

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов специальности
7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Витебск
2025

УДК 621.311(075.8)

Составители:

В. В. Леонов
С. А. Клименкова
Д. А. Тёмкин

Одобрено кафедрой «Автоматизация производственных процессов»
УО «ВГТУ», протокол № 10 от 17.04.2025.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 10 от 18.06.2025.

Переходные процессы в системах электроснабжения: методические указания по выполнению лабораторных работ / сост. В. В. Леонов, С. А. Клименкова, Д. А. Темкин – Витебск : УО «ВГТУ», 2025. – 53 с.

В методических указаниях содержится материал для выполнения лабораторных занятий по дисциплине в соответствии с учебной программой. Методические указания предназначены для анализа переходных процессов в системах электроснабжения, с целью правильного выбора параметров систем электроснабжения и аппаратуры защиты.

УДК 621.311(075.8)

© УО «ВГТУ», 2025

Содержание

Введение	4
Лабораторная работа 1. Изучение блоков для моделирования линий электропередач. Составление схемы для моделирования сети.	5
Лабораторная работа 2. Изучение измерительных блоков и моделирование сети электроснабжения	8
Лабораторная работа 3. Исследование влияния симметричного и не симметричного короткого замыкания на систему электроснабжения	14
Лабораторная работа 4. Создание модели сети электроснабжения и настройка блоков по исходным данным	20
Лабораторная работа 5. Расчет параметров для моделирования в программе MATLAB трехфазного двухобмоточного трансформатора по каталожным данным	29
Лабораторная работа 6. Моделирование сети с помощью стандартных блоков программы MATLAB	38
Лабораторная работа 7. Исследование на созданной модели сети влияния коэффициента загрузки трансформатора на потери мощности в сети	40
Лабораторная работа 8. Исследование влияния конденсаторной батареи на шинах нагрузки, на величину потерь напряжения и потерь мощности в линии	46
Лабораторная работа 9. Исследование влияния конденсаторной батареи при продольном включении в сеть на головном участке моделируемой сети с целью полной компенсации индуктивного сопротивления линии	49
Список используемых источников	52

Введение

Основная цель лабораторных работ – это развитие у студентов самостоятельного инженерного мышления, приобретение навыков работы со справочной литературой и нормативно-техническими материалами, научиться использовать программные средства для расчетов переходных режимов СЭС.

В процессе прохождения лабораторных работ студенты знакомятся с устройством, принципом работы, методами расчета, проектирования и определения эксплуатационных характеристик систем электроснабжения.

Полученные знания, умения и навыки могут быть использованы студентами при изучении дисциплин: «Электроснабжение промышленных предприятий», «Моделирование, оптимизация и управление энергетическими системами».

Лабораторная работа 1

Изучение блоков для моделирования линий электропередач. Составление схемы для моделирования сети

Цель работы: изучить среду моделирования MATLAB. Составить схему для моделирования трехфазного КЗ наиболее распространенной системы.

Теоретические сведения

Процесс моделирования средствами Simulink можно разделить на несколько этапов.

Первым из них является этап составления расчетной схемы сети.

Под расчетной схемой понимается электрическая схема исследуемого участка сети с нанесенными на ней параметрами, которые должны быть учтены при моделировании.

Вторым этапом является компоновка модели, которая заключается в выборе из библиотек Simulink необходимых блоков, их размещение в специальном окне и соединение между собой. Наиболее часто используемые блоки для моделирования систем электроснабжения и места их размещение в библиотеках будут рассмотрены далее.

Практическая часть

Ход работы:

1. Запустить среду моделирования MATLAB. Запустить пакет Simulink из основного окна программы набором в командной строке MATLAB команды `>>Simulink` или нажатием кнопки с всплывающей подсказкой «Simulink» на панели инструментов (рис. 1.1).

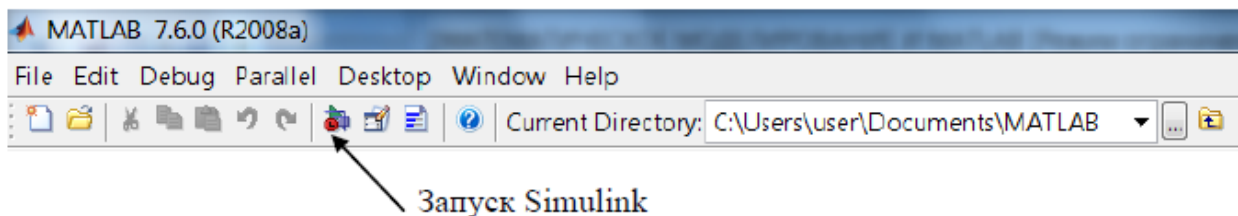


Рисунок 1.1 – Окно командной строки MATLAB

2. После нажатия кнопки открывается окно браузера библиотек **Simulink Library Browser**. Для создания модели сначала надо открыть окно для новой модели, нажав на кнопку «Создать новую модель».

3. Изучить библиотечные блоки, расположенные в выпадающем списке, в разделе «Specialized Power System» в подразделе «Power Grid Elements» и «Sources» (рис. 1.2).

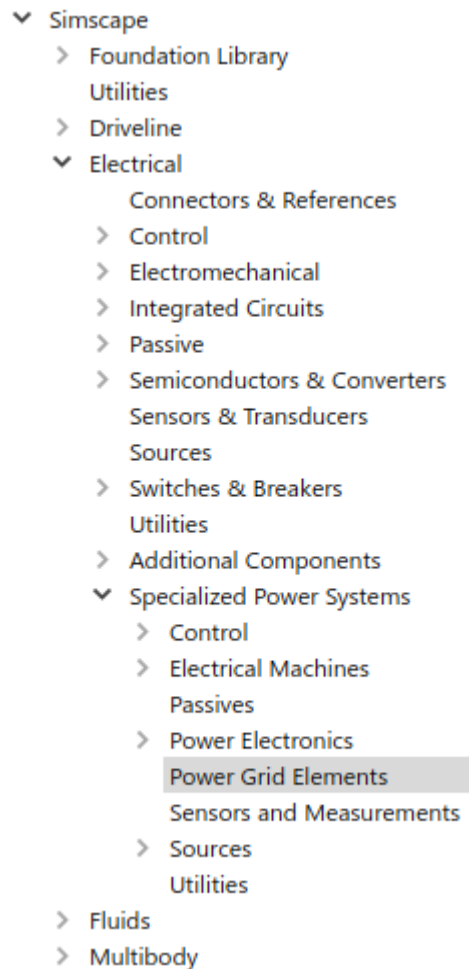


Рисунок 1.2 – Окно раздела MATLAB «Specialized Power System»

4. Составить схему для моделирования трехфазного КЗ схемы, представленной на рисунке 1.3, руководствуясь таблицей 1.1.

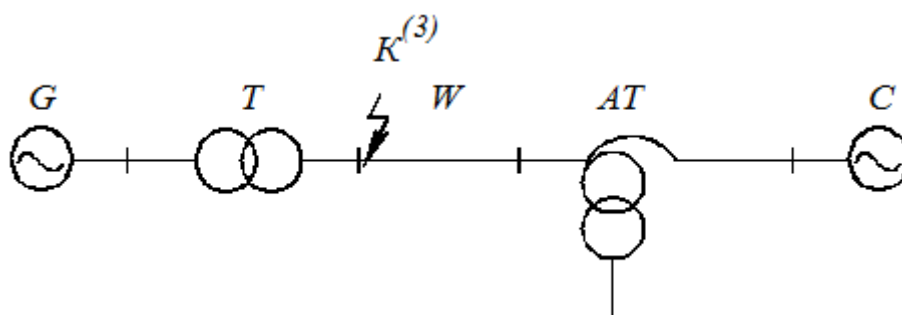


Рисунок 1.3 – Схема трехфазного КЗ

Таблица 1.1 – Элементы моделирования КЗ

Обозначение на схеме	Название элемента в MATLAB
W	Three-Phase PI Section Line
T	Tree-Phase Transformer (Two Windings)
AT	Tree-Phase Transformer (Three Windings)
G и C	Three-Phase Source
K	Three-Phase Fault
Нагрузка (Потребитель)	Three-Phase Series RLC Load

5. Изучить библиотечные блоки и их настройку параметров, установленных по умолчанию. Для просмотра и изменения параметров блока необходимо дважды щелкнуть левой клавишей мыши, указав курсором на изображение блока. Откроется окно редактирования параметров данного блока. При вводе численных параметров следует иметь в виду, что в качестве десятичного разделителя должна использоваться точка, а не запятая.

6. Сделайте выводы, какие блоки можно также использовать для моделирования данной схемы, а также, почему рекомендованные модули использовать предпочтительней.

Оформление и содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Схема для моделирования трехфазного КЗ.
3. Схема для моделирования трехфазного КЗ в среде моделирования MATLAB.
4. Перечисление блоков, которые можно также использовать для моделирования данной схемы.
5. Выводы: почему рекомендованные модули использовать предпочтительней?

Контрольные вопросы:

1. Как запустить пакет Simulink?
2. Какими критериями руководствуются для выбора блоков и почему?
3. Какие настройки параметров библиотечных блоков отвечают и за какой параметр?

Лабораторная работа 2

Изучение измерительных блоков и моделирование сети электроснабжения

Цель работы: изучить возможности моделирования в MATLAB. Расставить измерительные приборы для контроля параметров при моделировании трехфазного КЗ. Промоделировать схему.

Теоретические сведения

Управление параметрами моделирования – имитационное моделирование режима работы схемы будет выполняться правильно только в случае, если предварительно задать (настроить) параметры моделирования (расчета). Доступ к этим параметрам возможен из меню модели **Simulation/Configuration Parameters**. Окно настройки параметров управления расчетом приведено на рисунке 2.1.

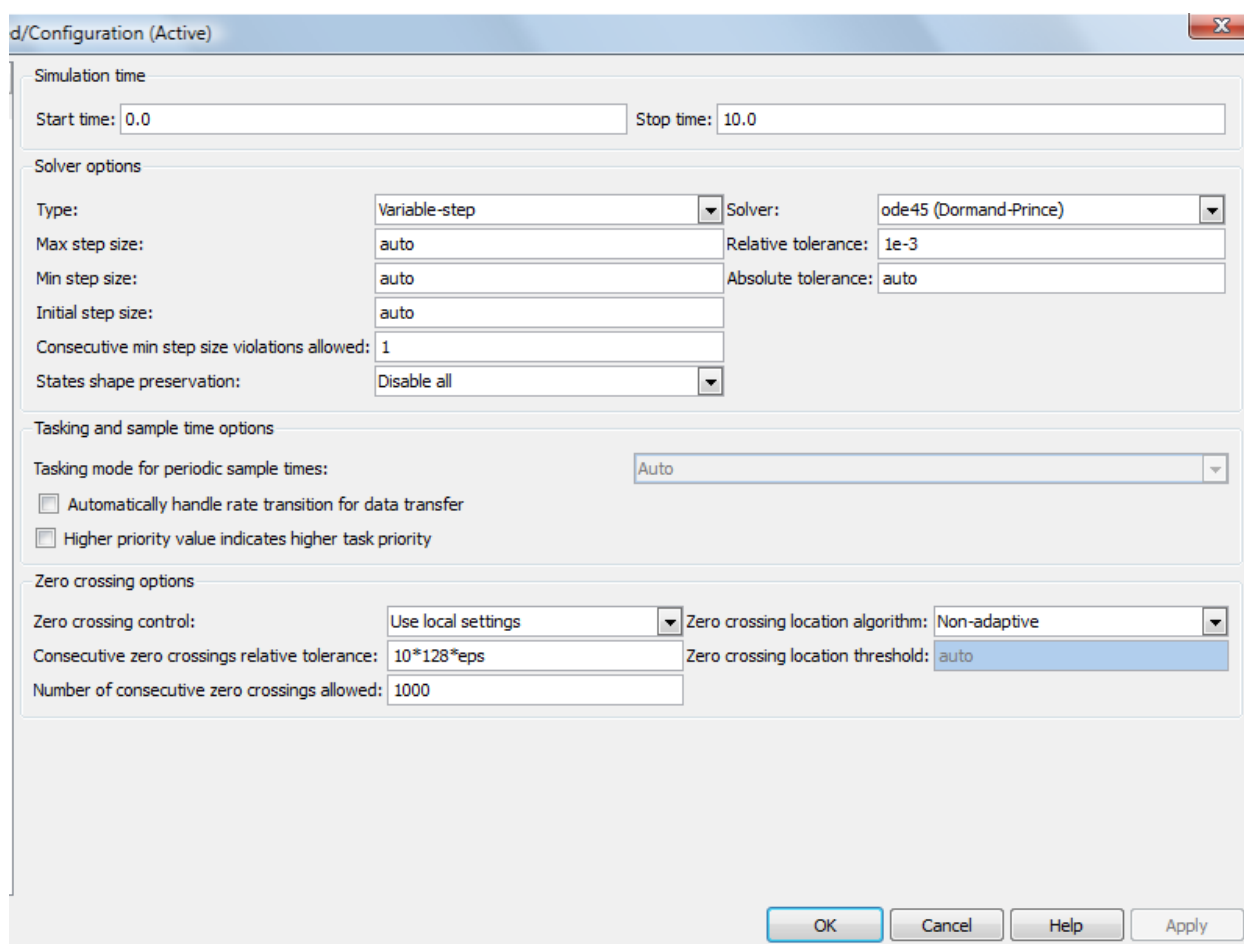


Рисунок 2.1 – Фрагмент окна настройки параметров управления расчетом

В левой части панели управления находится список групп настраиваемых параметров. При выборе какой-либо группы параметров в левой части окна появляется панель, позволяющая изменять параметры данной группы. Установка параметров моделирования выполняется с помощью элементов управления, размещенных в панели **Solver** [Решатель] – вкладка позволяет устанавливать параметры решающего устройства.

Параметры разделены на две группы – **Simulation time** и **Solver options** (рис. 2.1).

Simulation time: [Интервал моделирования или время расчета]. Время расчета задается указанием начального (**Start time**) и конечного (**Stop time**) значений времени расчета. Начальное время чаще всего принимается равным нулю. Величина конечного времени задается пользователем исходя из условий решаемой задачи (при первом запуске схемы имеет смысл задавать интервал времени как можно меньше во избежание неоправданных потерь времени на отладку модели, следует также помнить, что время моделирования – величина условная).

Solver options: [Параметры решателя]. Здесь задаются две опции: тип решения и метод решения. Во-первых, необходимо указать метод интегрирования (**Type**): либо с фиксированным (**Fixed-step**), либо с переменным (**Variable-step**) шагом. Как правило, **Variablestep** используется для моделирования непрерывных систем, а **Fixedstep** – для дискретных. Лучшие результаты, как правило, дает метод решения с переменным шагом, т. е. при медленном изменении процесса шаг увеличивается, а при быстром уменьшается.

В системе **MATLAB** имеется возможность выбора одного из 7 методов численного интегрирования, характеристика которых приведена в таблице 2.1

Содержимое панели **Configuration Parameters** может меняться в зависимости от выбранного метода интегрирования и решателя.

Содержимое панели **Configuration Parameters** может меняться в зависимости от выбранного метода интегрирования и решателя.

Основные параметры решателей для разных методов интегрирования приведены ниже.

Max step size – максимальный шаг интегрирования. По умолчанию устанавливается автоматически (auto), и его значение в этом случае равно $(\text{StopTime} - \text{StartTime})/50$. Если это значение окажется слишком большим, то наблюдаемые графики представляют собой ломаные, а не плавные линии. В этом случае величину максимального шага необходимо задавать явным образом;

Min step size – минимальный шаг интегрирования;

Initial step size – начальное значение шага интегрирования;

Zero crossing control – контроль пересечения нулевого уровня. Значение параметра выбирается из списка: Use local setting (Использовать настройки блоков), Enable on (Включить для всех блоков), Disable on (Выключить для всех блоков). Параметр позволяет управлять точностью расчета при пересечении

сигналами нулевого уровня. При отключении Zero crossing con может быть существенно повышена скорость расчета, но будет снижена точность;

Relative tolerance – относительная погрешность;

Absolute tolerance – абсолютная погрешность;

Fixed step size – фиксированный шаг расчета. Параметр доступен при выборе метода интегрирования с фиксированным шагом.

Таблица 2.1 – Методы численного интегрирования, доступные в программе MATLAB

Обозначение	Название метода	Область применения
ode45	Одношаговые явные методы Рунге – Кутта 4-го и 5-го порядков	Наиболее часто употребляемый метод, использует разные порядки точности для контроля шага интегрирования
ode23	Одношаговые явные методы Рунге – Кутта 2-го и 3-го порядков	При низких требованиях к точности или для решения умеренно жестких задач
ode113	Многошаговый метод Адамса – Башфорта –Мултона переменного порядка	При высоких требованиях к точности и для решения задач со сложными правыми частями
ode15s	Многошаговый метод переменного порядка, использующий формулы численного дифференцирования	Если алгоритм ode45 сходится медленно
ode23s	Одношаговый метод, использующий формулу Розенброка 2-го порядка	При низких требованиях к точности
ode23t	Метод трапеций с интерполяцией	Для решения умеренно жестких задач
ode23tb	Неявный метод Рунге – Кутта в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка в последующем	При низких требованиях к точности

Запуск, выполнение и завершение моделирования. Запуск расчета выполняется с помощью выбора пункта меню Simulation/Start или инструмента, изображенного в виде черного треугольника на панели инструментов. В процессе выполнения расчета эта кнопка приобретает вид «Процесс расчета» можно завершить досрочно, выбрав пункт меню Simulation/Stop или инструмент, изображенный в виде черного квадрата. Расчет можно остановить (Simulation/Pause) и затем продолжить (Simulation/Continue).

После создания и отладки модели для последующего использования ее необходимо сохранить в виде файла, выбрав пункт меню File/Save As... в окне модели

и указать папку и имя файла. Имя файла должно начинаться с буквы и не может содержать символы кириллицы и спецсимволы, кроме подчеркивания. Модель записывается в виде файла с расширением mdl. При повторных запусках программы **Simulink** загрузка схемы осуществляется с помощью меню File/Open из окна обозревателя библиотеки или из командного окна системы MATLAB.

Для завершения работы необходимо после сохранения модели в файле закрыть окно модели, окно обозревателя библиотек, а также командное окно пакета MATLAB

Практическая часть

Ход работы:

1. Запустить среду моделирования MATLAB. Запустить пакет Simulink.
2. Открыть проект, созданный в лабораторной работе 1.
3. Изучить библиотечные блоки, расположенные в выпадающем списке, в разделе «Specialized Power System» в подразделе «Sensors and Meserements» и «Simulink» в подразделе «Sinks» (рис. 2.2).

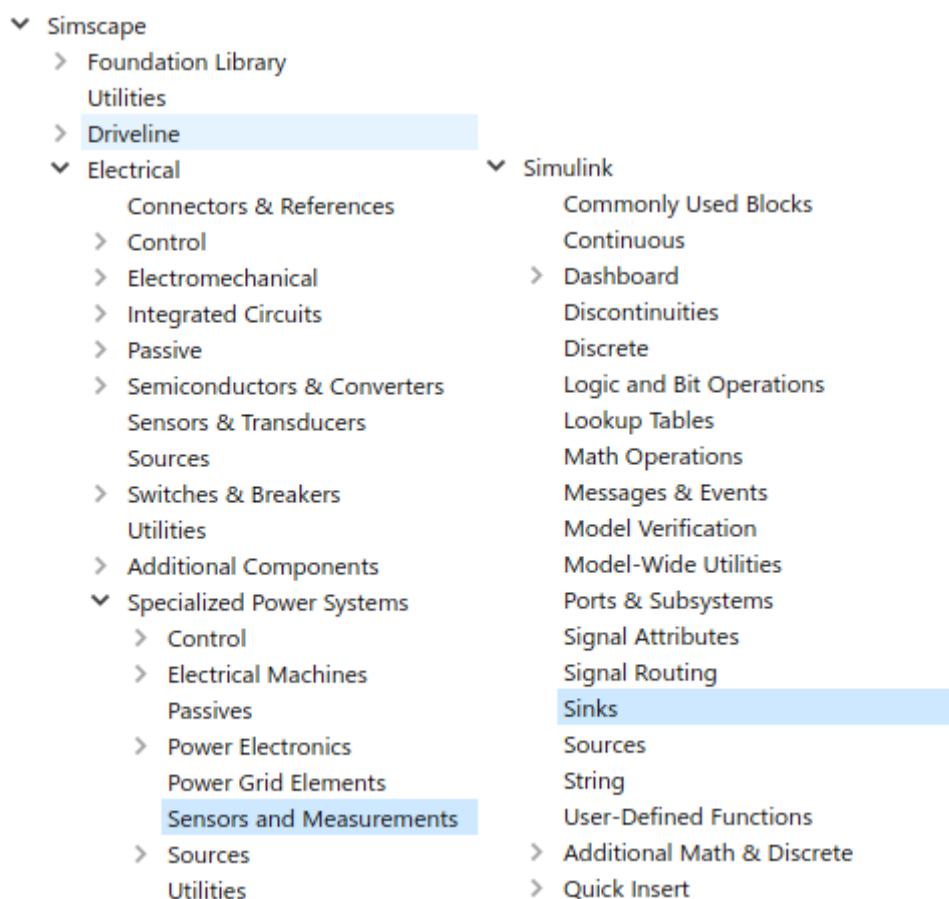


Рисунок 2.2 – Библиотечные блоки MATLAB

4. Добавить в схему для моделирования трехфазного КЗ измерительные модули для измерения активной и реактивной мощности между всеми элементами цепи (рис. 2.3). Модули для измерения активной и реактивной мощности приведены в таблице 2.2.

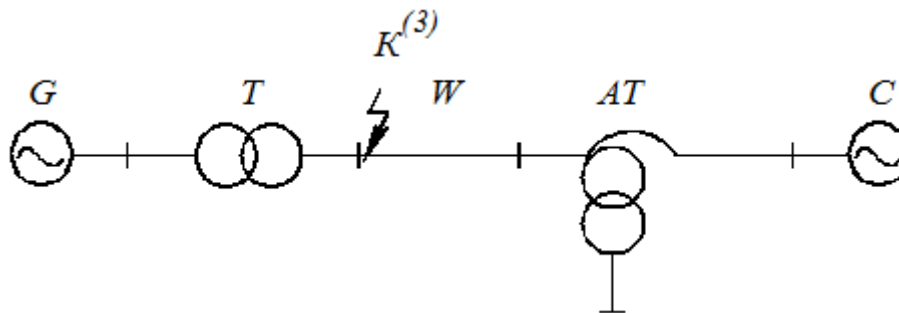
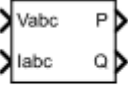


Рисунок 2.3 – Схема трехфазного КЗ

Таблица – 2.2 Элементы MATLAB

Обозначение на схеме	Страница с описанием элемента	Название элемента в MATLAB
 Three-Phase V-I Measurement	121	Three-Phase V-I Measurement
 Power (3ph, Phasor)	123	3-phase Instantaneous Active & Reactive Power
 Display	116	Display

5. Настроить параметры модулей в соответствии с параметрами.

генератор: $S_{НОМ} = 200 \text{ МВА}$; $U_{НОМ} = 15,75 \text{ кВ}$; $\cos \varphi_{НОМ} = 0,8$; $x_{*d(НОМ)}'' = 0,19$;

трансформатор:

$S_{НОМ} = 250 \text{ МВА}$; $U_{НОМВ} = 242 \text{ кВ}$; $U_{НОМН} = 15,75 \text{ кВ}$; $u_K = 10\%$;

автотрансформатор:

$S_{НОМ} = 250 \text{ МВА}$; $U_{НОМВ} = 500 \text{ кВ}$; $U_{НОМС} = 230 \text{ кВ}$; $U_{НОМН} = 38,5 \text{ кВ}$;

$u_{KBC} = 10,5\%$; $u_{KBH} = 24\%$; $u_{KCH} = 13\%$; $S_{НОМНН} = 125 \text{ МВА}$;

воздушная линия электропередачи: $x_l = 0,4 \text{ Ом/км}$; $l = 80 \text{ км}$;

система: $S_{НОМ} = 2000 \text{ МВА}$; $U_{НОМ} = 500 \text{ кВ}$; $x_{*(НОМ)} = 1$.

6. Произвести моделирование. (Рекомендуемый метод **ode23s** для скорейшего получения результата).

7. Сделайте вывод, на каком элементе цепи происходят наибольшие потери мощности.

Оформление и содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Схема для моделирования трехфазного КЗ.
3. Промоделированная схема с показанием приборов до настройки параметров.
4. Промоделированная схема с показанием приборов после настройки параметров.
5. Выводы: на каких элементах цепи происходят наибольшие потери мощности?

Контрольные вопросы:

1. Как запустить и приостановить моделирование? Как вызвать настройки параметров моделирования?
2. Какими критериями руководствуются при выборе параметров моделирования?
3. Какие настройки параметров моделирования вы считаете оптимальными, почему?

Лабораторная работа 3

Исследование влияния симметричного и не симметричного короткого замыкания на систему электроснабжения

Цель работы: изучить влияние короткого замыкания на систему электроснабжения.

Теоретические сведения

Трехфазный короткозамыкатель *Three-Phase Fault* – схема замещения короткозамыкателя показана на рисунке 3.1. Величина сопротивления заземления R_g устанавливается равной 10 МОм, если замыкание на землю не задано в окне параметров блока.

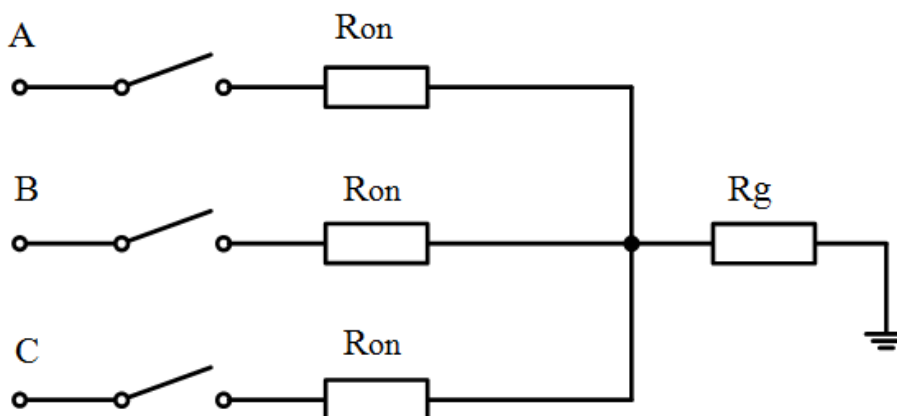


Рисунок 3.1 – Схема замещения блока трехфазного короткозамыкателя

Окно параметров блока изображено на рисунке 3.1.

Параметры блока следующие (рисунок 3.2):

Phase A Fault [Управление ключом фазы A] – при снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром **Transition status**, если блок работает под управлением встроенного таймера, или параметром **Initial status of fault**, если блок управляется внешним сигналом;

Phase B Fault [Управление ключом фазы B] – при снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром **Transition status**, если блок работает под управлением встроенного таймера, или параметром **Initial status of fault**, если блок управляется внешним сигналом;

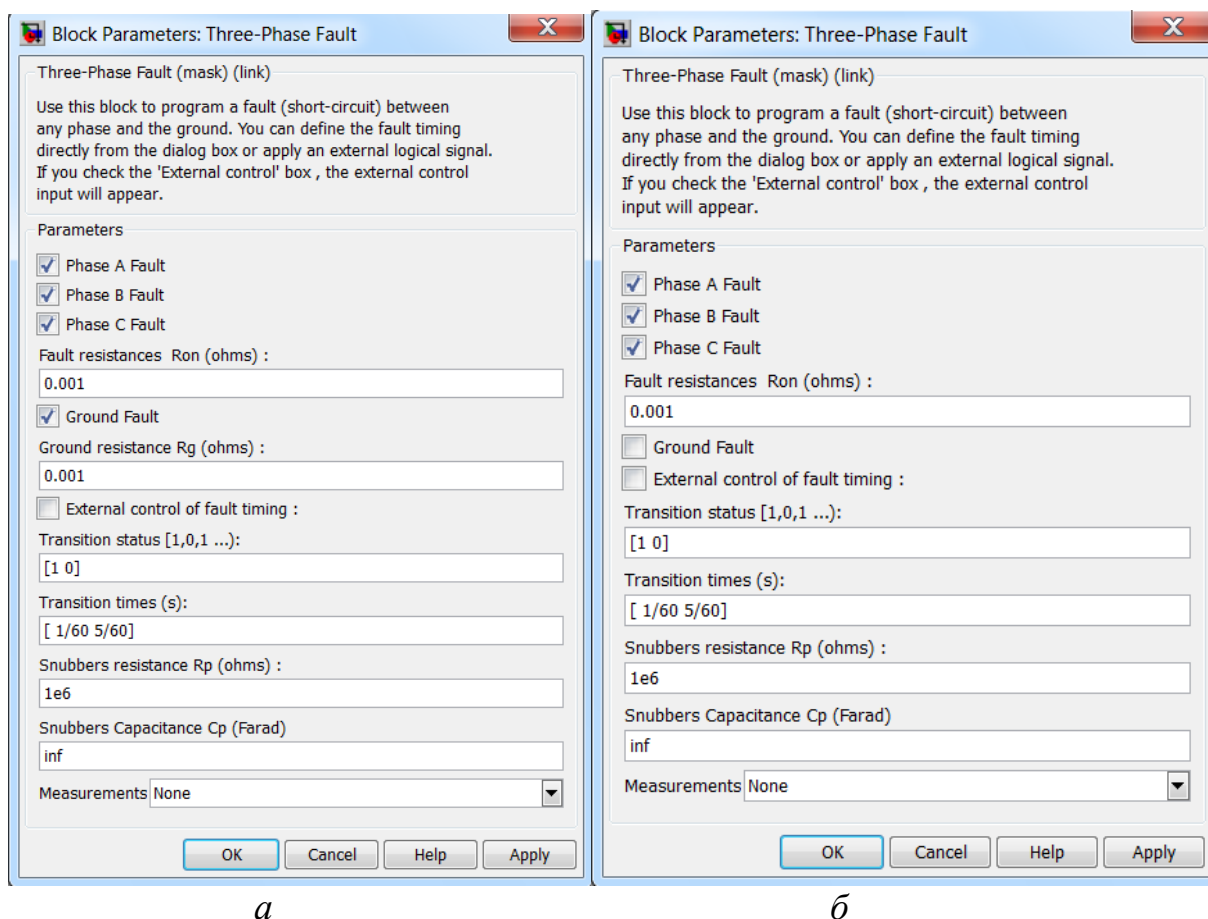


Рисунок 3.2 – Окно настройки параметров блока **Three-Phase Fault**:
а – с встроенным таймером, б – с внешним таймером

Phase C Fault [Управление ключом фазы C] – при снятом флажке управление ключом не производится. Состояние ключа определяется параметром **Transition status**, если блок работает под управлением встроенного таймера, или параметром **Initial status of fault**, если блок управляется внешним сигналом;

Fault resistance Ron (Ohm) [Сопротивление выключателей в замкнутом состоянии (Ом)];

Ground Fault [Замыкание на землю] – при установленном флажке производится замыкание на землю;

Ground resistance Rg (Ohm) [Сопротивление заземления (Ом)] – величина сопротивления заземления не может задаваться равной нулю;

External control of switching times [Внешнее управление временем срабатывания] – при установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключей, а нулевой уровень является командой на размыкание ключей;

Transition status [1 0 1...] [Состояние ключей] – состояние ключей, которое соответствует моменту времени, заданному вектором **Transition times** (0 – разомкнутый ключ, 1 – замкнутый ключ). Параметр доступен при управлении блоком от встроенного таймера;

Transition times (s) [Время срабатывания ключа] – параметр задается в виде вектора значений времени, определяющих моменты срабатывания ключей. Параметр доступен при управлении блоком от встроенного таймера;

Initial status of fault [Phase A Phase B Phase C] [Начальное состояние ключей] – параметр задается в виде вектора из трех элементов, определяющих состояние ключей в начальный момент времени. Значение элемента равно 0, соответствует разомкнутому начальному состоянию, 1 – замкнутому. Параметр доступен при внешнем управлении устройством;

Snubbers resistance R_s (Ohm) [Сопротивление дугогасящей цепи (Ом)];

Snubbers capacitance C_s (F) [Емкость дугогасящей цепи (Ф)];

Measurements [Измеряемые переменные] – значения параметра выбираются из списка:

None – нет переменных для отображения;

Fault voltages – напряжения на входных зажимах короткозамыкателя;

Fault currents – токи короткозамыкателя;

Fault voltages and currents – напряжения и токи короткозамыкателя.

На рисунке 3.2 приведена схема с использованием трехфазного короткозамыкателя. В момент времени 0,1 с в сети 10 кВ, питающей нагрузку, происходит трехфазное короткое замыкание. Фрагмент окна настроек блока **Three-Phase Fault** для варианта управления от встроенного таймера приведен на рисунке 3.3. Здесь же с помощью блока **Multimeter** показано изменение токов в сети по фазам при трехфазном коротком замыкании

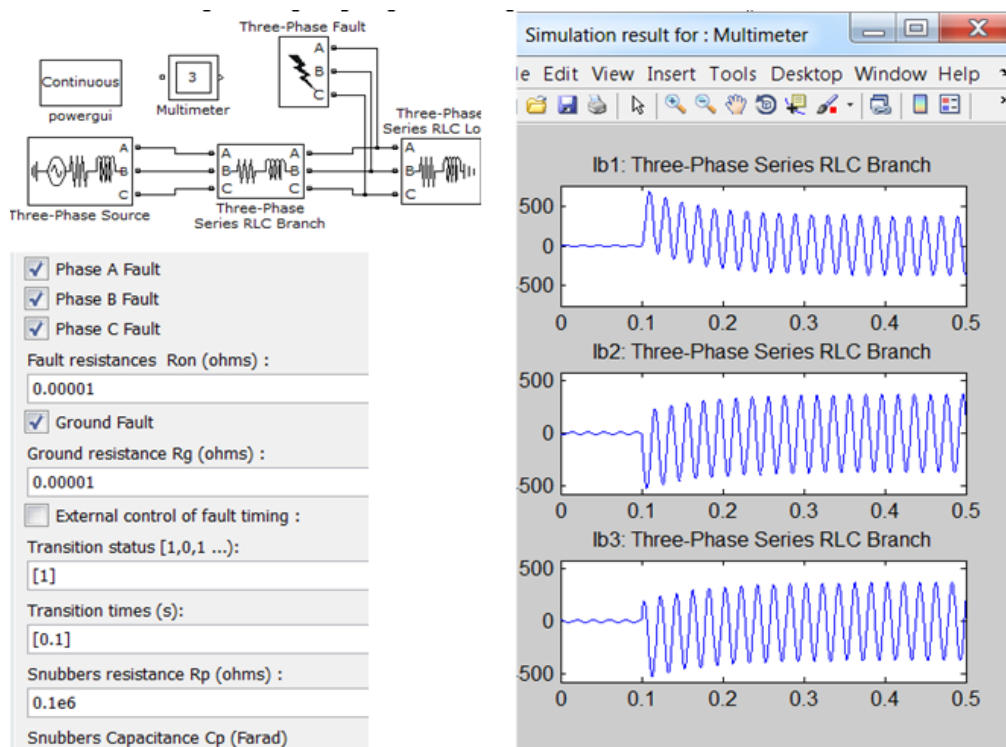


Рисунок 3.3 – Пример схемы, окна настроек блока и результатов моделирования трехфазного короткого замыкания блоком **Three-Phase Fault**

Моделирование короткого замыкания можно произвести и без использования данного блока. Для этого можно применить рассмотренный выше блок ***Three-Phase Breaker***. Но к нему необходимо будет добавить блоки, моделирующие сопротивления короткого замыкания и таймер. В результате схема всего замыкающего устройства получится весьма громоздкой. Блок ***Three-Phase Fault*** упрощает модели для исследования аварийных режимов в трехфазных сетях.

Практическая часть

Ход работы:

1. Запустить среду моделирования MATLAB. Запустить пакет Simulink.
2. Открыть проект, созданный в лабораторной работе 2.
3. Изучить библиотечные блоки ***Three-Phase Fault***, расположенные в выпадающем списке, в разделе «Specialized Power System» в подразделе «Power Grid Elements».
4. Настроить блок ***Three-Phase Fault*** для моделирования короткого замыкания 3-х фаз и промоделировать схему (рис. 3.4).

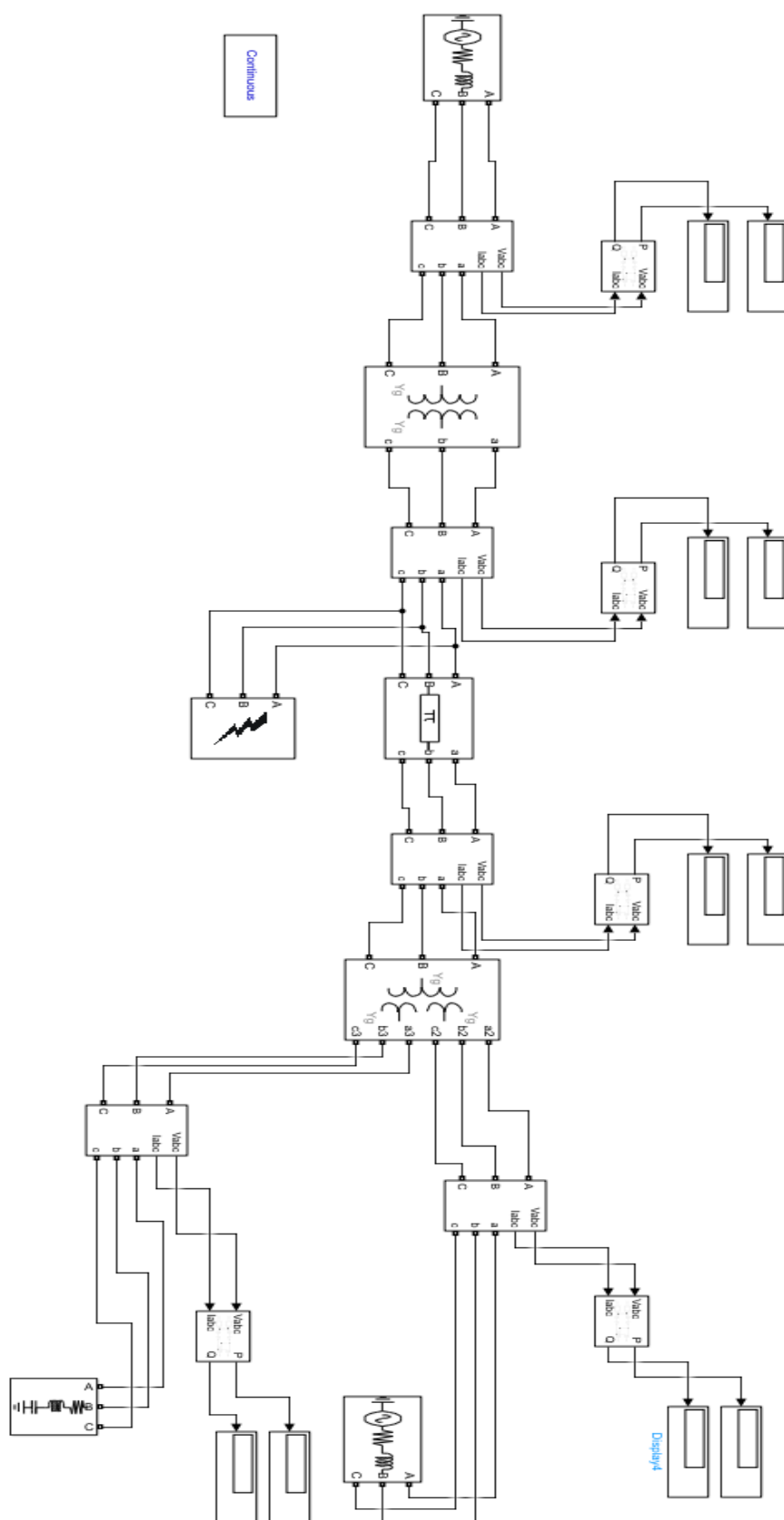


Рисунок 3.3 – Схема моделирования в MATLAB

5. Настроить блок ***Three-Phase Fault*** для моделирования короткого замыкания 2-х фаз и промоделировать схему.

6. Настроить блок ***Three-Phase Fault*** для моделирования короткого замыкания 1-й фазы на землю и промоделировать схему.

7. Настроить блок ***Three-Phase Fault*** для моделирования короткого замыкания 3-х фаз на землю и промоделировать схему.

8. Сделайте вывод, какое короткое замыкание наиболее разрушительно для системы электроснабжения?

Оформление и содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.

2. Схема для моделирования трехфазного КЗ.

3. Промоделированная схема с показанием приборов для режима короткого замыкания 3-х фаз.

4. Промоделированная схема с показанием приборов для режима короткого замыкания 2-х фаз.

5. Промоделированная схема с показанием приборов для режима короткого замыкания 1-й фазы на землю.

6. Промоделированная схема с показанием приборов для режима короткого замыкания 3-х фаз на землю.

7. Выводы: какое короткое замыкание наиболее разрушительно для системы электроснабжения?

Контрольные вопросы:

1. Что такое короткое замыкание?

2. Какие виды короткого замыкания существуют?

3. Каковы последствия короткого замыкания?

Лабораторная работа 4

Создание модели сети электроснабжения и настройка блоков по исходным данным

Цель работы: создать модель системы электроснабжения в MATLAB. Рассчитать параметры настройки блоков в соответствии с индивидуальным заданием.

Теоретические сведения

Схемы замещения линий электропередачи и определение их параметров. В расчетах ЛЭП может быть представлена Т- и П-образными схемами замещения, которые приведены на рисунке 4.1.

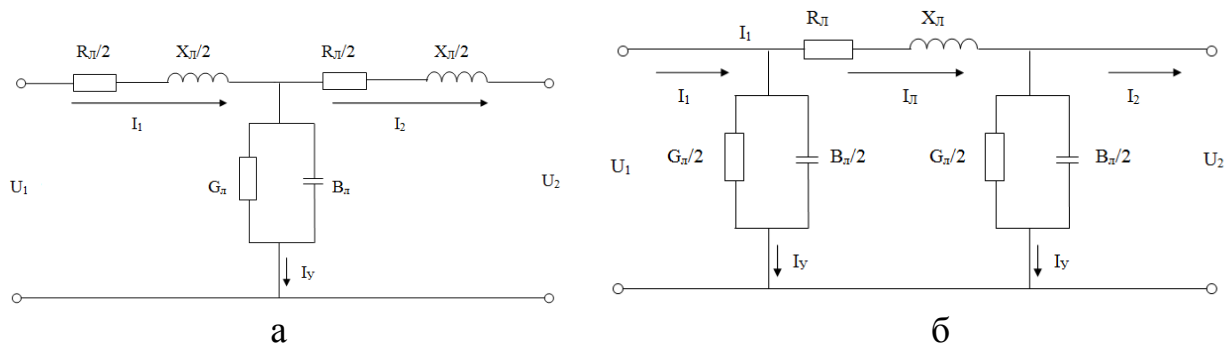


Рисунок 4.1 – Схемы замещения линии с сосредоточенными параметрами:
а – Т-образная; б – П-образная

Активное сопротивление (R_{π}). Для проводов, выполненных из цветного металла (медь, алюминий), принято определять сопротивление одного километра длины линии (погонное сопротивление), которое определяется по формуле 4.1.

$$R_{\pi} = r_0 \cdot \ell, \quad (4.1)$$

где ℓ – длина линии, км; r_0 – активное сопротивление провода на единицу длины линии.

Активное сопротивление провода на единицу длины линии r_0 определяется по формуле 4.2.

$$r_0 = \frac{\rho}{F}, \quad (4.2)$$

где ρ – удельное активное сопротивление материала провода, Ом·мм²/км; F – сечение фазного провода, мм². Для алюминия в зависимости от его состава принимают $\rho = 29,5 \div 31,5$ Ом·мм²/км, а для меди $\rho = 18 \div 19$ Ом·мм²/км.

Активное сопротивление провода на единицу длины линии r_0 (Ом/км) часто называют удельным сопротивлением линии. Значения удельных сопротивлений (сопротивлений постоянному току) линий в зависимости от сечения провода при температуре +20 °С приведены в литературе или определяются по выражению (4.2). Зная r_0 легко определить сопротивление всей линии или ее участка.

Индуктивное сопротивление (X_l). Протекающий по линии переменный ток, образует вокруг проводников переменное магнитное поле, которое наводит в проводнике электродвижущую силу (ЭДС) самоиндукции. Соседние провода трехфазной линии наводят в нем ЭДС взаимной индукции. Эти ЭДС само- и взаимной индукции, складываясь с падением напряжения на активном сопротивлении провода, уравнивают приложенное напряжение. Сопротивление току, обусловленное противодействием ЭДС само- и взаимной индукции, называется реактивным индуктивным сопротивлением. Чем дальше друг от друга расположены фазные провода линии, тем влияние соседних проводов будет меньше, а поток рассеяния между проводами и, следовательно, индуктивное сопротивление линии, обусловленное ЭДС взаимной индукции больше.

Таким образом, индуктивное сопротивление провода определяется явлениями самоиндукции и взаимной индукции фаз линии и зависит от диаметра проводов фазы, расстояния между фазами, конструктивного выполнения ЛЭП, частоты тока в сети.

Индуктивное сопротивление 1 км длины линии определяется по формуле 4.3.

$$X_0 = \omega \cdot L_0, \quad (4.3)$$

где L_0 – погонная эквивалентная индуктивность фазы, Гн/км; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота переменного тока, рад/с; f – частота, Гц.

При частоте 50 Гц, индуктивное сопротивление 1 км длины линии определяется по следующей эмпирической формуле 4.4.

$$x_0 = 0,145 \cdot \lg \frac{2D_{\text{ср.}}}{d} + 0,0157\mu, \quad (4.4)$$

где d – диаметр провода; μ – относительная магнитная проницаемость материала провода; $D_{\text{ср.}}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами фаз.

При известном расположении фаз на опоре среднее геометрическое расстояние определяется по формуле 4.5.

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}, \quad (4.5)$$

где D_{12} , D_{13} , D_{23} – расстояния между проводами фаз.

Индуктивное сопротивление линии определяется по формуле 4.6.

$$X_{\text{л}} = x_0 \cdot \ell, \quad (4.6)$$

Расстояние между соседними проводами воздушной линии зависит от ее напряжения. Примерные их значения приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Примерные расстояния между соседними проводами на опорах воздушных линий различных напряжений

Напряжение, кВ	До 1	10	35	110	220
Расстояния, м	0,4–0,6	1,0–2,0	2,5–3	4–5	7

Таким образом, индуктивное сопротивление ЛЭП, в отличие от активного сопротивления, практически не зависит от сечения проводов, определяется исполнением линии и конструкцией фазы.

Активная проводимость линии ($G_{\text{л}}$) обуславливается потерями активной мощности в режиме холостого хода линии. В линиях эти потери вызываются, во-первых, явлением электрической короны и, во-вторых, токами утечки через изоляторы (потери от несовершенства изоляции).

Большое влияние на потери мощности на корону и от токов утечки оказывают влажность и загрязнение окружающего воздуха. В зависимости от погоды потери от токов утечки и на корону могут изменяться в десятки раз, поэтому при анализе, например, влияния погодных условий на потери мощности в сети пренебрегать этими потерями не стоит.

Величину погонной активной проводимости в зависимости от необходимости учета тех или иных потерь можно рассчитать по формуле

$$g_0 = \frac{\Delta P_{\text{кор, диэл, ут}}}{U_{\text{ном}}^2}, \text{ СМ/КМ} \quad (4.7)$$

где $P_{\text{кор}}$, диэл, ут – потери мощности на корону, диэлектрические (для кабелей) или утечку, определяемые по каталожным данным, в зависимости от уровня напряжения сети.

Активная проводимость участка сети находится следующим образом:

$$G_{\text{л}} = g_0 \cdot \ell \quad (4.8)$$

Активной проводимостью сельских электрических сетей из-за относительно невысокого напряжения этих сетей практически во всех расчетах пренебрегают, т. е. принимают активную проводимость линии $G_{\text{л}}$ равной нулю.

Реактивная емкостная проводимость линии (Вл)

Реактивная емкостная проводимость линии обусловлена наличием емкостей у каждого из проводов линии по отношению к земле и к другим проводам (фазам), так как любую пару проводов можно рассматривать как конденсатор.

Погонные емкостные проводимости между фазами и между проводами и землей, грозозащитными тросами и заземленными частями опоры моделируются одним параметром – емкостной проводимостью фазы b_0 .

В практических расчетах рабочую емкость одного километра воздушной линии можно определить по следующей эмпирической формуле

Ёмкость участка сети находится следующим образом:

$$c_0 = \frac{0,24}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{нр}}}} \cdot 10^{-6}, \text{ Ф/км} \quad (4.9)$$

Погонная емкостная проводимость воздушных и кабельных линий определяется по формуле

$$b_0 = \omega \cdot C_0, \text{ См/км} \quad (4.10)$$

Для воздушных линий при частоте 50 Гц величина погонной емкостной проводимости может быть определена по формуле:

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{R_{\text{нр}}}} \quad (4.11)$$

Формула (4.9) непригодна для определения рабочей емкости кабелей, так как жилы кабеля находятся на близком расстоянии друг от друга. Изоляцией служит не воздух, имеющий диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = 1$, а изоляция с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3 \div 4$. Кроме того, вблизи токоведущих жил имеется заземленная свинцовая оболочка, благодаря чему электрическое поле кабеля резко отличается от электрического поля воздушной линии.

Ввиду необходимости знать конструктивные и прочие данные о кабеле – обычно пользуются готовыми заводскими значениями рабочей емкости трех-жильного кабеля в зависимости от напряжения и марки кабеля (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Значения рабочей емкости трехжильного кабеля в зависимости от напряжения и марки кабеля

Сечение жилы, мм ²	Активное сопротивление при +20 °С, Ом/км		Индуктивное сопротивление прямой последовательности $X_{1уд}$ и емкостная проводимость $b_{уд}$ кабеля напряжением, кВ							
			6		10		20		35	
	Медь	Алюминий	$X_{1уд}$, Ом/км	$b_{уд} \cdot 10^{-4}$, См·км	$X_{1уд}$, Ом/км	$b_{уд} \cdot 10^{-4}$, См·км	$X_{1уд}$, Ом/км	$b_{уд} \cdot 10^{-4}$, См·км	$X_{1уд}$, Ом/км	$b_{уд} \cdot 10^{-4}$, См·км
10	1,84	3,1	0,11	62,8	—	—	—	—	—	—
16	1,15	1,94	0,102	72,2	0,113	—	—	—	—	—
25	0,74	1,24	0,091	88	0,099	72,2	0,135	53,5	—	—
35	0,52	0,89	0,087	97,2	0,095	85	0,129	60	—	—
50	0,37	0,62	0,083	114	0,09	91	0,119	66	—	—
70	0,26	0,443	0,08	127	0,086	97,5	0,116	75,5	0,137	56,5
95	0,194	0,326	0,078	134	0,083	110	0,110	81,5	0,126	63
120	0,153	0,258	0,076	146	0,081	116	0,107	100	0,120	75,5
150	0,122	0,206	0,074	162	0,079	138	0,104	110	0,116	81,5
185	0,099	0,167	0,073	169	0,077	141	0,101	119	0,113	88
240	0,077	0,129	0,071	185	0,075	144	—	—	—	—
300	0,061	0,103	—	—	—	—	0,095	—	0,097	—
400	0,046	0,077	—	—	—	—	0,092	—	—	—

Моделирование линий электропередачи в программе MATLAB
приложении Simulink – в программе принята приближенная модель линии, схема которой приведена на рисунке 4.2. Условные графические изображения элементов здесь не полностью соответствуют изображениям, принятым в ГОСТе. Особенно сильно отличается от принятого в ГОСТе изображение резистора. Поскольку пиктограммы всех схем состоят из условных изображений, принятых в англоязычной литературе, здесь для пояснения приведена схема, приводимая в области «Help» программы MATLAB без корректировки к условным изображениям элементов, принятым в ГОСТе.

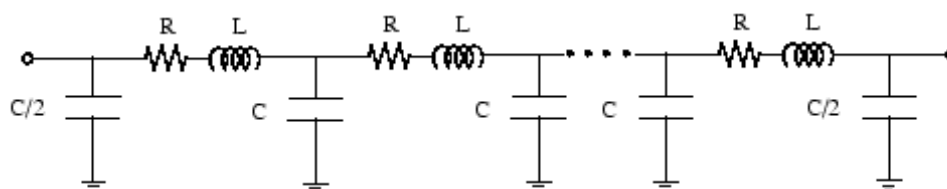


Рисунок 4.2 – Схема замещения линии электропередачи, принятая в программе MATLAB

Каждую секцию этой модели линии можно рассматривать как частный случай более полных моделей, приведенных на рисунке 4.2 (в модели рисунка 4.2 не учитывается активная проводимость, по сравнению с моделями рисунка 4.1). Модель может содержать от одной до нескольких последовательно соединенных идентичных секций с сосредоточенными параметрами, что позволяет приближенно учесть распределение параметров вдоль линии.

Число секций зависит от частотного диапазона, который необходимо охватить при моделировании. Приближенно число секций можно определить из выражения

$$f_{\max} = \frac{N \cdot v}{8\ell} \quad (4.12)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.13)$$

где N – число секций линии; v – скорость распространения волны в км/с, при измерении индуктивности в Гн/км и емкости в Ф/км; ℓ – длина линии, км.

Модель линии с сосредоточенными параметрами Pi Section Line

Окно задания параметров блока для моделирования фазы линии приведено на рисунке 4.3.

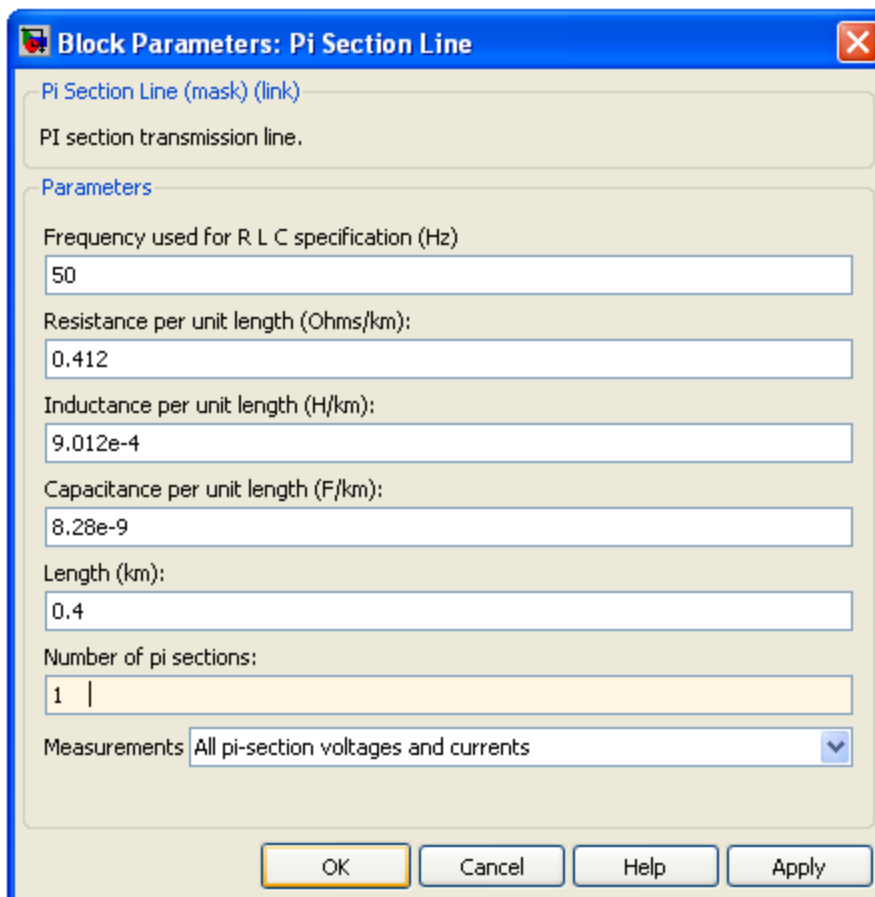


Рисунок 4.3 – Окно настроек параметров блока **Pi Section Line**

Параметры блока ***Pi Section Line***

Frequency used for R L C specification (Hz) – [Частота, используемая для вычисления параметров линии, (Гц)];

Resistance per unit length (Ohm/km) – [Сопротивление линии на 1 км длины (Ом/км)];

Inductance per unit length (H/km) – [Индуктивность линии на 1 км длины (Гн/км)];

Capacitance per unit length (F/km) – [Емкость линии на 1 км длины (Ф/км)];

Length (km) – [Длина линии (км)];

Number of pi sections – [Число π секций. Минимальное значение – 1.];

Measurements – [Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

None – нет переменных для измерения;

Input and output voltages – выбраны входные и выходные напряжения;

Input and output currents – выбраны входные и выходные токи;

All voltages and currents – выбраны все напряжения и токи.

Для просмотра выбранных величин при моделировании в модель можно добавить блок **Multimeter** (мультиметр). В окне **Available Measurement** (доступные измерения) блока **Multimeter**, измерение будет идентифицировано меткой, сопровождаемой именем блока:

Измерение	Метка
Напряжение на передающей стороне (вход блока)	– Us
Напряжение получающей стороны (выход блока)	– Ur
Ток на передающей стороне (вход блока)	– Is
Ток получающей стороны (выход блока)	– Ir

Практическая часть

Ход работы:

Для схемы сети, изображенной на рисунке 4.4, определить параметры для создания модели в программе MATLAB. Варианты исходных параметров сети принять по таблице 4.3. Схема состоит из источника питания (ИП), одноцепной ЛЭП длиной L , силового трансформатора номинальной мощностью $S_{нт}$, номинальным напряжением обмоток U_1 и U_2 .

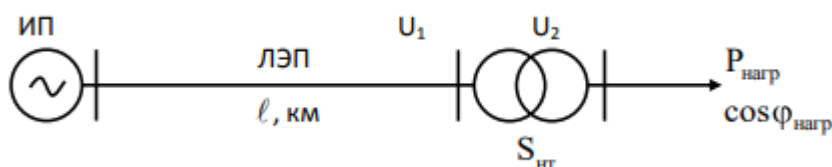


Рисунок 4.4 – Схема сети электроснабжения.

Таблица 4.3 – Варианты индивидуальных заданий

№ пп	ЛЭП		Трансформатор			Нагрузка	
	Марка провода	ℓ , км	$S_{\text{шт}}$, кВА	U_1 , кВ	U_2 , кВ	$P_{\text{нагр}}$, кВт	$\cos\varphi_{\text{нагр}}$
1	АС-70	35	2500	110	10	1000	0,7
2	АС-95	40	6300	110	10	4000	0,8
3	АС-120	30	10000	110	10	7500	0,82
5	АС-150	20	16000	110	10	10000	0,8
6	АС-70	25	630	35	10	400	0,7
7	АС-70	20	1000	35	10	650	0,78
8	АС-70	35	1600	35	10	1200	0,9
9	АС-70	20	2500	35	10	1600	0,7
10	АС-95	22	4000	35	10	3000	0,8
11	АС-120	28	6300	35	10	5000	0,82
12	АС-95	32	160	35	0,4	110	0,8
13	АС-70	29	250	35	0,4	200	0,7
14	АС-95	37	400	35	0,4	330	0,78
15	АС-70	34	630	35	0,4	520	0,9
16	СИП-3-50	10	100	10	0,4	80	0,82
17	АС-70	12	160	10	0,4	120	0,8
18	СИП-3-70	9	250	10	0,4	190	0,7
19	АС-70	7	400	10	0,4	310	0,78
20	СИП-3-50	10	630	10	0,4	540	0,9

1. Запустить среду моделирования MATLAB. Запустить пакет Simulink
2. Создать новую модель согласно заданию (см. лаб. раб. № 1).
3. Добавить в схему для моделирования измерительные модули для измерения активной и реактивной мощности между всеми элементами цепи.
4. Произвести расчет и параметров моделирования ЛЭП согласно варианту.
5. Настроить параметры «Three-Phase PI Section Line» по результатам расчета.
6. Настроить параметры «Three-Phase Source» согласно варианту.
7. Настроить параметры «Three Phase Series RLC Load» согласно варианту.
8. Сохранить модель для дальнейшей работы. Оформить отчет.

Оформление и содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Схема для моделирования.
3. Исходные данные.
4. Схема для моделирования в MATLAB.
5. Параметры настройки блока «Three-Phase PI Section Line» с расчетом необходимых параметров.
6. Параметры настройки блока «Three-Phase Source» с расчетом необходимых параметров.

7. Параметры настройки блока «Three Phase Series RLC Load» с расчетом необходимых параметров.

Контрольные вопросы:

1. Что такое линия электропередач?
2. Какие параметры характеризуют линию электропередач?
3. Какие схемы замещения линий электропередач существуют?
4. Как определяются параметры модели линии электропередач?
4. Как определяются параметры модели остальных блоков?
5. Какие особенности модели линии электропередач MATLAB?

Лабораторная работа 5

Расчет параметров для моделирования в программе MATLAB трехфазного двухобмоточного трансформатора по каталожным данным

Цель работы: изучить принцип действия и устройство электронного осциллографа, освоить методику измерений с помощью осциллографа, измерить параметры неизвестных электрических сигналов (амплитудное напряжение, длительность импульса, частоту).

Теоретические сведения

Схема замещения трансформаторов и определение ее параметров

При моделировании трансформаторы вводятся в модель схемой замещения. При этом электромагнитные (трансформаторные), связи заменяются электрическими. В программе MATLAB для моделирования трансформатора применяется именно эта схема, поэтому рассмотрим ее более подробно.

Схема замещения трансформатора, так же как и линии, имеет продольные и поперечные элементы.

Продольные элементы представлены активными и индуктивными сопротивлениями первичной (R_1 , X_1) и вторичной (R_2 , X_2) обмоток.

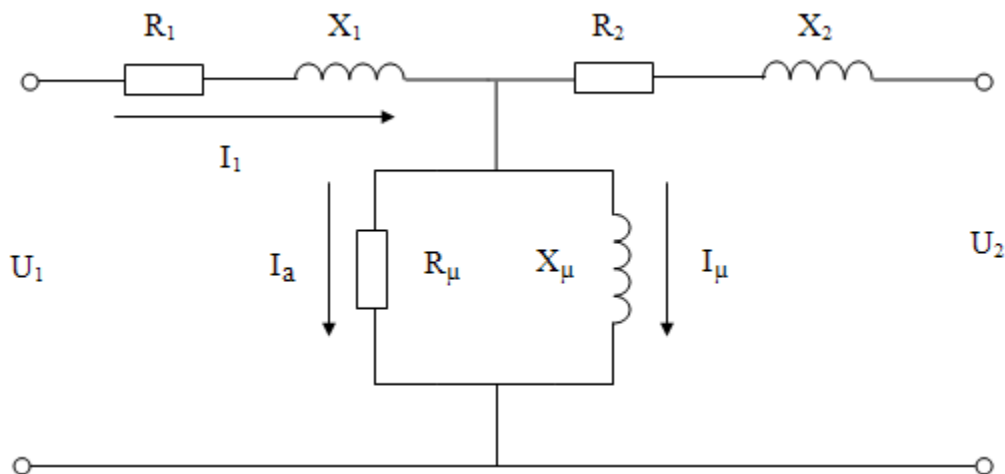


Рисунок 5.1 – Т-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора

Поперечная ветвь (ветвь намагничивания трансформатора) представлена в виде активным (R_μ) и индуктивным (X_μ) сопротивлениями. Два последних параметра определяют активную I_a и реактивную I_μ , составляющие тока намагничивания трансформатора I_μ . Активная составляющая тока обусловлена потерями мощности в стали трансформатора, реактивная определяет намагничивающий поток взаимоиндукции обмоток трансформатора.

Параметры трансформаторов согласно последней версии программы MATLAB можно задавать в именованных или в относительных единицах.

Для определения параметров трансформаторов по каталожным данным наших заводов-изготовителей, перечень которых приведен в таблице 5.1. Расчетные выражения для моделирования трансформаторов в программе MATLAB приведены в таблице 5.2. Здесь в качестве U_6 должно приниматься номинальное напряжение обмотки трансформатора, к напряжению которой приводятся все сопротивления. Чаще всего при моделировании электрических сетей за базисное напряжение принимают напряжение той обмотки, которая непосредственно присоединена к линии. Значения сопротивлений, приведенные к напряжению высшей обмотки, будут в $(U_{вн}/U_{нн})$ в 2 раза большими, чем если бы параметры схемы замещения были приведены к обмотке низкого напряжения.

Таблица 5.1 – Параметры трехфазного двухобмоточного трансформатора, необходимые для моделирования в программе MATLAB (по каталожным данным отечественных изготовителей)

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Число фаз	m	3	-
Номинальная мощность трансформатора	$S_{нт}$	63	кВА
Номинальная частота сети	f_n	50	Гц
Напряжение короткого замыкания	$U_{к\%}$	4,5	%
Потери короткого замыкания	$\Delta P_{кз}$	1,28	кВт
Потери холостого хода	ΔP_x	0,24	кВт
Ток холостого хода	$I_{х\%}$	2,8	%
Схема соединения обмоток	-	Y/Y _н	-

Необходимо отметить, что активные и индуктивные сопротивления обмоток в отличие от программы MATLAB (см. табл. 5.1) определены по данным параметров из опыта короткого замыкания трансформатора. При этом использовано общепринятое в электрических машинах допущение, что в режиме короткого замыкания потерями в цепи намагничивания трансформатора можно пренебречь.

Таблица 5.2 – Расчетные выражения для определения приведенных значений параметров двухобмоточных трансформаторов по каталожным данным отечественных производителей

Параметр трансформатора	Именованные единицы		Относительные единицы, о.е.
	Формула	Размерность	
1	2	3	4
Активное сопротивление обмоток	$R_{16} = R_{26} = \frac{\Delta P_{кз} U_6^2}{2 \cdot S_{нт}^2}$	Ом	$R_{1*} = R_{2*} = \frac{\Delta P_{кз}}{2 \cdot S_{нт}}$

Окончание таблицы 5.2

1	2	3	4
Полное сопротивление обмоток	$Z_{16} = Z_{26} = \frac{U_{к\%}}{100} \frac{U_6^2}{2 \cdot S_{\text{HT}}}$	Ом	$Z_{1*} = Z_{2*} = \frac{U_{к\%}}{200}$
Индуктивное сопротивление обмоток	$X_{16} = X_{26} = \sqrt{Z_{16}^2 - R_{16}^2}$	Ом	$X_{1*} = X_{2*} = \sqrt{Z_{1*}^2 - R_{1*}^2}$
Индуктивность обмоток	$L_{16} = L_{26} = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f}$	Гн	$L_{1*} = L_{2*} = X_{1*}$
Полные потери мощности в режиме холостого хода трансформатора	$\Delta S_x = \frac{I_{x\%}}{100} \cdot S_{\text{HT}}$	кВА	$\Delta S_{x*} = \frac{I_{x\%}}{100}$
Намагничивающая мощность трансформатора	$\Delta Q_x = \sqrt{\Delta S_x^2 - \Delta P_x^2}$	квар	$\Delta Q_{x*} = \sqrt{\Delta S_{x*}^2 - \Delta P_{x*}^2}$
Активное сопротивление цепи намагничивания	$R_\mu = \frac{U_6^2}{\Delta P_{xx}}$	Ом	$R_{\mu*} = \frac{S_{\text{HT}}}{\Delta P_{xx}}$
Индуктивное сопротивление цепи намагничивания	$X_\mu = \frac{U_6^2}{\Delta Q_x}$	Ом	$X_{\mu*} = \frac{1}{\Delta Q_{x*}}$
Индуктивность цепи намагничивания	$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f}$	Гн	$L_{\mu*} = X_{\mu*}$

Если при моделировании режимов необходим более точный учет параметров цепи намагничивания трансформатора, их определяют на основе реальной конструкции его магнитной цепи и расположения обмоток.

Моделирование трансформатора блоком *Tree-Phase Transformer (Two Windings)*

Блок настроек силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом насыщения стали сердечника приведен на рисунках 5.2, 5.3.

Вкладка **Configuration** приведена на рисунке 5.2.

Winding 1 (ABC) connection – [Схема соединения первичной обмотки].

Значение параметра выбирается из списка:

- **Y** – звезда,
- **Yn** – звезда с нейтралью,
- **Yg** – звезда с заземленной нейтралью,
- **Delta (D1)** – треугольник первой группы (сдвиг напряжений на 30 эл. градусов в сторону отставания по сравнению с соединением в звезду);
- **Delta (D11)** – треугольник одиннадцатой группы (сдвиг напряжений на 30 эл. градусов в сторону опережения по сравнению с соединением в звезду).

Winding 2 (abc-2) connection [Схема соединения вторичной обмотки] – значение параметра выбирается из списка:

- **Y** – звезда,
- **Yn** – звезда с нейтралью,
- **Yg** – звезда с заземленной нейтралью,
- **Delta(D1)** – треугольник первой группы,
- **Delta(D11)** – треугольник одиннадцатой группы.

Saturable core – [Насыщающийся сердечник]. При установленном флажке используется нелинейная модель трансформатора;

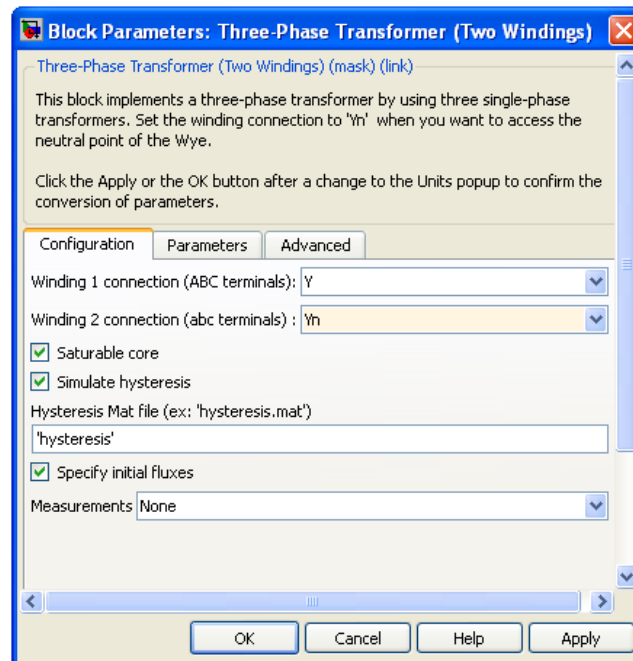


Рисунок 5.2 – Окно настроек вкладки **Configuration** блока **Tree-Phase Transformer (Two Windings)**

Simulate hysteresis – [Моделировать гистерезис]. При установленном флажке в характеристике намагничивания учитывается гистерезис;

Hysteresis Mat file – [Имя файла данных, содержащего гистерезисную характеристику]. Файл данных может быть создан с помощью блока **Powergui**. Параметр доступен при установленном флажке **Simulate hysteresis**;

Specify initial fluxes [phi0A, phi0B, phi0C] – [Начальные потоки для фаз А В С]. Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок **Saturable core** установлен);

Measurements – [Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** – нет переменных для измерения,
- **Winding voltages** – напряжения обмоток,
- **Winding currents** – токи обмоток,
- **Flux and excitation current (Imag_IRm)** – поток и ток холостого хода,
- **Flux and magnetization current (Imag)** – поток и ток намагничивания,
- **All Measurements (V, I, Flux)** – все напряжения, токи и поток.

Вкладка **Parameters** приведена на рисунке 5.3.

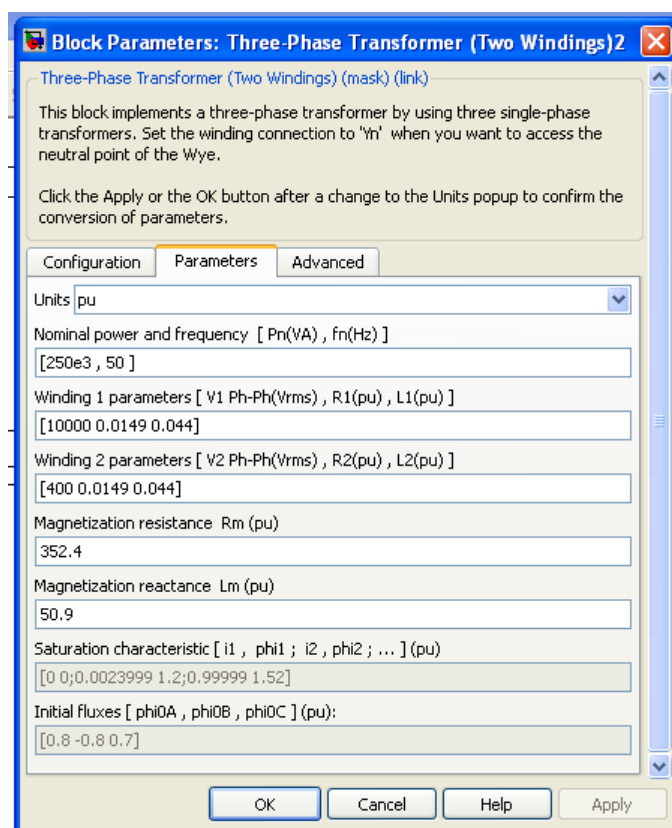


Рисунок 5.3 – Окно настроек параметров блока **Tree-Phase Transformer (Two Windings)**

Параметры блока:

Units – [Единицы измерения]. Выбираются из выпадающего списка:

- **pu** – параметры задаются в о.е.;
- **SI** – параметры задаются в именованных единицах (в системе Си).

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] – [Номинальная мощность (ВА) и частота (Гц) трансформатора];

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(V), R1(pu), L1(pu)] – [Параметры первой обмотки]. Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.);

Winding 2 parameters [U2 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)] – [Параметры второй обмотки]. Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.);

Magnetization resistance Rm (pu) – [Сопротивление цепи намагничивания (о.е.)];

Magnetization reactance Lm (pu) – [Индуктивность цепи намагничивания (о.е.)]. Параметр доступен при моделировании линейного трансформатора (флажок **Saturable core** не установлен);

Saturation characteristic (pu) [i1, phi1; i2, phi2 ;...] – [Характеристика насыщения сердечника]. Значения намагничивающего тока и магнитного пото-

ка задаются в относительных единицах. Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок **Saturable core** установлен);

Initial fluxes [phi0A, phi0B, phi0C] – [Начальные потоки для фаз А В С]. Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок **Saturable core** на вкладке **Configuration** установлен);

Пример определения параметров трансформатора для моделирования в программе MATLAB.

Определить параметры Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора ТМ номинальной мощностью 63 кВА, напряжением 10/0,4 кВ для моделирования в программе MATLAB по каталожным данным отечественных заводов-изготовителей. Каталожные данные приведены в таблице 5.1. Расчет выполнить методом именованных и относительных единиц.

Решение

Расчет параметров выполним по формулам, приведенным в таблице 5.2. За базисную ступень напряжения примем напряжение первичной обмотки трансформатора $U_b = 10$ кВ.

Учтем, что сопротивления и индуктивности первичной и вторичной обмоток при этом получаются приведенными к одной базисной ступени напряжения, а для задания параметров трансформаторов в именованных единицах в программе MATLAB активное сопротивление и индуктивность каждой обмотки необходимо привести к своему номинальному напряжению. Для этого полученные по формулам таблицы 5.2 активное сопротивление ($R_{2б}$) и индуктивность ($L_{2б}$), обмотки напряжением, отличным от базисного напряжения, необходимо умножить на $K_T^2 = (U_n / U_b)^2$.

Результаты расчета параметров приведены в таблице 5.3.

Окно настроек параметров блока для рассматриваемого примера приведено на рисунке 5.4. Здесь же показан фрагмент модели в программе MATLAB опыта холостого хода трансформатора с рассчитанными в примере параметрами. Как видно из показаний приборов (Display A1), потери активной мощности в режиме холостого хода трансформатора составляют $\Delta P_x \text{ мод} = 236,88$ Вт, а реактивной мощности $\Delta Q_x \text{ мод} = 1747,47$ вар.

При этом расхождения в величинах потерь мощности, полученным на виртуальной модели и заданных заводом-изготовителем, составляют

по активной мощности:

$(\Delta P_x - \Delta P_x \text{ мод}) / \Delta P_x \cdot 100 = (240 - 236,88) / 240 \cdot 100 = 1,34 \%$ от заданного заводом-производителем значения, что вполне допустимо;

по реактивной мощности потери практически совпадают $1748 \approx 1747,47$.

Таблица 5.3 – Расчет параметров Т-образной схемы замещения трансформатора ТМ-63/10 для моделирования в программе MATLAB

Параметр трансформатора	Именованные единицы	Относительные единицы, о.е.
Активное сопротивление обмоток	$R_{1\sigma} = R_{2\sigma} = \frac{1,28 \cdot 10^3 \cdot (10 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot (63 \cdot 10^3)^2} = 16,1$ Ом $R_{2H} = 16,1 \cdot (0,4/10)^2 = 0,02576$ Ом	$R_{1*} = R_{2*} = \frac{1,28 \cdot 10^3}{2 \cdot 63 \cdot 10^3} = 0,0102$
Полное сопротивление обмоток	$Z_{1\sigma} = Z_{2\sigma} = \frac{4,5 \cdot (10 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 2 \cdot 63 \cdot 10^3} = 35,71$ Ом	$Z_{1*} = Z_{2*} = \frac{4,5}{200} = 0,0225$
Индуктивное сопротивление обмоток	$X_{1\sigma} = X_{2\sigma} = \sqrt{35,71^2 + 16,1^2} = 28,57$ Ом	$X_{1*} = X_{2*} = \sqrt{0,0225^2 + 0,0102^2} = 0,0201$
Индуктивность сопротивления обмоток	$L_{1\sigma} = L_{2\sigma} = \frac{28,57}{314} = 0,091$ Гн $L_{2H} = 0,091 \cdot (0,4/10)^2 = 14,6 \cdot 10^{-5}$ Гн	$L_{1*} = L_{2*} = 0,0201$
Полные потери мощности в режиме холостого хода трансформатора	$\Delta S_X = \frac{2,8}{100} \cdot 63000 = 1,764$ кВА	$\Delta S_{X*} = \frac{2,8}{100} = 0,028$
Намагничивающая мощность трансформатора	$\Delta Q_X = \sqrt{1764^2 - 240^2} = 1,748$ квар	$\Delta Q_{X*} = \sqrt{0,028^2 - (\frac{0,24}{63})^2} = 0,02774$
Активное сопротивление цепи намагничивания	$R_{\mu} = \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{0,24 \cdot 10^3} = 4,167 \cdot 10^5$ Ом	$R_{\mu*} = \frac{63 \cdot 10^3}{0,24 \cdot 10^3} = 262,5$
Индуктивное сопротивление цепи намагничивания	$X_{\mu} = \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{1,748 \cdot 10^3} = 572208$ Ом	$X_{\mu*} = \frac{1}{0,02774} = 36,05$
Индуктивность цепи намагничивания	$L_{\mu} = \frac{572208}{314} = 182,2$	$L_{\mu*} = 36,05$

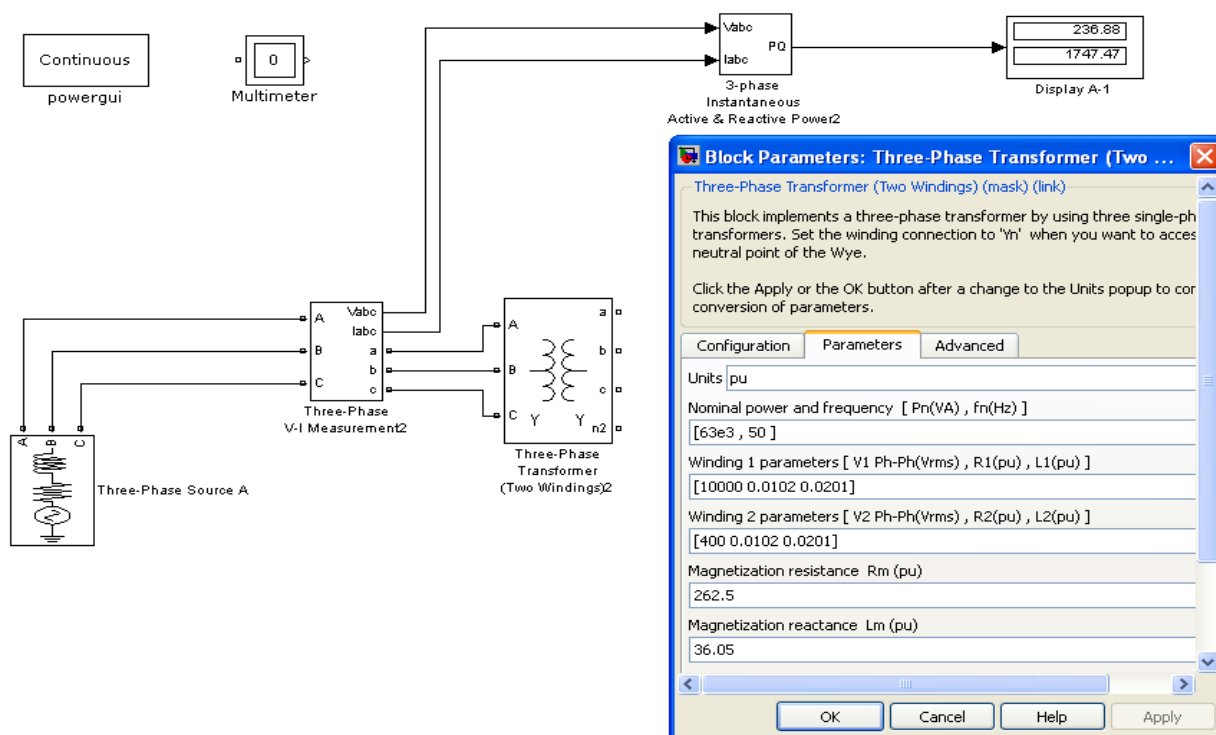


Рисунок 5.4 – Фрагмент Simulink-модели опыта холостого хода двухобмоточного трансформатора ТМ-63/10 с окном настроек параметров блока **Tree-Phase Transformer (Two Windings)**.

Практическая часть

Ход работы:

Для схемы сети, из лабораторной работы 4 определить параметры Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора для создания модели в программе MATLAB. Варианты исходных параметров принять по таблице 4.3. колонка «трансформатор» номинальной мощностью S_{HT} , номинальным напряжением обмоток U_1 и U_2 . Остальные параметры принять по таблице 5.4. на основании номинальной мощностью S_{HT}

Таблица 5.4 – Варианты индивидуальных заданий

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Число фаз	m	3	-
Номинальная мощность трансформатора	S_{HT}	S_{HT}	кВА
Номинальная частота сети	f_H	50	Гц
Напряжение короткого замыкания	$U_{K\%}$	4,5	%
Потери короткого замыкания	ΔP_{K3}	$0,02 * S_{HT}$	кВт
Потери холостого хода	ΔP_X	$0,004 * S_{HT}$	кВт
Ток холостого хода	$I_{X\%}$	2,8	%
Схема соединения обмоток	-	Y/Y _H	-

1. Определить параметры Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора согласно варианту.
2. Запустить среду моделирования MATLAB. Запустить пакет Simulink
3. Открыть проект, созданный в лабораторной работе 4.
4. Настроить параметры «Tree-Phase Transformer (Two Windings)» по результатам расчета.
5. Произвести опыт холостого хода двухобмоточного трансформатора.
6. Сделать вывод об расхождении в величинах потерь мощности, полученных на виртуальной модели и заданных в задании.
8. Сохранить модель для дальнейшей работы в последующих лабораторных работах.

Оформление и содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Описание используемого оборудования.
3. Методика проведения эксперимента.
4. Полученные результаты.
5. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Назначение осциллографа и его основные блоки.
2. Электронная пушка. Ускорение и фокусировка электронного луча.
3. Коэффициент отклонения и коэффициент развертки.
4. Назначение и работа блока синхронизации.
5. Порядок измерения параметров сигнала, представленного на экране осциллографа.

Лабораторная работа 6

Моделирование сети с помощью стандартных блоков программы MATLAB

Цель работы: изучить измерительные приборы для контроля параметров системы электроснабжения при моделировании в MATLAB.

Теоретические сведения

При моделировании системы электроснабжения потребители электроэнергии рассматриваются в качестве нагрузок. Электрической нагрузкой в соответствии с ГОСТ 19431-84 называется мощность, потребляемая электроустановкой в установленный момент времени. На переменном токе различают полную, активную и реактивную нагрузки. Часто понятие нагрузки распространяется также на электрический ток (токовая нагрузка), а иногда и на электрическое сопротивление (например, в виде сопротивления задается допустимая нагрузка вторичных цепей трансформаторов тока).

Нагрузка линий задается в следующем виде: активной мощностью P , реактивной мощностью Q , полной мощностью S или током I .

Расчетные активная P_p , реактивная Q_p и полная S_p мощности определяются по выражениям, известным из курса ТОЭ:

$$P_p = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_p \cdot \cos\varphi_p \quad (6.1)$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg}\varphi_p \quad (6.2)$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (6.3)$$

Из-за сложности определения расчетных $\cos\varphi_p$ и $\operatorname{tg}\varphi_p$ допускается их принимать равными средним значениям $\cos\varphi_p = \cos\varphi_{\text{ср}}$, $\operatorname{tg}\varphi_p = \operatorname{tg}\varphi_{\text{ср}}$.

Практическая часть

Ход работы:

1. Запустить среду моделирования MATLAB. Запустить пакет Simulink.
2. Открыть проект, созданный в лабораторной работе 5.
3. Добавить в схему для моделирования измерительные модули для измерения активной и реактивной мощности между всеми элементами цепи.
4. Изучить библиотечные блоки, расположенные в выпадающем списке, в разделе «Specialized Power System» в подразделе «Sensors and Measurements» и «Simulink» в подразделе «Sinks».

5. Добавить в схему для моделирования между всеми элементами цепи измерительные модули для измерения действующего напряжения U , действующего тока I и коэффициента мощности $\cos\varphi$. (В случае невозможности найти блоки, измеряющие эти величины на прямую, добавить измерительные блоки, из показаний которых их можно рассчитать.)

6. Произвести моделирование. (Рекомендуемый метод **ode23s** для скорейшего получения результата).

7. Определить параметры и занести их в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений

Параметр	Единицы измерения	На выходе генератора	На выходе ЛЭП	На выходе трансформатора
P	кВт			
Q	кВАр			
S	кВА			
U	кВ			
I	кА			
$\cos\varphi$	-			

8. Определить на каком участке цепи, какая мощность преобладает (активная или реактивная). На каждом участке цепи определить реактивная мощность носит емкостный или индуктивный характер.

9. Сделайте вывод, на каком элементе цепи электроснабжения происходят наибольшие потери мощности и почему.

Оформление и содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Схема моделирования системы электроснабжения в MATLAB с показаниями измерительных приборов.
3. Используемые формулы для расчета параметров цепи электроснабжения.
4. Полученные результаты.
5. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что такое активная P , реактивная Q и полная S мощности?
2. Что такое коэффициент мощности $\cos\varphi$?
3. Как измерить коэффициента мощности $\cos\varphi$?

Лабораторная работа 7

Исследование на созданной модели сети влияния коэффициента загрузки трансформатора на потери мощности в сети

Цель работы: изучить влияние коэффициента загрузки трансформатора на потери мощности в сети.

Теоретические сведения

Моделирование нагрузки схемами замещения

В некоторых задачах нагрузки принято представлять схемами замещения. При этом нагрузку представляют последовательно (рис. 7.1 а) или параллельно (рис. 7.1 б) соединенными неизменными активными и реактивными сопротивлениями. Сопротивления определяются таким образом, чтобы при номинальном напряжении мощность нагрузки соответствовала заданной мощности.

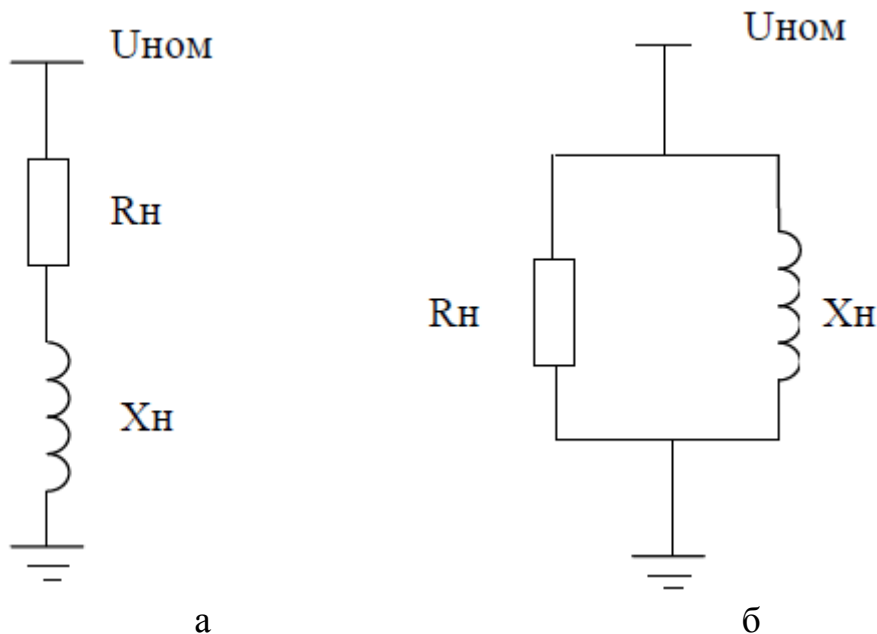


Рисунок 7.1 – Представление нагрузки неизменными активными и реактивными сопротивлениями при их
а – последовательном; б – параллельном соединении

Тогда при последовательном соединении значение сопротивлений:

$$R_H = \frac{U_{НОМ}^2}{S_H} \cos \varphi \quad (7.1)$$

$$X_H = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_H} \sin \varphi \quad (7.2)$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + Q_H^2} \quad (7.3)$$

$$\cos \varphi = P_H / S_H \quad (7.4)$$

$$\sin \varphi = Q_H / S_H \quad (7.5)$$

$$R_H = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_H} \quad (7.6)$$

При параллельном соединении:

$$X_H = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_H} \quad (7.7)$$

При представлении нагрузки неизменными сопротивлениями ее мощность меняется пропорционально квадрату приложенного напряжения. При представлении нагрузок схемами замещения имеет место совпадение характеристик реактивной мощности в значительно большем диапазоне изменения напряжения, чем при учете нагрузки постоянной мощностью.

Моделирование нагрузки в программе MATLAB приложении Simulink

В типовых блоках программы MATLAB для моделирования электрических нагрузок применен метод представления их с помощью схем замещения.

В состав библиотеки Elements пакета SimPowerSystems приложения Simulink входят последовательные и параллельные R, L, C составляющие и их трехфазные варианты.

В отличие от компонентов RLC цепей (**RLC Branch**) численные значения элементов модели нагрузки (**RLC Load**) задаются значениями активной (P) и реактивной (индуктивной – QL или емкостной – QC мощностей). При этом здесь также используется правило модификации, применяемое для R, L, C цепей: задавая для соответствующих параметров нулевые значения, можно моделировать чисто активную, индуктивную или емкостную нагрузку. При этом на модели автоматически происходит изменение внешнего вида пиктограммы. Пиктограммы однофазных нагрузок выглядят следующим образом:

Таблица 7.1 – Пиктограммы, название и назначение блоков для моделирования нагрузок

№	Пиктограмма	Название и назначение блока
1	 <p>Series RLC Load</p>	<p>Series RLC Load</p> <p>Последовательная RLC-нагрузка моделирует последовательное включение резистора, индуктивности и конденсатора. Параметры цепи задаются через мощности цепи при номинальном напряжений и частоте</p>
2	 <p>Parallel RLC Load</p>	<p>Parallel RLC Load</p> <p>Параллельная RLC-нагрузка моделирует параллельное включение резистора, индуктивности и конденсатора. Параметры цепи задаются через мощности цели при номинальном напряжении и частоте</p>
3	 <p>Three-Phase Series RLC Load</p>	<p>Three Phase Series RLC Load</p> <p>Трехфазная последовательная RLC-нагрузка моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех последовательных RLC-нагрузок. Схема соединения цепей: звезда и треугольник. Параметры цепи задаются через мощности фаз цепи при номинальном напряжении и частоте</p>
4	 <p>Three-Phase Parallel RLC Load</p>	<p>Three Phase Parallel RLC Load</p> <p>Трехфазная параллельная RLC-нагрузка моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех параллельных RLC-нагрузок. Схема соединения цепей: звезда и треугольник. Параметры цепи задаются через мощности фаз цепи при номинальном напряжении и частоте</p>

Параметры блока **Series RLC Load (блок № 1)**:

Nominal voltage Vn (Vrms) [Номинальное напряжение (В)] – значение действующего напряжения цепи, для которого определены мощности элементов];

Nominal frequency fn (Hz) [Номинальная частота (Гц)] – значение частоты, для которого определены мощности элементов;

Active power P (W) [Активная мощность (Вт)];

Inductive reactive power QL (positive var) [Реактивная мощность индуктивности (вар)] – потребляемая индуктивностью реактивная мощность;

Capacitive reactive power QC (negative var) [Реактивная мощность емкости (вар)] – отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака);

Set the initial capacitor voltage [Установить начальное напряжение на емкости];

Capacitor initial voltage (V) – начальное емкостное напряжение (В).

Set the initial inductor current [Установить начальный ток индуктивности];

Inductor initial current (A) – начальный индуктивный ток (А);

Measurements [Измеряемые переменные] – параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок **Multimeter** переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- **None** – нет переменных для отображения,
- **Branch voltage Voltage** – напряжение на зажимах цепи,
- **Branch current** – ток цепи,
- **Branch voltage and current** – напряжение и ток цепи.

Отображаемым сигналам в блоке **Multimeter** присваиваются метки:

- **Ib** – ток цепи,
- **Ub** – напряжение цепи.

Величины мощностей могут быть определены по следующим выражениям:

$$P = R + \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2} \quad (7.8)$$

$$QL = \omega L + \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2} \quad (7.9)$$

$$QC = \frac{1}{\omega C} + \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2} \quad (7.10)$$

где P – активная мощность; Q_L – реактивная мощность индуктивности; Q_C – реактивная мощность емкости; ω – круговая частота напряжения; U – действующее значение напряжения.

Параметры блока **Parallel RLC Load (блоки № 2)** аналогичны параметрам блока **Series RLC Load**, но выражения для расчета мощностей будут другими:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (7.11)$$

$$QL = \frac{U^2}{\omega L} \quad (7.12)$$

$$QC = U^2 \omega C \quad (7.13)$$

Для моделирования трехфазной симметричной нагрузки с целью уменьшения громоздкости схемы в программе MATLAB разработаны блоки для моделирования трехфазных нагрузок, выполненные по принципу однофазных блоков (табл. 7.1, блоки № 3 и № 4). Это блоки: ***Three-Phase Series RLC Load*** и ***Three-Phase Parallel RLC Load***. Они применимы только для моделирования симметричных нагрузок, в них удобно вводить параметры нагрузки сразу для всех фаз. Если нагрузка трехфазной цепи несимметрична, следует использовать блоки однофазных нагрузок. В них параметры задаются отдельно для каждой фазы нагрузки.

Параметры блока ***Three-Phase Series RLC Load***:

Nominal phase-phase voltage Vn (Vrms) [Номинальное линейное напряжение (В)] – значение действующего линейного напряжения цепи, для которого определены мощности элементов;

Nominal frequency fn (Hz) [Номинальная частота (Гц)] – значение частоты, для которого определены мощности элементов;

Active power P (W) [Активная мощность на три фазы(Вт)];

Inductive reactive power QL (positive var) [Реактивная мощность индуктивности на три фазы (вар)] – потребляемая индуктивностью реактивная мощность;

Capacitive reactive power QC (negative var) [Реактивная мощность емкости на три фазы (вар)] – отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака).

Configuration [Конфигурация цепи] – параметр может принимать значения:

- **Y(grounded)** – звезда с заземленной нейтралью;
- **Y(floating)** – звезда с изолированной нейтралью;
- **Y(neutral)** – звезда с нейтралью, соединенной с внешним контактом блока;
- **Delta** – треугольник.

В соответствии с выбранным параметром изменяется и пиктограмма блока.

Параметры блока ***Three-Phase Parallel RLC Load*** полностью аналогичны параметрам блока ***Three-Phase Series RLC Load***.

Практическая часть

Ход работы:

1. Запустить среду моделирования MATLAB. Запустить пакет Simulink.
2. Открыть проект, созданный в лабораторной работе 6.
3. Произвести моделирование, меняя параметры нагрузки от 10 % до 110 %, заданной по заданию. (Рекомендуемый метод **ode23s** для скорейшего получения результата).
4. Определить параметры и занести их в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Результаты измерений

Нагрузка, %	P, Вт	Q _L , ВАр	P _{н.изм.} , Вт	Потери в ЛЭП, Вт	Потери в трансформаторе, Вт	Суммарные потери, Вт	Относительные потери, %
110							
100							
90							
80							
70							
60							
50							
40							
30							
20							
10							

5. Сделайте вывод, в каком диапазоне нагрузки целесообразней эксплуатировать систему электроснабжения.

Оформление и содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Схема моделирования системы электроснабжения при 60% нагрузке сети с показаниями измерительных приборов.
3. Используемые формулы для расчета.
4. Полученные результаты.
5. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что такое активная P, реактивная Q и полная S мощности?
2. Как представляется нагрузка при моделировании?
3. Как влияет коэффициент загрузки трансформатора на потери мощности в сети?

Лабораторная работа 8

Исследование влияния конденсаторной батареи на шинах нагрузки на величину потерь напряжения и потерь мощности в линии

Цель работы: исследовать влияние конденсаторной батареи на шинах нагрузки на величину потерь напряжения и потерь мощности в линии

Теоретические сведения

Причины целесообразности выполнения компенсации реактивной мощности на предприятиях

Загрузка системы электроснабжения определяется полной мощностью $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, активная составляющая которой является полезно потребленной и обратно к источнику питания не возвращается. Реактивная составляющая необходима для создания магнитных и электрических полей в элементах электрической сети. Практически она не потребляется, а перетекает от источника питания (генератора) к электроприемнику и обратно.

Передача значительного количества реактивной мощности по линиям и через трансформаторы сети электроснабжения не выгодна по следующим причинам:

1. Возникают дополнительные потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения, обусловленные загрузкой их реактивной мощностью.
2. Возникают дополнительные потери реактивной мощности.
3. Возникают дополнительные потери напряжения.
4. Загрузка реактивной мощностью линий электропередачи и трансформаторов уменьшает пропускную способность сетей электроснабжения, что в ряде случаев не позволяет использовать полную установленную мощность электрооборудования.
5. Загрузка реактивной мощностью трансформаторов снижает их коэффициент полезного действия.
6. Недоиспользование полезной мощности генераторов электростанций и увеличение удельного расхода топлива.

Существует два взаимодополняющих друг друга пути снижения реактивных нагрузок сетей и генераторов.

1. Установка на предприятии специальных компенсирующих устройств – искусственная компенсация.

В качестве собственных источников реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий используются:

- генераторы собственных электростанций и синхронные двигатели;

- воздушные и кабельные линии электрических сетей;
- дополнительно устанавливаемые компенсирующие устройства: синхронные компенсаторы, батареи конденсаторов высокого и низкого напряжения, вентильные установки со специальным регулированием.

2. Снижение реактивной мощности самих приемников электроэнергии – естественная компенсация.

К мероприятиям по естественной компенсации относятся:

- упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования и выравниванию графика нагрузки (равномерное размещение нагрузок по фазам, смещение времени обеденных перерывов, начала и окончания смены отдельных цехов и участков, перевод энергоемких крупных электроприемников на работу вне часов максимума энергосистемы, вывод в ремонт мощных электроприемников в часы максимума энергосистемы);
- создание рациональной схемы электроснабжения за счет уменьшения количества ступеней трансформации;
- замена электрооборудования старых конструкций на новое с меньшими потерями на перемагничивание;
- замена малозагруженных трансформаторов и двигателей меньшими по мощности или их полная загрузка;
- применение синхронных двигателей вместо асинхронных, когда это допустимо по условиям технологического процесса;
- ограничение продолжительности холостого хода двигателей и сварочных трансформаторов;
- сокращение длительности и рассредоточение во времени пуска крупных электроприемников;
- улучшение качества ремонта электродвигателей;
- отключение при малой нагрузке части силовых трансформаторов.

Практическая часть

Ход работы:

1. Запустить среду моделирования MATLAB. Запустить пакет Simulink.
2. Открыть проект, созданный в лабораторной работе 7.
3. На шинах нагрузки подключить конденсаторную батарею.
3. Произвести моделирование, меняя параметры емкости для трех случаев: «Перекомпенсация» ($Q_c = 2 \times Q_L$), «Полная компенсация» ($Q_c = Q_L$), «Недокомпенсация» ($Q_c = 0,5 \times Q_L$).

(Рекомендуемый метод **ode23s** для скорейшего получения результата).

4. Определить параметры и занести их в таблицу 8.1. и таблицу 8.2.

Таблица 8.1 – Результаты измерений потерь мощности

Qс, ВАр	P, Вт	Q _L , ВАр	P _{н.изм.} , Вт	Потери в ЛЭП, Вт	Потери в трансформаторе, Вт	Суммарные потери, Вт	Относительные потери, %
$0,5 \times Q_L$							
Q _L							
$2 \times Q_L$							

Таблица 8.2 – Результаты измерений потерь напряжения

Qс, ВАр	Напряжение на выходе генератора U _г , кВ	Напряжение на входе трансформатора U _т , кВ	Напряжение на нагрузке U _н , кВ
$0,5 \times Q_L$			
Q _L			
$2 \times Q_L$			

5. Оценить влияние реактивной мощности генерируемой батареей, на величину потерь напряжения и потерь мощности в линии.

6. Сделать вывод, что лучше «Перекомпенсация» или «Недокомпенсация». Обосновать.

Оформление и содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Схемы моделирования системы электроснабжения с показаниями измерительных приборов для 3-х случаев.
3. Используемые формулы для расчета.
4. Полученные результаты.
5. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что такое компенсации реактивной мощности?
2. Причины целесообразности выполнения компенсации реактивной мощности на предприятиях.
3. Способы компенсации реактивной мощности на предприятиях.

Лабораторная работа 9

Исследование влияния конденсаторной батареи при продольном включении в сеть на головном участке моделируемой сети с целью полной компенсации индуктивного сопротивления линии

Цель работы: исследовать влияние конденсаторной батареи при продольном включении в сеть на головном участке моделируемой сети с целью полной компенсации индуктивного сопротивления линии.

Теоретические сведения

Основное назначение поперечной компенсации – повышение коэффициента мощности.

Размещение конденсаторов в основном принято выполнять по принципу наибольшего снижения потерь мощности в электрических сетях. Немаловажное значение при этом имеет повышение уровня напряжения, сопровождающее установку конденсаторов. В ряде случаев размещение конденсаторов может быть подчинено именно этому условию.

Влияние поперечной компенсации сказывается не только на токовой нагрузке всех элементов системы электроснабжения, но и на потере напряжения в сети, на соотношении напряжений в начале и в конце электропередачи.

Особенности поперечной компенсации

Поперечная емкостная компенсация выполняется комплектными конденсаторными установками, которые устанавливаются в определенных местах схемы электроснабжения.

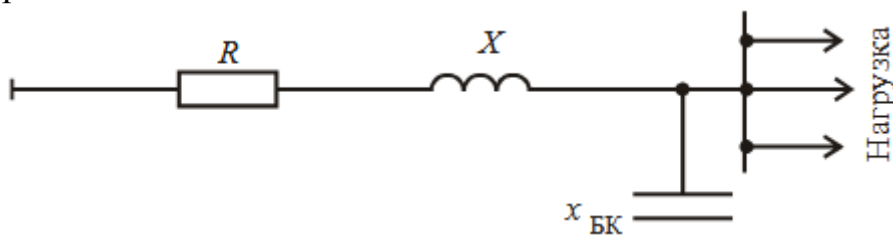


Рисунок 9.1. Схема включения емкости в нагрузочную цепь при поперечной компенсации

Мощность однофазного конденсатора при синусоидальной форме напряжения, приложенного к его зажимам, определяется по соотношению:

$$Q = \omega \cdot C \cdot U^2 \quad (9.1)$$

Мощность трехфазного конденсатора, соединенного треугольником, определяется по этой же формуле. В этом случае U – линейное напряжение, а

C – сумма емкостей всех трех фаз конденсатора. Мощность трехфазного конденсатора, соединенного звездой, при равенстве емкостей всех трех фаз определяется по соотношению:

$$Q = \frac{1}{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U^2 \quad (9.2)$$

где C – сумма емкостей всех трех фаз.

При принятых обозначениях коэффициент реактивной мощности до компенсации $\operatorname{tg} \phi_1 = Q / P$, а после компенсации $\operatorname{tg} \phi_2 = (Q - Q_{\text{БК}}) / P$.

Так как $\operatorname{tg} \phi_2 < \operatorname{tg} \phi_1$, то $\cos \phi_2 > \cos \phi_1$.

Таким образом, применение поперечной компенсации позволяет уменьшить потери мощности при сохранении величины передаваемой мощности или в пределах тех же потерь, увеличивая пропускную способность сети, повысить передаваемую мощность.

Практическая часть

Ход работы:

1. Запустить среду моделирования MATLAB. Запустить пакет Simulink.
 2. Открыть проект, созданный в лабораторной работе 8.
 3. На шинах линии электропередач подключить конденсаторную батарею.
 4. Произвести моделирование, меняя параметры емкости добиться полной компенсации индуктивной составляющей линии электропередач Q_L .
 5. Произвести моделирование для трех случаев: «Перекомпенсация» ($Q_c = 2 \times Q_L$), «Полная компенсация» ($Q_c = Q_L$), «Недокомпенсация» ($Q_c = 0,5 \times Q_L$).
- (Рекомендуемый метод **ode23s** для скорейшего получения результата)
6. Определить параметры и занести их в таблицу 9.1. и таблицу 9.2.

Таблица 9.1 – Результаты измерений потерь мощности

Q_c , ВАр	P , Вт	Q_L , ВАр	$P_{\text{н.изм.}}$, Вт	Потери в ЛЭП, Вт	Потери в трансформаторе, Вт	Суммарные потери, Вт	Относительные потери, %
$0,5 \times Q_L$							
Q_L							
$2 \times Q_L$							

Таблица 9.2 – Результаты измерений потерь напряжения

Q_c , ВАр	Напряжение на выходе генератора U_g , кВ	Напряжение на входе трансформатора U_t , кВ	Напряжение на нагрузке U_n , кВ
$0,5 \times Q_L$			
Q_L			
$2 \times Q_L$			

7. Оценить влияние реактивной мощности генерируемой батареей, на величину потерь напряжения и потерь мощности в линии.

8. Сделать вывод, что лучше «Перекомпенсация» или «Недокомпенсация». Обосновать.

Оформление и содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Схемы моделирования системы электроснабжения с показаниями измерительных приборов для 3-х случаев.
3. Используемые формулы для расчета.
4. Полученные результаты.
5. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что такое поперечная компенсация?
2. Для чего применяется поперечная компенсация?
3. Каким образом, применение поперечной компенсации позволяет уменьшить потери мощности при сохранении величины передаваемой мощности?

Список используемых источников

1. Костюченко, Л. П. Имитационное моделирование систем электро-снабжения в программе MATLAB: учеб. пособие / Л. П. Костюченко; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2012. – 215 с.
2. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учеб. пособие / А.В. Кабышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.
3. Кияев, В. И. Информационные технологии в управлении предприятием : краткий учебный курс / В. И. Кияев, О. Н. Граничин. – Москва : ИНТУИТ, 2016. – 361 с.
4. Липунцов, Ю. П. Управление процессами. Методы управления предприятием с использованием информационных технологий / Липунцов Ю. П., – 2-е изд., (эл.) – М. : ДМК Пресс, 2018. – 226 с.

Учебное издание

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания
по выполнению лабораторных работ

Составители:
Леонов Владимир Викторович
Клименкова Светлана Александровна
Тёмкин Даниил Александрович

Редактор *Р. А. Никифорова*
Корректор *А. С. Прокопюк*
Компьютерная верстка *В. В. Леонов*

Подписано к печати 01.10.2025. Усл. печ. листов 3,3.
Уч.-изд. листов 4,3. Заказ № 196.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.