,1	0,147	0,546
ТГВ-300	7,0	0,96	0,12	0,54

## Содержание

<b>Введение</b> .....	3
<b>Лабораторная работа № 1.</b> Исследование работы простейшей системы передачи электрической энергии в режиме трехфазного короткого замыкания.....	4
<b>Лабораторная работа № 2.</b> Исследование переходных процессов в трансформаторе при трехфазном коротком замыкании вторичной обмотки.....	11
<b>Лабораторная работа № 3.</b> Исследование переходных процессов в синхронном генераторе при трехфазном коротком замыкании на его шинах.....	18
<b>Лабораторная работа № 4.</b> Исследование переходных процессов в простейшей системе, вызванных прямым пуском мощного асинхронного двигателя.....	26
<b>Лабораторная работа № 5.</b> Определение влияния параметров простейшей системы передачи электрической энергии на ударный ток линии.....	33
<b>Лабораторная работа № 6.</b> Исследование работы простейшей системы передачи электрической энергии при несимметричном нарушении режима работы.....	40
<b>Литература</b> .....	46
<b>Приложение</b> .....	47

Редактор Ахметжанова Г.М.