

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Российский государственный профессионально-педагогический  
университет»

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАКЕТА MATLAB ПРИ  
ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

Выпускная квалификационная работа бакалавра  
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение  
(по отраслям)

Идентификационный код ВКР: 327

Екатеринбург 2016

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Российский государственный профессионально-педагогический  
университет»

Институт инженерно-педагогического образования

Кафедра электрооборудования и энергоснабжения

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ:

Заведующая кафедрой ЭС

\_\_\_\_\_ А.О. Прокубовская

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАКЕТА МАТЛАВ ПРИ  
ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

Выпускная квалификационная работа бакалавра  
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение  
(по отраслям)  
профиля подготовки «Энергетика»  
специализации «Электропривод и автоматика»

Идентификационный код ВКР: 327

Исполнитель:

студент группы ЭП-401

Е.М. Черепанов

Руководитель

А.А. Емельянов

Нормоконтроль

Н.В. Шайхадарова

Екатеринбург 2016

## **РЕФЕРАТ**

Выпускная квалификационная работа выполнена на 85 страницах, содержит 46 рисунков, 5 таблиц, 20 источников литературы.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОПРИВОД, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, MATLAB, SIMULINK, УЧЕБНЫЙ СТЕНД “УИЛС”.

Объектом исследования являются электромеханические переходные процессы.

Предметом исследования является математическое моделирование систем для исследования электромеханических переходных процессов

Цель работы - выполнить разработку системы для исследования электромеханических переходных процессов.

В процессе работы проводилось экспериментальное исследование пакета MATLAB.

Были разработаны лабораторные работы для демонстрации возможностей MATLAB при исследовании электромеханических переходных процессов

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПАКЕТ MATLAB.....	9
1.1 Краткая характеристика математического пакета MATLAB.....	9
1.2 Краткая характеристика математического пакета Simulink.....	13
1.3 Краткий обзор расширений Toolbox, включаемых в пакет MATLAB.....	17
1.4 Обзор литературных источников по применению математического пакета Matlab+Simulink в научной и образовательной деятельности .	20
2. ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА SIMPOWERSYSTEM ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	29
2.1 Лабораторный практикум для исследования переходных процессов в энергетических системах.....	29
2.2 Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях.....	30
2.3 Исследование переходных процессов в параллельном LC контуре .....	32
2.4 Исследование переходных процессов в линиях электропередачи с распределенными параметрами.....	36
2.5 Исследование переходных процессов в линейных трансформаторах.....	41
2.6 Исследование переходных процессов в трехфазных асинхронных двигателях.....	44
2.7 Исследование переходных процессов в двигателе постоянного тока .....	51
3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН .....	56

3.1 Сравнение различных технологий проведения лабораторных работ: метода натурального эксперимента и виртуального лабораторного практикума .....	56
3.2 Применение программного пакета MatlabSimulink в процессе обучения студентов электротехнических специальностей .....	60
3.3 Возможность использования компьютерных виртуальных лабораторий для проведения лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ).....	61
3.4 Сопоставление элементной базы стенда УИЛС и виртуальной лаборатории с использованием математического пакета MATLAB ...	66
4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ .....	77
4.1 Цель выпускной квалификационной работы .....	77
4.2 Техническое описание разрабатываемого мероприятия .....	77
4.3 Экономический расчет .....	77
4.4 Выводы.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	82
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	85
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	87
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	90

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современные социальные и экономические условия предъявляют высокие требования к качеству выпускаемых вузами специалистов, нацеливают на формирование в студентах личности, характеризующейся не репродуктивным, а творческим типом мышления, инициативой и самостоятельностью в принятии профессиональных решений. Эти требования требуют поиска новых подходов в обучении.

В учебно-методических комплексах вузов сегодня делаются попытки органично увязать в систему в как традиционные компоненты учебного информационных технологиях и компьютерных программах, обеспечивающих самостоятельную работу обучаемых.

В настоящее время в системах высшего образования России и ведущих стран мира все большее распространение в учебной и научно - исследовательской работе вузов приобретает пакет Matlab и его приложения.

Применение данного пакета показало свою эффективность, как при создании лабораторной базы, так и при подготовке магистерских и дипломных работ.

О значимости данного пакета в научном мире и системе образования России можно судить по ежегодным всероссийским научным конференциям «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB», проводимых Институтом проблем управления РАН. Одна из секций на этих конференциях посвящена применению MATLAB в системе образования. На этой секции преподаватели вузов делятся опытом применения пакета в своих вузах. Многие из выступавших на конференции отмечали, что изучение и использование современных компьютерных программ должно стать обязательным элементом при подготовке современных специалистов для процесса: лекции, лабораторные работы, средств контроля качества самостоятельной работы, так и компоненты, базирующиеся на современные расширения возможностей инженерных исследований и разработок.

Широкое применение при изучении научно-технических дисциплин пакета MATLAB, помогает перенести акцент в обучении на принципиальные вопросы, отдав «технические» задачи компьютеру.

Изучение электромеханических процессов на базе математических моделей, в частности в переходных режимах работы, связано с решением систем дифференциальных уравнений. Однако возможности, предоставляемые различными программными средствами и вычислительной техникой, позволяют облегчить произведение необходимых расчетов.

На основе данных возможностей создан программный комплекс, объединивший в себе ранее и вновь разработанные независимые программы моделирования работы электрических машин. Каждая из программ моделирования была дополнена необходимым графическим интерфейсом и доработанной системой графической визуализации данных, которая включила к себя вывод осциллограмм и численных значений необходимых величин. Пользователю предоставлены широкие возможности изменения и сохранения введенных параметров и полученных результатов.

Программный комплекс может использоваться в учебном процессе и инженерной практике, его использование позволяет пользователю, не владеющему навыками работы с системой Matlab, произвести полный цикл исследований в удобной для него среде. Дальнейшая работа ведется в двух направлениях: модернизация существующих моделей, направленная на более подробное моделирование с учетом различного рода физических процессов; увеличение номенклатуры исследуемых режимов работы и типов электрических машин.

*Объектом исследования* являются электромеханические переходные процессы.

*Предметом исследования* является математическое моделирование систем для исследования электромеханических переходных процессов.

*Цель работы:* выполнить разработку системы для исследования электромеханических переходных процессов.

*Задачи работы:*

- смоделировать элементы системы (задачника интенсивности, регулятора скорости, фильтров, регуляторов тока и двухэтапных преобразователей координат главного канала системы управления);
- смоделировать систему автоматического управления скоростью системы «автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией - асинхронный двигатель» в библиотеке Arduino;
- выполнить разработку, реализацию в MATLAB, численных исследований и анализов возможностей математических моделей и алгоритмов расчета электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах.



# 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПАКЕТ MATLAB

## 1.1 Краткая характеристика математического пакета MATLAB

Пакет MATLAB был создан компанией Math Works более тридцати лет назад. Работа сотен ученых и программистов из различных научно-исследовательских центров и университетов мира направлена на постоянное расширение его возможностей и совершенствование заложенных алгоритмов.

В настоящее время MATLAB является мощным и универсальным средством решения задач, возникающих в различных областях человеческой деятельности. Спектр проблем, исследование которых может быть осуществлено при помощи MATLAB, охватывает: матричный анализ, обработку сигналов и изображений, задачи математической физики, оптимизационные задачи, обработку и визуализацию данных, работу с картографическими изображениями, нейронные сети, нечеткую логику и многие другие.

Обширная и удобная справочная система MATLAB способна удовлетворить потребности, как начинающего, так и достаточно опытного пользователя. Полная гипертекстовая информационная система (к сожалению, только на английском языке) содержит описание встроенных функций и достаточно большое число примеров их использования. Ссылки позволяют переходить к разделам, имеющим отношение к изучаемому вопросу, что облегчает самостоятельный поиск интересующей информации и увеличивает объем знаний начинающего пользователя. Доступ из командной строки к кратким сведениям о встроенных функциях обеспечивает возможность выбора нужного варианта обращения к функциям. Инженерам и научным работникам, проводящим самостоятельные исследования, могут быть полезными прилагаемые к пакету электронные книги в формате PDF. Данные книги не только дублируют справочную систему MATLAB и

дополнительные программы, называемыми расширениями Toolbox, но и содержат теоретические сведения по примененной математической базе, необходимые для осознанного использования описываемых средств. Справочная система снабжена ссылками на книги и статьи, посвященные реализованным алгоритмам в MATLAB и Toolbox, что позволяет исследователю и разработчику собственных алгоритмов глубже вникнуть в суть дела.

Огромным преимуществом MATLAB является открытость кода, что дает возможность опытным пользователям разбираться в запрограммированных алгоритмах и, при необходимости, изменять их. Впрочем, разнообразие набора функций MATLAB и Toolbox допускает решение большинства задач без каких-либо предварительных модификаций.

MATLAB прекрасно интегрируется с Microsoft Word и Excel. Связь MATLAB и Word обеспечивает возможность написания в редакторе Word

интерактивных документов, так называемых М-книг, основанных на специальном шаблоне. Пользователь, работающий с М-книгой, может запускать блоки команд MATLAB непосредственно из документа Word, причем результат выполнения команд отображается в М-книге. Данное средство прекрасно подходит для создания отчетов и учебных пособий, поскольку позволяет дополнить документ примерами и результатами расчетов.

Надстройка Excel Link, поставляемая вместе с MATLAB, существенно расширяет возможности Excel, обеспечивая доступ пользователя к функциям MATLAB и Toolbox. Подготовка данных осуществляется непосредственно в электронных таблицах, а обращение к функциям производится либо из ячеек рабочего листа, либо в модуле, написанном на алгоритмическом языке VBA.

Символические вычисления в MATLAB основаны на библиотеке, являющейся ядром математического пакета Maple. Решение уравнений и систем, интегрирование и дифференцирование, вычисление пределов, разложение в ряд и суммирование рядов, поиск решения дифференциальных

уравнений и систем, упрощение выражений — вот далеко не полный перечень возможностей MATLAB для проведения аналитических выкладок и расчетов. Поддерживаются вычисления с произвольной точностью. Пользователи, имеющие опыт работы в Maple, могут напрямую обращаться ко всем функциям данного пакета (кроме графических) и вызывать процедуры, написанные на встроенном языке Maple.

Информация, хранящаяся в базах данных многих популярных форматов, может быть импортирована в MATLAB, нужным образом обработана и исследована при помощи функций MATLAB, а затем экспортирована в какую-либо другую базу данных. Для обмена данными используются команды языка запросов SQL. Поддерживается, в частности, связь с Microsoft Access, Microsoft SQL Server, Oracle. Имеется приложение с графическим интерфейсом, которое облегчает работу пользователей, не знакомых с языком запросов SQL.

MATLAB обладает хорошо развитыми возможностями визуализации двумерных и трехмерных данных. Высокоуровневые графические функции призваны сократить усилия пользователя до минимума, обеспечивая, тем не менее, получение качественных результатов. Редактор графиков помогает оформить результат требуемым образом: добавить стрелки, поясняющие надписи, задать цвета и стиль линий и поверхностей, словом, получить изображение, пригодное для помещения в отчет или статью. Полный доступ к изменению свойств отображаемых графиков дают низкоуровневые функции, но их применение подразумевает понимание принципов компьютерной графики. Создание приложений MATLAB с графическим выводом требует от программиста умения управлять видом графиков при помощи низкоуровневых функций и средств дескрипторной графики.

В MATLAB реализованы классические численные алгоритмы решения уравнений, задач линейной алгебры, нахождения значений определенных интегралов, интерполяции, решения дифференциальных уравнений и систем. Применение базовых вычислительных возможностей требует знания

основных численных методов в рамках программы технических вузов. Решение специальных задач, разумеется, невозможно без соответствующей теоретической подготовки, впрочем, сведения, изложенные в справочной системе, оказываются неоценимым подспорьем для желающих самостоятельно разобраться в обширных возможностях пакета MATLAB.

Простой встроенный язык программирования позволяет легко создавать собственные алгоритмы. Простота языка программирования компенсируется огромным множеством функций MATLAB и Toolbox. Данное сочетание позволяет достаточно быстро разрабатывать эффективные программы, направленные на решение практически важных задач.

Визуальная среда GUIDE предназначена для написания собственных программ - приложений с графическим интерфейсом пользователя. Работа в среде GUIDE достаточно проста, но предполагает владение основами программирования и дескрипторной графики. Наличие определенного навыка работы в среде GUIDE предоставляет возможность создать визуальную среду для проведения собственных исследований, что значительно облегчает работу и существенно экономит время.

MATLAB является интерпретатором, т. е. каждая строка программы преобразуется в код и затем выполняется. Разумеется, интерпретирование команд существенно увеличивает время работы алгоритма, содержащего циклически повторяемые действия. Для повышения производительности вычислений в составе пакета имеется дополнительный модуль MATLAB Compiler, который обеспечивает компиляцию программ, написанных на языке MATLAB. Объектно-ориентированный подход, заложенный в основу MATLAB, обеспечивает современную эффективную технологию программирования.

С учетом специфики решаемой задачи разработчик приложений MATLAB в дополнение к существующим классам имеет возможность создавать собственные классы каждый со своими методами.

Программный интерфейс приложения (API) реализует связь среды MATLAB с программами, написанными на языках «С» или «Fortran». Библиотека программного интерфейса позволяет вызывать имеющиеся модули «С» или «Fortran» из среды или программ MATLAB, обращаться к функциям MATLAB из программ на "С" или "Fortran", осуществлять обмен данными между приложениями MATLAB и другими программами, создавать приложения типа клиент-сервер.

Как уже отмечалось, рассмотренный выше математический пакет MATLAB является платформой для создания дополнительных программ, расширяющих возможности пакета. В настоящее время таких программ уже рассчитывается более сотни. Но главным из них, несомненно, является пакет Simulink. Рассмотрим его.

## **1.2 Краткая характеристика математического пакета Simulink**

Пакет расширения Simulink системы MATLAB является ядром интерактивного программного комплекса, предназначенного для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем, и устройств, представляемых в виде функциональной блок-схемы, именуемой S-моделью, или просто моделью. При этом возможны различные варианты моделирования: во временной области, в частотной области, с событийным управлением, на основе спектральных преобразований Фурье, с использованием метода Монте-Карло, (реакция на воздействия случайного характера) и т. д.

Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем. Он основан на графическом интерфейсе пользователя и по существу является типичным средством визуально-ориентированного программирования. Используя палитры компонентов (наборы блоков),

пользователь с помощью мыши переносит нужные блоки с палитр на рабочий стол пакета Simulink и соединяет линиями входы и выходы блоков.

Таким образом, создается диаграмма (блок-схема) системы или устройства, называемая S-моделью.

Данная модель фактически является программой, которую можно посмотреть с помощью обычного тестового редактора или с помощью редактора файлов системы MATLAB. Файлы модели имеют расширение «mdl». Однако следует отметить, что эти файлы очень громоздки и даже для довольно простых моделей могут содержать тысячи строк программного кода. Это типичное свойство визуально-ориентированных систем программирования. Однако пользователь-программист может работать с программными кодами S-моделей и, при необходимости, вносит в них изменения.

С помощью Simulink автоматизируется наиболее трудоемкий этап моделирования: он составляет и решает сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль над поведением созданного пользователем виртуального устройства.

Пользователю достаточно уточнить вид анализа и запустить Simulink в режиме симуляции (откуда и название пакета Simulink) созданной модели системы или устройства.

Средства визуализации результатов моделирования в пакете Simulink настолько наглядны, что порой создается ощущение, что созданная диаграмма работает «как живая». Более того, Simulink практически мгновенно меняет математическое описание модели по мере ввода ее новых блоков, даже в том случае, когда этот процесс сопровождается сменой порядка системы уравнений и ведет к существенному качественному изменению поведения системы. Впрочем, это является одной из главных целей пакета Simulink.

Ценность Simulink заключается и в обширной, открытой для изучения и модификации, библиотеке компонентов (блоков). Она включает источники воздействий (сигналов) с практически любыми временными зависимостями, масштабирующие, линейные и нелинейные преобразователи с разнообразными формами передаточных характеристик, квантующее устройство, интегрирующие и дифференцирующие блоки и т. д.

В библиотеке имеется целый набор виртуальных регистрирующих устройств от простых измерителей типа вольтметра или амперметра до универсальных осциллографов. Имеется даже графопостроитель для создания фигур, заданных в полярной системе координат, например, фигур Лиссажу и фазовых портретов колебаний. Кроме того, Simulink имеет средства анимации и звукового сопровождения. А в дополнительных библиотеках можно отыскать и такие «дорогие приборы», как анализаторы спектра сложных сигналов, многоканальные самописцы.

Программные средства моделирования динамических систем известны давно, к ним относятся, например, программы Tutsim и LabVIEW.

Однако для эффективного применения подобных средств необходимы высокоскоростные решающие устройства. Интеграция одной из самых быстрых матричных математических систем - MATLAB с пакетом Simulink - открыла новые возможности использования самых современных математических методов для решения задач динамического и ситуационного моделирования сложных систем и устройств.

Средства графической анимации Simulink позволяют строить виртуальные физические лаборатории с наглядным представлением результатов моделирования. Возможности Simulink охватывают задачи математического моделирования сложных динамических систем во всех областях науки и техники. Этим объясняется популярность данного пакета как в университетах и институтах, так и в научных лабораториях мира.

И наконец, важным достоинством Simulink является возможность задания в блоках произвольных математических выражений, что позволяет

решать типовые задачи, пользуясь примерами пакета Simulink или же просто задавая новые выражения, описывающие работу моделируемых пользователем систем и устройств. Важным свойством пакета является и возможность задания системных функций (S-функций) с включением их в состав библиотек Simulink. Необходимо отметить также возможность моделирования устройств и систем в режиме реального времени.

Как программное средство Simulink - типичный представитель визуально-ориентированных языков программирования. На всех этапах работы, особенно при подготовке моделей систем, пользователь практически не имеет дела с обычным программированием. Программа в кодах автоматически генерируется в процессе ввода выбранных блоков компонентов, их соединений и задания параметров компонентов.

Важное достоинство Simulink - это интеграция не только с системой MATLAB, но и с рядом других пакетов расширения, что обеспечивает, по существу, неограниченные возможности применения Simulink для решения практически любых задач имитационного и событийного моделирования.

Разработчики системы MATLAB + Simulink отказались от конкуренции с разработчиками программ узкого назначения, например, схемотехнического. Они сосредоточили свое внимание на решении куда более важной и сложной задачи моделировании блочных динамических систем и устройств различного назначения. Это физические и химические системы и устройства, электротехнические устройства (и даже целые энергетические системы), механические системы и устройства и т. д. и т. п.

Для этого пришлось существенно расширить библиотеки компонентов таких систем и устройств с одной стороны, а с другой - применить укрупненные модели ряда компонентов. Именно благодаря этому возможно моделирование сложных систем и устройств.

Одной из самых сложных проблем в реализации математического моделирования в среде системы MATLAB стала подготовка модели моделируемой системы или устройства. Модель обычно представляется в



форме графического, табличного или таблично - топологического описания. При этом необходимо предусмотреть организацию связей между компонентами и установку их многочисленных параметров. После этого надо запустить созданную модель на исполнение, то есть задать решение автоматически составленной системы уравнений состояния и вывод результатов решения. Это также представляет собой достаточно сложную проблему.

Однако все эти проблемы блестяще решены введением в MATLAB второй важной части системы - расширения Simulink. Это расширение реализует по существу визуально-ориентированное программирование задач автоматического составления графической модели системы, составления и решения ее уравнений состояния и затем наглядного представления результатов моделирования.

### **1.3 Краткий обзор расширений Toolbox, включаемых в пакет MATLAB**

Назначение каждого пакета Toolbox охватывают многие практически важные задачи, которые могут быть решены при помощи данного Toolbox. Далее приведено краткое описание некоторых Toolbox.

#### *SignalProcessingToolbox*

Пакет предназначен для исследования и обработки сигналов.

Основными возможностями данного пакета являются:

- генерация, импорт и экспорт сигналов;
- разработка, анализ и применение фильтров с конечной и бесконечной импульсной характеристикой;
- спектральный анализ и статистическая обработка сигналов;
- моделирование линейных систем.

В состав SignalProcessingToolbox входит несколько приложений с графическим интерфейсом, предназначенных для облегчения доступа к

функциям Toolbox. Данные приложения позволяют импортировать, визуализировать и исследовать сигналы, изучать спектр сигналов, интерактивно создавать фильтры с заданными характеристиками.

### *ImageProcessingToolbox*

Пакет содержит большое число функций цифровой обработки и анализа изображений, в частности:

- импорт и экспорт графической информации;
- геометрические операции, например, такие, как изменение размеров и поворот;
- получение статистической информации об изображении;
- анализ изображений, например, нахождение границ интенсивности;
- разработка линейных фильтров;
- операции над соседними элементами;
- работа с картой цветов;
- различные методы представления цветов;
- преобразование типов изображений.

В состав ToolboxImageProcessing входит несколько демонстрационных приложений, охватывающих решение задач о нахождении границ изображений, фильтрации и разработки фильтров, сжатии изображения.

### *Statistics Toolbox*

Функции и приложения данного пакета покрывают широкий спектр статистических задач и реализуют основные методы их решения. Доступно более двадцати классических распределений, для них имеются функции распределения вероятности и плотности вероятности, вычисления моментов распределений, генерации выборки из распределения.

Основные классы статистических задач, которые могут быть исследованы при помощи ToolboxStatistics следующие:

- исследование линейных моделей;

- параметрическое оценивание;
- проверка гипотез;
- планирование эксперимента;
- задачи кластерного анализа и др.

Пакет содержит набор функций для построения статистических графиков и приложения с графическим интерфейсом пользователя, предназначенные для изучения распределений и аппроксимации данных с использованием регрессионной модели.

#### *Toolbox Optimization*

Данный пакет нацелен на решение линейных и нелинейных задач оптимизации, причем для задач с большим числом неизвестных предусмотрены весьма эффективные специальные методы.

Класс задач, охватываемый данным пакетом, включает:

- линейное и квадратичное программирование;
- минимизацию нелинейных функций при наличии нелинейных ограничений;
- подбор параметров;
- минимаксные задачи и задачи о достижении цели.

#### *ToolboxPartialDifferentialEquations (PDE)*

Пакет создан для исследования задач математической физики, описываемых дифференциальными уравнениями и системами в частных производных методом конечных элементов.

Решение задач значительно упрощается благодаря приложению с графическим интерфейсом, которое позволяет легко и наглядно осуществить все этапы решения задач методом конечных элементов - от задания области и граничных условий до визуализации результата.

Приложение может быть легко настроено на определенный класс решаемых задач, из различных областей науки, например, таких, как:

- теория упругости;
- электростатика и магнитостатика;

- теплопроводность;
- теория диффузии.

Нестационарные процессы отображаются при помощи анимированных графиков. В состав Toolbox PDE входят солверы для решения нелинейных задач в адаптивном режиме. Возможности Toolbox PDE не ограничиваются вышеперечисленными типами задач, в частности, встроенные функции могут быть использованы для решения систем уравнений произвольной размерности.

В дополнение к вышеперечисленным средствам, следует подчеркнуть, что MATLAB и соответствующие Toolbox могут с успехом применяться для интерактивного моделирования и анализа нелинейных систем, исследования устойчивости, разработки цифровых и аналоговых систем связи, передачи и хранения информации. Многие практические задачи, возникающие в области нечеткой логики и нейронных сетей, также могут быть решены с использованием соответствующих пакетов Toolbox.

Специальный пакет направлен на поддержку процесса сбора аналоговой и цифровой информации при помощи внешних устройств.

#### *Filter Design ToolBox*

Пакет предоставляет широкие возможности для разработки фильтров.

#### *Instrument Control ToolBox*

Пакет предоставляет наладить интерфейс с внешними устройствами, подключаемыми к компьютеру через последовательный порт и универсальную шину интерфейса (GPIB).

### **1.4 Обзор литературных источников по применению математического пакета Matlab+Simulink в научной и образовательной деятельности**

В монографии [1], подготовленной профессором Германом - Галкиным и предназначенной для преподавателей и студентов средних и высших

учебных заведений рассматриваются вопросы использования системы Matlab и его расширения Simulink для решения практических задач по проектированию полупроводниковых систем электропривода.

Книга представляет собою учебное пособие и включает в себя следующие разделы:

- основы электропривода;
- моделирование систем в пакете «Matlab + Simulink»;
- силовые полупроводниковые преобразователи;
- электроприводы постоянного тока;
- электроприводы переменного тока.

#### *Краткая характеристика работы*

Как известно, электропривод широко используется в промышленности.

Это один из самых энергоемких потребителей и преобразователей энергии. В связи с этим вопросы уменьшения потерь при преобразовании энергии являются актуальными. Пути решения этой проблемы известны — это снижение потерь в каждом звене электропривода (путем совершенствования конструкций этих звеньев) и согласование выходных параметров электропривода с параметрами нагрузки (путем регулирования скорости и момента на выходе электропривода).

Теория регулируемого электропривода, насчитывающая уже ни один десяток лет, постоянно совершенствуется вместе с совершенствованием конструктивных решений. Особенно интенсивное развитие она получила в последнее время благодаря созданию новых силовых управляемых полупроводниковых приборов, развитию цифровых информационных

технологий и разработке разнообразных систем микропроцессорного управления.

Владение теорией в области регулируемого электропривода является необходимым элементом технической культуры и важной составляющей профессиональной подготовки и востребованности специалиста в области автоматизированного электропривода и электроэнергетики.

Сегодня достижение такой цели возможно лишь при применении новых форм обучения с использованием новых компьютерных технологий, базирующихся на современных программных продуктах.

Современные компьютерные технологии, в основе которых лежит математический пакет Matlab + Simulink предоставляют возможность более глубокого изучения вопросов, связанных с проектированием полупроводникового электропривода. Они позволяют качественно изменить и существенно улучшить технологию изучения, перевести ее в виртуальную действительность, осуществлять в этой виртуальной лаборатории необходимые исследования с получением верифицированных результатов.

Однако проблемы, возникающие на пути решения этой задачи, могут быть преодолены только путем глубокого изучения физических явлений во всех звеньях системы. Проще сказать, для грамотного использования компьютера необходимо хорошо знать и хорошо понимать физику работы отдельных звеньев системы, их взаимосвязь и взаимозависимость.

В настоящее время имеется обширная литература по теории электропривода. Однако отсутствуют работы, в которых теоретические вопросы регулируемого электропривода исследовались бы с привлечением специализированных компьютерных программ. Книга профессора Германа-Галкина компенсирует данный пробел и, несомненно, может быть полезной для преподавателей и студентов нашего университета в рамках дипломного проектирования и при подготовке магистерских диссертаций. Может быть также полезной и для создания современной лабораторной базы по автоматизированному электроприводу и курсу "Теория автоматического управления".

Работа [2], подготовлена, как и работа [1], профессором Германом-Галкиным. В работе удачно продемонстрировано применение системы Matlab, а точнее ее расширения SimPowerSystems для создания современных лабораторных работ по курсу "Электрические машины". Данные виртуальные лабораторные работы будут не только прекрасно дополнять

возможности имеющейся в университете лаборатории электрических машин, но и значительно расширяют их.

Работа [3], представляет собою перевод с английского "Руководства пользователя по системе PowerSystemBlockset" выполненного Гнединым Павлом.

Авторами данного руководства являются разработчики самой системы.

Система предназначена для моделирования переходных процессов в энергосистемах. Разработчиками этой системы являются специалисты научно – исследовательского института и университета города Квебек, расположенного в Канаде. Система включает в себя библиотеку моделей типичного электрооборудования, встречающегося в энергосистемах: трансформаторов, электрических машин, линий электропередач и силовой электроники.

Эти модели, по заявлению авторов системы, являются научно обоснованными, и эта обоснованность основана на результатах испытаний, выполненных в реальной энергосистеме и в лаборатории моделирования Квебека. Возможности системы PowerSystemBlockset для моделирования переходных процессов и исследования режимов работы электрооборудования в энергосистеме иллюстрированы в демонстрационных файлах, приведенных в работе. Выход данной работы следует признать актуальной и своевременной, позволившей познакомить русскоязычную аудиторию с оригинальной работой по описанию системы PowerSystemBlockset, выполненной самими авторами системы. К сожалению, технические термины, встречающиеся в тексте перевода, не всегда соответствуют терминологии принятой у энергетиков.

В книге [4], подготовленной профессором Черных И. В., содержится описание прикладной программы Simulink и библиотеки блоков SimPowerSystems, предназначенной для моделирования электротехнических устройств и систем.

Рассматривается методика создания моделей с помощью графического интерфейса программы, описаны методы расчета моделей, подробно освещена методика создания электротехнических блоков пользователя. Даны основные команды для управления моделью из ядра пакета MATLAB. Рассмотрен механизм выполнения расчетов на модели, приводятся советы автора по применению программы.

#### *Краткая характеристика работы*

Библиотека блоков SimPowerSystems (в версии MATLAB 6.1 и более ранних версиях она называлась PowerSystemBlockset) является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование различных устройств. В частности, библиотека SimPowerSystems содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. В состав библиотеки входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и тому подобного оборудования. Имеется также раздел, содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники, включая и системы управления для них. Комбинируя возможности Simulink и SimPowerSystems, пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств.

В частности, пользователь имеет возможность рассчитать установившийся режим работы системы на переменном токе, выполнить расчет импеданса (полного сопротивления) участка цепи, получить частотные характеристики, проанализировать устойчивость, а также выполнить гармонический анализ токов и напряжений.

Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а



систему управления - с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее устойчивость и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MATLAB, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

Библиотека SimPowerSystems достаточно обширна. В том случае, если все же нужного блока в библиотеке нет, пользователь имеет возможность создать свой собственный блок как с помощью уже имеющихся в библиотеке блоков, реализуя возможности Simulink по созданию подсистем, так и на основе блоков основной библиотеки Simulink и управляемых источников тока или напряжения. Таким образом, SimPowerSystems в составе Simulink на настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем.

Данная работа может быть использована в учебном процессе для знакомства преподавателей университета с системами Simulink и SimPowerSystems и приобретению практических навыков в моделировании различных задач электротехники. Для этого книга включает в себя большое количество примеров, поясняющих работу блоков и методику создания моделей.

В книге [5] дано изложение способов организации процедур моделирования с использованием системы SIMULINK. Описана операционная среда системы и ее интерфейсы с другими инструментальными средствами из состава программных продуктов семейства MathWorks. Рассмотрены примеры моделирования конкретных динамических систем.

#### *Краткая характеристика работы*

Рубеж XXI века фирма TheMathWorks Inc. отметила выпуском новой версии системы инженерных и научных вычислений MATLAB 6.5

Отличительной особенностью этой версии является развитая среда разработки приложений, которая характеризуется большим разнообразием инструментальных средств и дружественных графических интерфейсов.

Важнейшая роль во всех версиях программных продуктов принадлежит системе вычислений. Следует отметить ту уникальную особенность системы MATLAB, что все вычислительные операции в ней выполняются над векторами или наборами векторов. Таким образом, система MATLAB по своей сути является эмулятором векторных вычислений, и это существенно отличает ее от других систем, таких, как Maple, MathCAD, Mathematica. Векторная обработка данных обеспечивает высокую скорость вычислений, избавляет пользователя от написания циклов и гарантирует высокую точность. Другое важнейшее достоинство системы MATLAB - это модульный принцип построения.

В работе подробно рассмотрено описание пакетов, предназначенных для математического и имитационного моделирования процессов в динамических системах. Сюда входит большой комплект инструментальных средств моделирования динамических систем, систем реального времени, событийного моделирования, подготовки кодов для микропроцессоров, средств генерации отчетов и контроля выполнения проектов. Ядром этого комплекта является система математического моделирования Simulink, а также инструментальные средства оценки качества моделирования Simulink Performance Tools.

Важное место в процессе создания технической системы занимает полунатурное, или макетное моделирование с элементами реальной аппаратуры.

Базовым инструментальным средством для такого моделирования является система Real-TimeWorkshop, а также генератор кодов RealTimeWorkshopEmbeddedCoder на языке C. К этому комплекту следует отнести пакет программ моделирования измерительных устройств InstrumentControl Toolbox, набор блоков для моделирования пультов

управления и приборных досок Dials&Gauges Blockset. Существенными компонентами этого комплекта являются также инструментальные средства макетирования систем реального времени xPCTarget на базе PC, включая генератор кодов xPCTargetEmbeddedOption для плат PC. Имитационное, или событийное моделирование с учетом влияния среды окружения реализовано на основе системы моделирования Stateflow и генератора кодов Stateflow Coder. Наличие инструментальных средств генерации кодов для микропроцессоров позволяет не только формировать коды на языке "C", но и выполнять их аппаратную реализацию на различных типах микропроцессоров.

Инструментальные средства MATLAB LinkforCode ComposerStudio и EmbeddedTargetforTexasInstrument поддерживают разработку кодов для микропроцессоров фирмы TexasInstruments, а комплект EmbeddedTargetforMotorola MPC555 - для микропроцессоров фирмы Motorola. В настоящее время эти инструментальные средства дополнены средствами генерации кода для новых типов микропроцессоров Motorola HC 12, Infineon C166, OSEK/VDX.

Состав программных продуктов семейства MathWorks существенно расширен новыми специализированными наборами блоков для моделирования динамики аэрокосмических летательных аппаратов Aerospace Blockset, механических систем SimMechanics, электрических систем SimPowerSystems, а также имитации виртуальной реальности VirtualReality Toolbox.

Книга предназначена для инженеров и исследователей, выполняющих научные и инженерные разработки в различных прикладных областях, а также для студентов университетов и вузов, нуждающихся в мощном инструменте моделирования при выполнении исследовательских работ, курсовых и дипломных проектов.

Кроме указанных выше работ в список литературы по теме включены книги [6 -17], подготовленные профессором Дьяконовым лично и в

соавторстве. Конечно, этот список далеко не исчерпывает список всех книг, изданных им по компьютерной математике.

### *Краткая характеристика работ*

В книгах [6 -17] приводятся различные сведения, как по старым, так и новейшим системам MATLAB + Simulink описано их применение в математических расчетах и математическом моделировании. Особое внимание уделено анализу, моделированию и проектированию систем и устройств, в частности электрорадиотехнических и телекоммуникационных. Дано описание многих пакетов расширения Blockset и Toolbox последних реализаций, относящихся к математике и математическому моделированию. Ряд пакетов в нашей литературе описан впервые. Значительное внимание уделено визуализации результатов работы и описанию сотен примеров применения системы MATLAB и ее расширений. Работы предназначены для инженеров, научных работников, студентов и преподавателей университетов и вузов.

К достоинствам книг автора следует отнести, что они могут быть использованы и как справочники по системе MATLAB + Simulink и их многочисленным расширениям, так и как самоучители по этим системам.

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА SIMPOWERSYSTEM ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 2.1 Лабораторный практикум для исследования переходных процессов в энергетических системах

Представляемые в настоящей работе лабораторные работы выполняются с использованием имитационных моделей, реализованных средствами пакета SIMPOWERSYSTEM (SPS -модели), который является эффективным инструментом для моделирования работы различных электрических устройств энергетических систем.

Пакет SIMPOWERSYSTEM позволяет проводить моделирование как простых электрических цепей постоянного и переменного тока, так и сложных линий электропередачи большой мощности. Дает возможность выполнять исследования различных преобразовательных устройств на современной элементной базе и также проводить исследования переходных процессов в электрических машинах. Пакет SIMPOWERSYSTEM позволяет создавать SPS -модели электротехнических устройств и энергетических систем, а также устройств, характеризующихся объединением электрических цепей с электромеханическими устройствами и различными преобразователями электрической энергии.

При выполнении лабораторных работ студентам предлагаются базовые SPS -модели исследуемых объектов, которые необходимо соответствующим образом адаптировать согласно программам исследований. Для этого предусматривается использование следующих библиотек пакета SIMPOWERSYSTEM:

*Connectors* - подключающие и соединительные устройства;

*Electrical Sources* - источники электрической энергии и сигналов;

*Elements* - компоненты электрических устройств;

*Power Electronics* - устройства энергетической электроники;

*Machines* - электрические машины;

*Measurements* - измерительные устройства и блоки управления;

*Extra Library* - специальные энергетические устройства.

Кроме того, для обработки экспериментальных данных и отображения результатов исследований используются средства пакета SIMULINK, который, так же, как и пакет SIMPOWERSYSTEM входит в базовую систему MATLAB. Ниже приводятся описания лабораторных работ по исследованию переходных процессов, как в простых электрических цепях, так и в сложных электроэнергетических устройствах, включая воздушные линии связи с распределенными параметрами, трансформаторы и электрические двигатели переменного и постоянного тока.

## 2.2 Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях

*Цель работы:* исследование при помощи SPS -модели переходных процессов в RLC-цепях при включении на постоянное напряжение.

*Описание объекта исследования.*

Используемая для исследования SPS –модель (рисунок 1) находится в файле «untitled». Параметры компонентов следующие: напряжение DC VoltageSource равно 100В,  $R = 100$  Ом,  $L = 1$  мГн,  $C = 1$  мкФ.

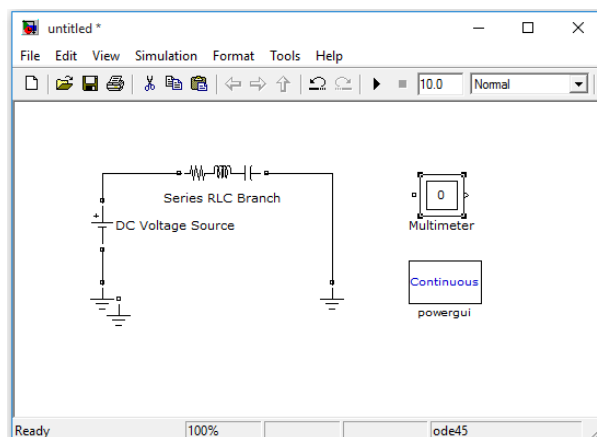


Рисунок 1 - SPS –Модель для исследования переходных процессов в последовательных RLC-цепях

Для измерения тока, протекающего через нагрузку, используется блок Multimeter, окно настройки которого показано на рисунке 2. Этот блок позволяет измерять электрические переменные, выбранные в окне настройки соответствующих элементов схемы модели.

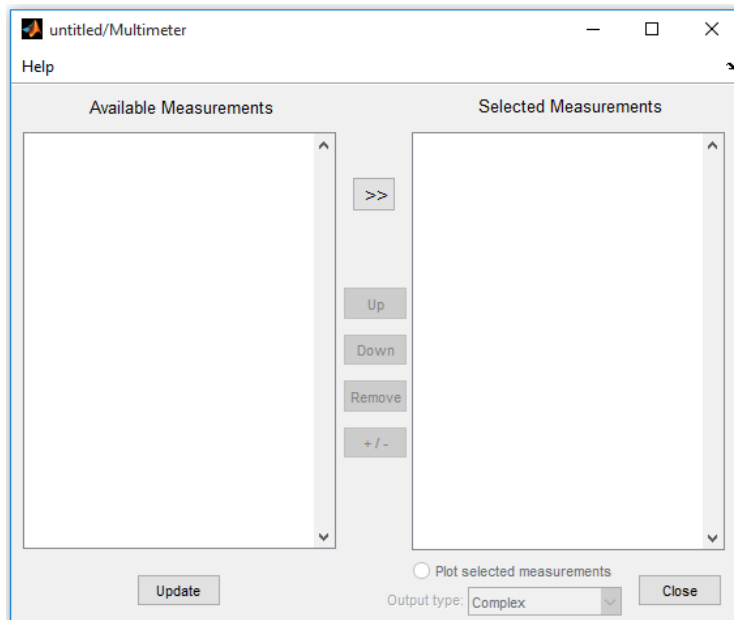


Рисунок 2 - Окно настройки блока Multimeter

Для отображения переходных процессов в модели используется пользовательский интерфейс POWERGUI.

*Программа исследований:*

1. Ознакомиться с моделью и изучить настройки блоков SPS –модели.
2. Используя исходную модель, исследовать характер переходных процессов в режиме подключения цепи на постоянное напряжение.

При этом необходимо:

- определить зависимость времени переходного процесса от значения сопротивления резистора  $R$ ;
  - построить графики изменения напряжений на  $L$  и  $C$ .
3. Расчетным путем определить значения  $L$  и  $C$ , при которых наблюдается резонанс напряжений в цепи и, используя модель построить графики соответствующего переходного процесса для изменения тока в цепи.

*Методические указания по порядку проведения работы.*

Для исследования переходных процессов используется блок POWERGUI.

При этом выполняется следующая последовательность действий или активизация и подключение мышью предлагаемых функций меню: POWERGUI→ Tools→ ControlSystem Toolbox (LTI Viewer) → Opennew LTI Viewer.

После выполнения последней операции на экране появляется график (рисунок 3) переходного процесса, отображающий реакцию цепи на скачкообразное изменение входного напряжения.

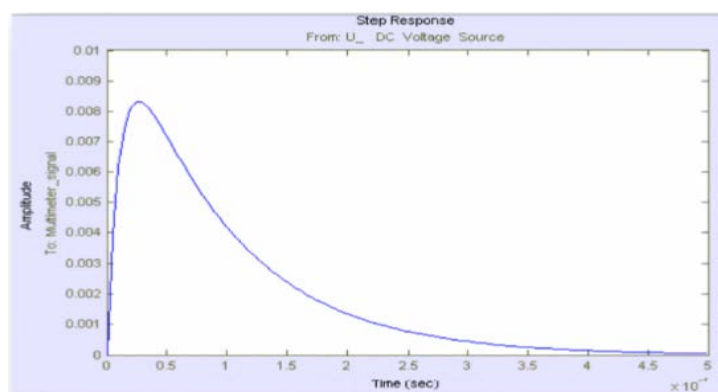


Рисунок 3 - График переходного процесса

### **2.3 Исследование переходных процессов в параллельном LC контуре**

*Цель работы:* исследование при помощи SPS – модели переходных процессов в параллельном LC контуре.

*Описание объекта исследования.* Используемая для исследования PSB-модель (рисунок 4) находится в файле «untitled». В представленной модели заданы следующие исходные параметры:  $U_0 = 125$  В,  $R = 100$  Ом,  $L = 40$  мГн,  $C = 5$  мкФ.



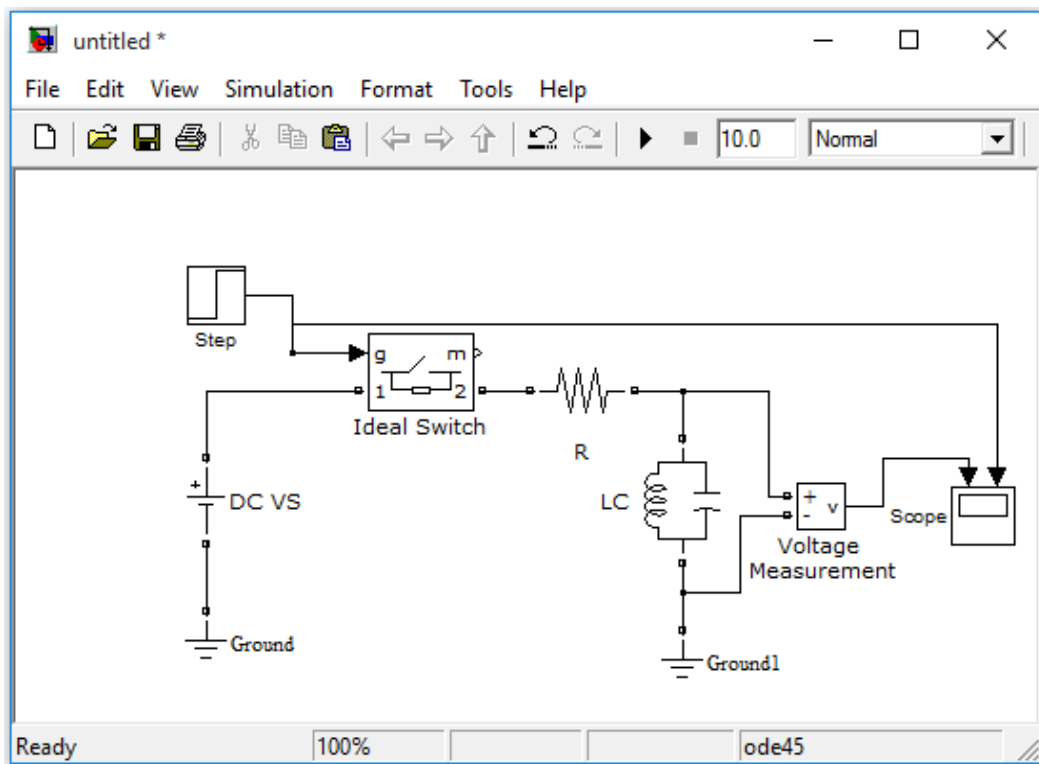


Рисунок 4 - Базовая SPS –модель исследуемой схемы

График изменения напряжения на контуре показан на рисунке 5.

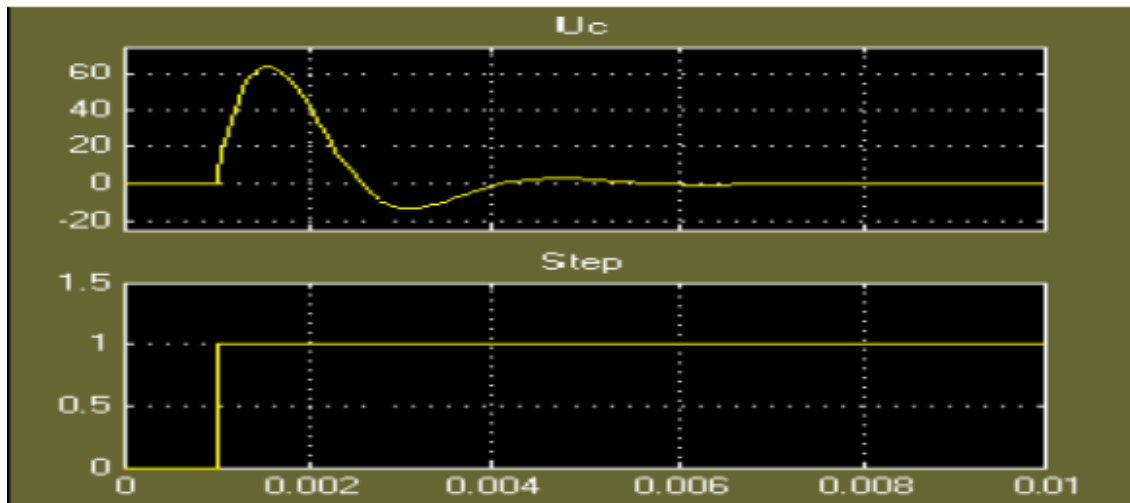


Рисунок 5 - Контрольные осциллограмм

*Программа исследований:*

1. Ознакомиться с моделью и изучить настройки блоков SPS –модели.
2. Используя исходную модель, исследовать характер переходных процессов в режиме подключения постоянного напряжения.

При этом необходимо:

- определить зависимость времени установления от значения сопротивления балластного резистора;
- определить значение резонансной частоты и добротность контура.
- построить графики изменения токов через L и C.

3. Заменить источник постоянного напряжения источником переменного напряжения с параметрами  $U_m=200\text{В}$  и  $f=50\text{ Гц}$ . Провести исследование переходных процессов при различных значениях начальной фазы входного напряжения.

4. Исключить из модели ключ IdealSwitch и экспериментально определить значение резонансной частоты.

*Методические указания по порядку проведения работы:*

1. Длительность установления переходного процесса обычно определяется как интервал времени от начала входного воздействия на цепь до момента затухания исследуемого сигнала с погрешностью 1%.

Для измерения максимального значения исследуемого сигнала и момента окончания переходного процесса в системе SIMPOWERSYSTEM удобно использовать кнопки Zoom Y-axis и Zoom X-axis, которые находятся на панели управления осциллографов (Scope).

2. Для измерения частоты резонанса при  $R=500\text{ Ом}$  следует воспользоваться двумя методами.

Первый метод предусматривает измерение периода колебаний напряжения на контуре и вычисление по известным формулам резонансной частоты.

Для второго метода непосредственного подбора частоты резонанса требуется собрать SPS –модель, показанную на рисунке 6. Модель содержит необходимые датчики тока и напряжения, а также блок POWERGUI. Значению резонансной частоты соответствует совпадение амплитуд токов IL и IC.

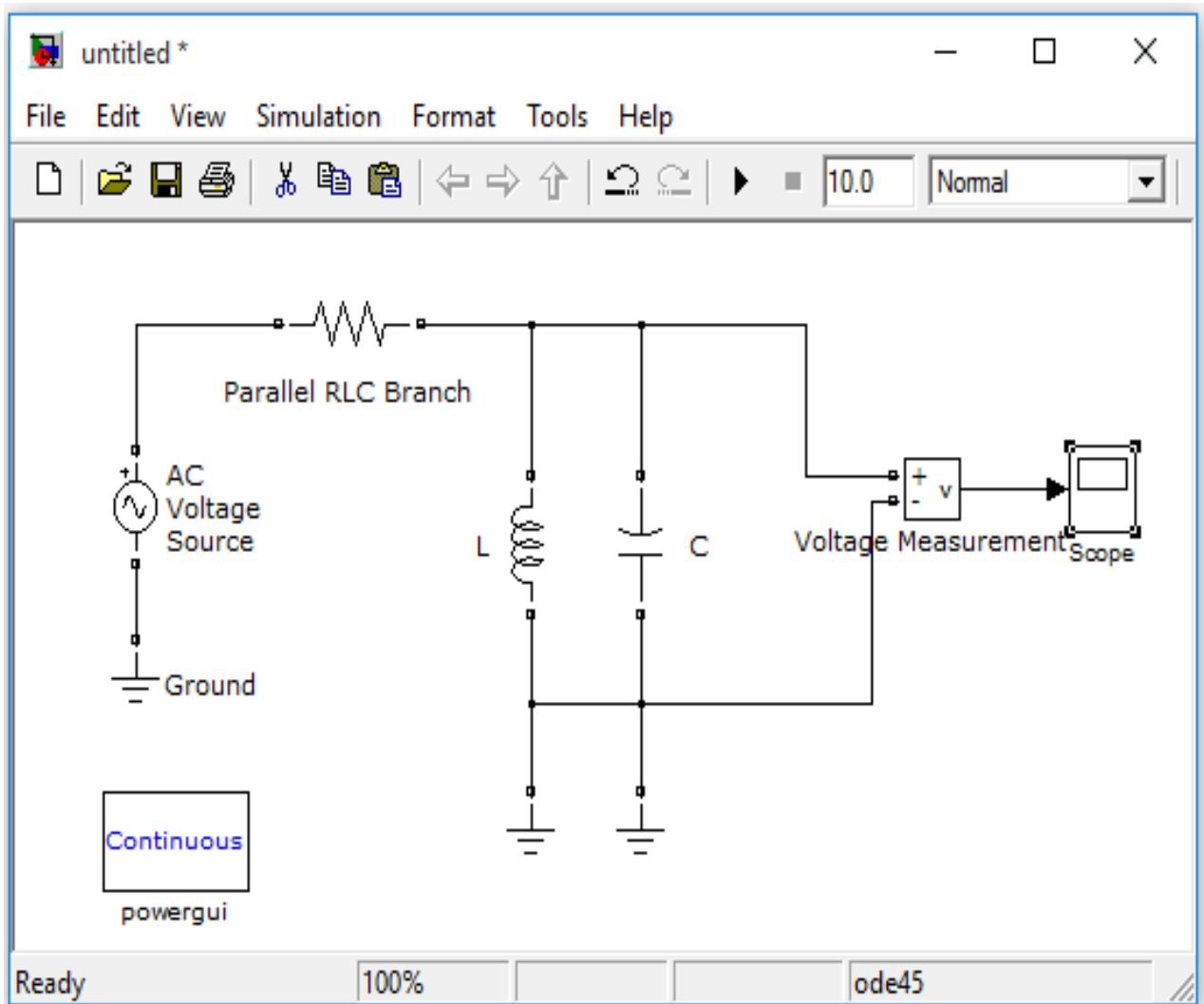


Рисунок 6 - SPS – Модель исследуемой схемы для измерения резонансной частоты

Для проверки результатов сравните полученные данные с теоретическими значениями, которые вычисляются по формуле:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

3. Теоретически добротность контура при резонансе токов определяется по формуле:

$$Q = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (2)$$

Практически добротность можно оценить по числу колебаний совершаемых переходной характеристикой (см. рисунок 2) от начала процесса до момента его установления.

## 2.4 Исследование переходных процессов в линиях электропередачи с распределенными параметрами

*Цель работы:* исследование при помощи имитационных SPS –модели переходных процессов при включении и отключении длинных воздушных линий с распределенными параметрами.

*Описание объекта исследования*

Используемая для исследования модель (рисунок 8) находится в файле «LINE\_DPS\_».

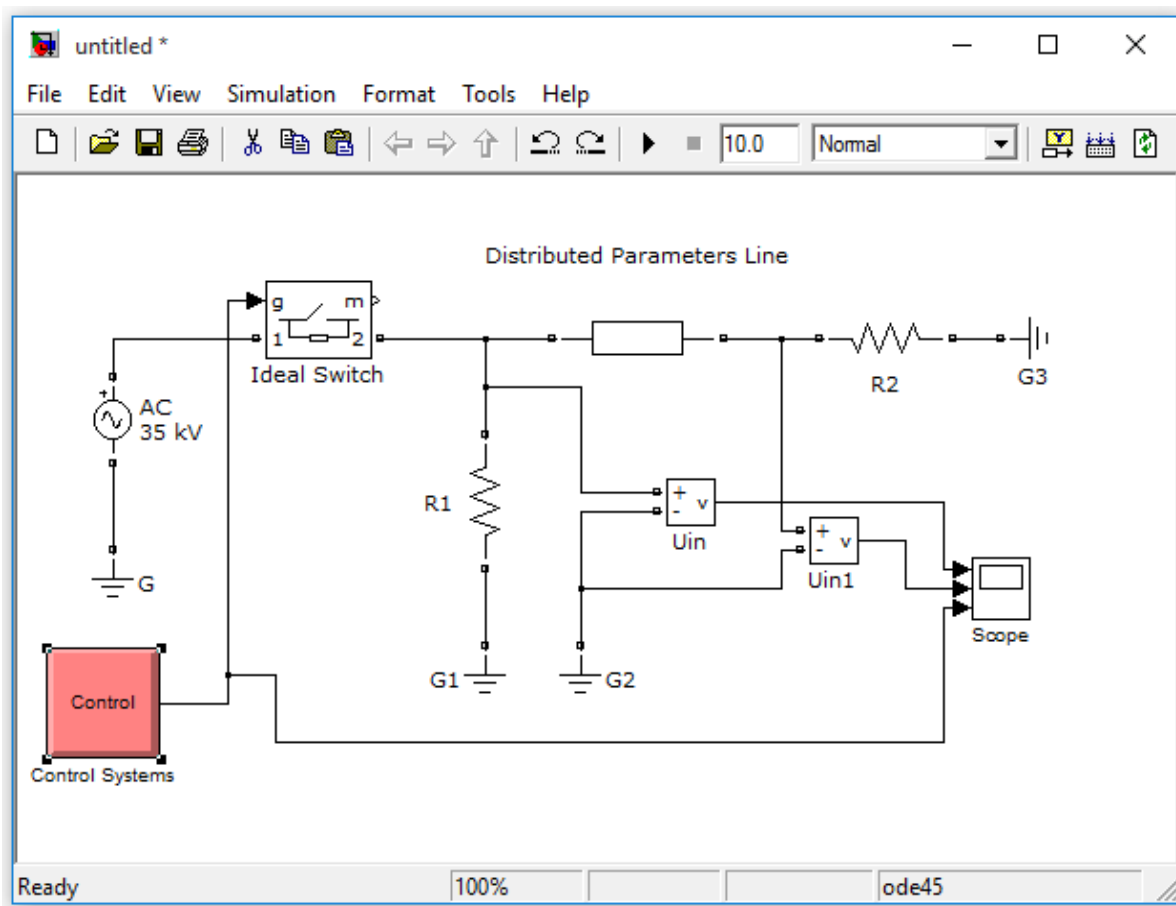


Рисунок 8 - SPS –модель для исследования линии с распределенными параметрами

В модель кроме компонент, значение которых понятно из рисунка 8, входит в качестве основного блока компонент `DistributedParametersLine`. Компонент представляет собою модель воздушной линии электропередачи с распределенными параметрами.

Окно настройки параметров компонента показано на рисунке 8.

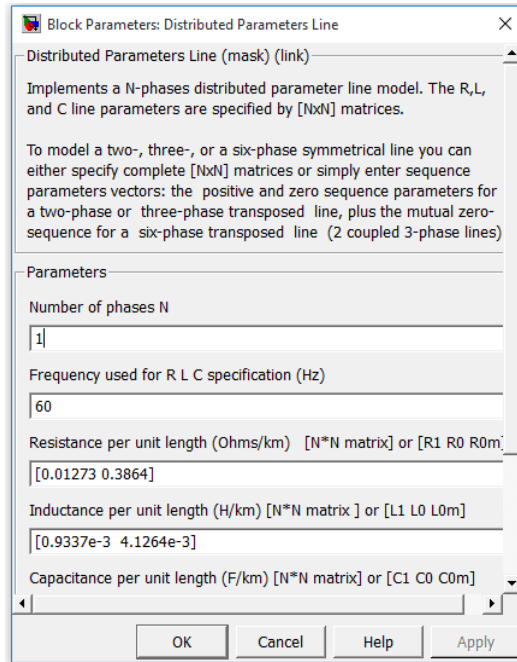


Рисунок 8 - Окно настройки блока DistributedParametersLine

Для имитации процессов включения и выключения линии в схеме используется специальный блок управления ControlSubsystem.

Графики изменения входного  $U_{in}$  и выходного  $U_{out}$  напряжений, а также управляющее ключом воздействие показаны на рисунке 10. Представленные результаты получены при работе линии в режиме холостого хода. Параметры модели:  $R1 = 50 \text{ кОм}$ ,  $R2 = 1 \text{ МОм}$ .

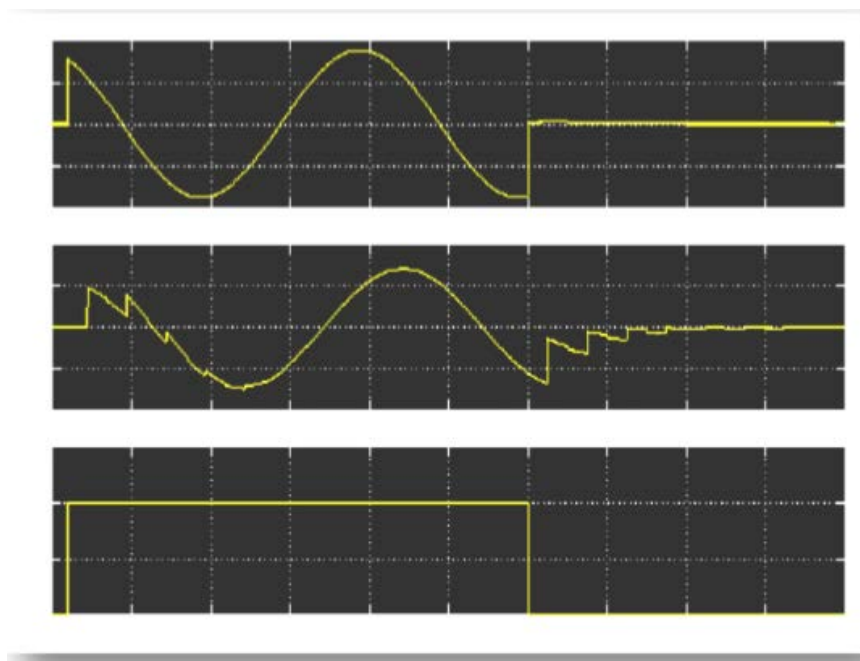


Рисунок 10 - Контрольные результаты моделирования линии с распределенными параметрами

*Программа исследований:*

1. Используя исходную модель (см. рисунок 8), исследовать характер переходных процессов в режиме холостого хода (без нагрузки) и в режимах максимальной нагрузки.

При этом необходимо:

- определить зависимость времени задержки (запаздывания) включения от размера нагрузки;
- определить значение волнового сопротивления линии и размер согласованной нагрузки;
- определить значение скорости распространения электромагнитной волны по линии.

2. Построить SPS –модель и провести необходимые исследования переходных процессов по активной и реактивной мощностям.

При этом необходимо:

- исследовать характер переходного процесса в зависимости от размера и типа нагрузки (активной, индуктивной и емкостной);
- исследовать характер переходного процесса при согласованной нагрузке;

- по результатам моделирования оценить КПД исследуемой линии.

*Методические указания по порядку проведения работы*

1. При оценке значения волнового сопротивления  $Z_v$  следует учитывать, что если  $R_2 \neq Z_v$ , то падающая волна частично пройдет в нагрузку и частично отразится от нее (возникает отраженная волна).

Обычно берут  $R_2 = Z_v$ . Такую нагрузку называют согласованной, при ней отраженная волна отсутствует. Исходя из этого, необходимо экспериментально подобрать значение  $R_2$ , при котором будет отсутствовать отраженная волна.

2. Для исследования переходных процессов по активной и реактивной мощностям необходимо собрать модель, показанную на рисунке 10.

В данной модели резистор  $R_2$  исходной модели (см. рисунок 9) заменяется элементом нагрузки Parallel RLC Load, при настройке которого необходимо указать рабочие номинальное напряжение линии и частоту. Дополнительно в модель вводятся датчики тока  $I_{in}$ ,  $I_{out}$  (SPS компоненты *CurrentMeasurement*) и измерители активной и реактивной мощностей *Active&ReactivePower*, которые находятся в библиотеке ExtraLibrary + Measurements. Использование блока *Active&ReactivePower* предусматривает его настройку по частоте.

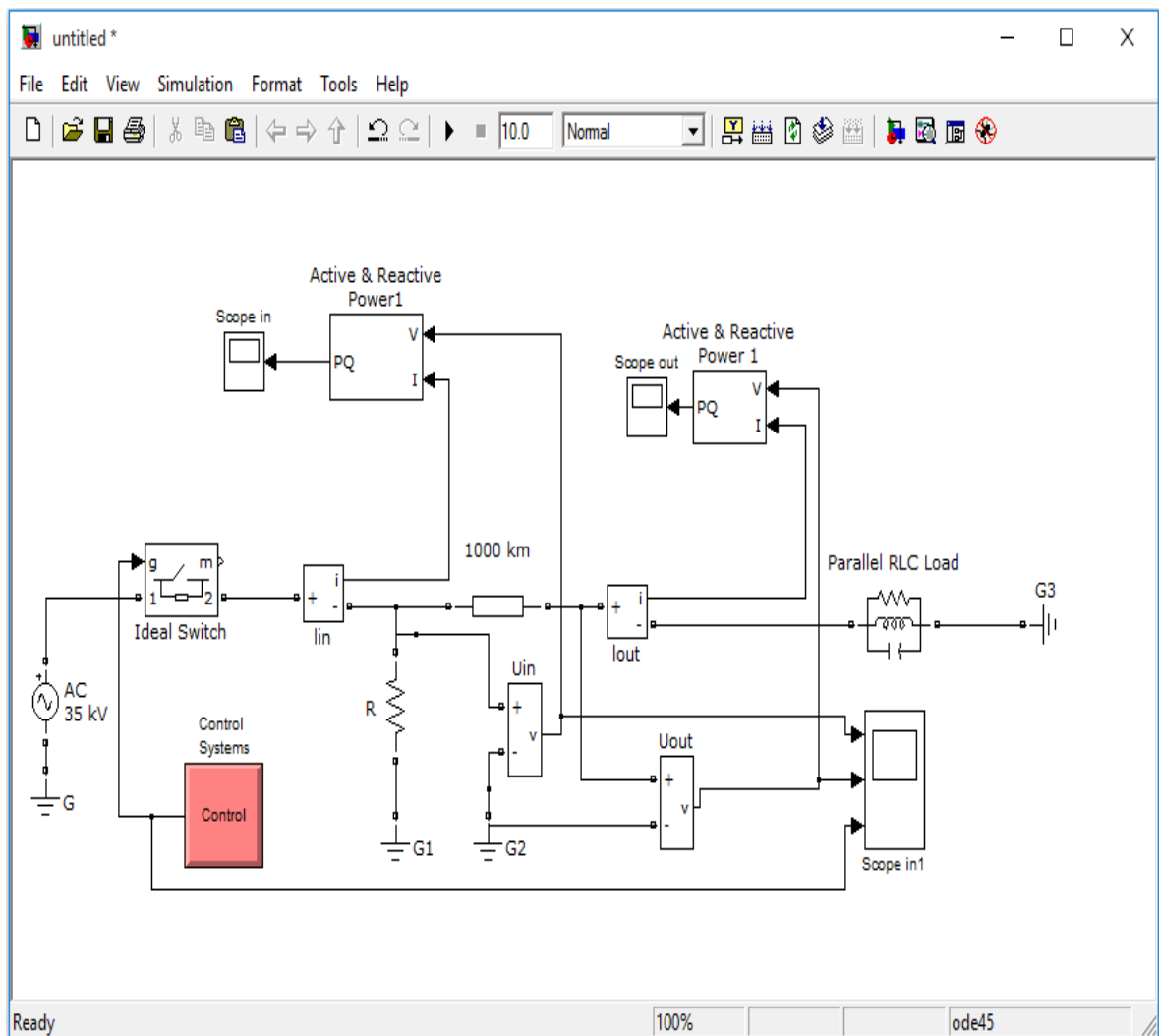


Рисунок 10 - PSB-модель для исследования линии с распределенными параметрами.

3. При необходимости изменения времени управляющих ключом воздействий необходимо произвести перенастройку блоков Step входящих в подсистему ControlSubsystem (рисунок 11).



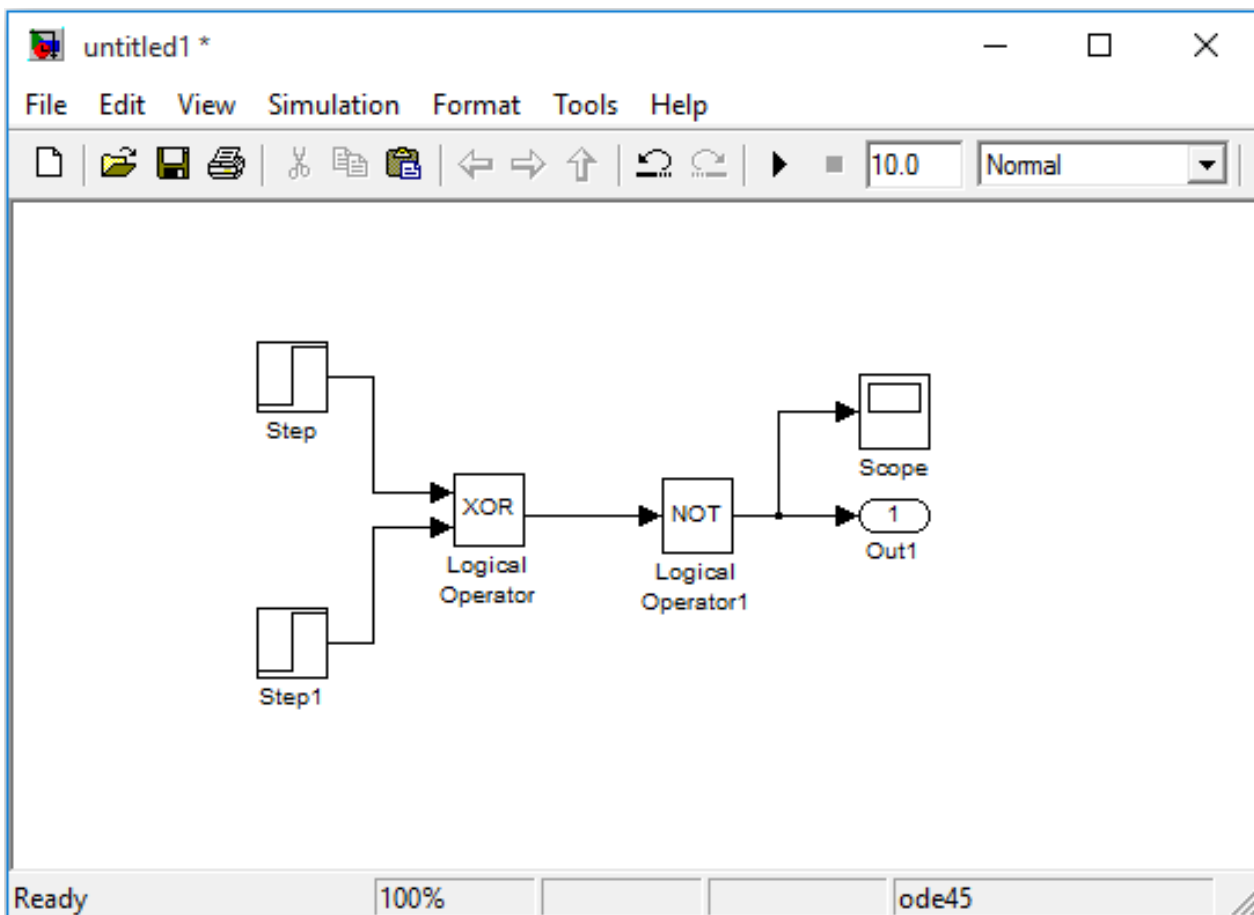


Рисунок 11 - SPS –модель подсистемы ControlSubsystem

## 2.5 Исследование переходных процессов в линейных трансформаторах

*Цель работы:* исследование при помощи имитационных SPS -моделей переходных процессов при включении линейного трансформатора преобразователя однофазного напряжения в трехфазное.

### *Описание объекта исследования*

Используемая для исследования SPS –модель (рисунок 13) находится в файле «LT\_model». Исследуемый компонент LinearTransformer имеет параметры настройки, которых показаны на рисунке 14.

Среди компонент SPS –модель, назначение которых понятно из пояснений к предыдущим лабораторным работам, присутствует блок Breaker.

Этот блок имитирует, обрыв нагрузки в одной из фаз (см. рисунок 15).

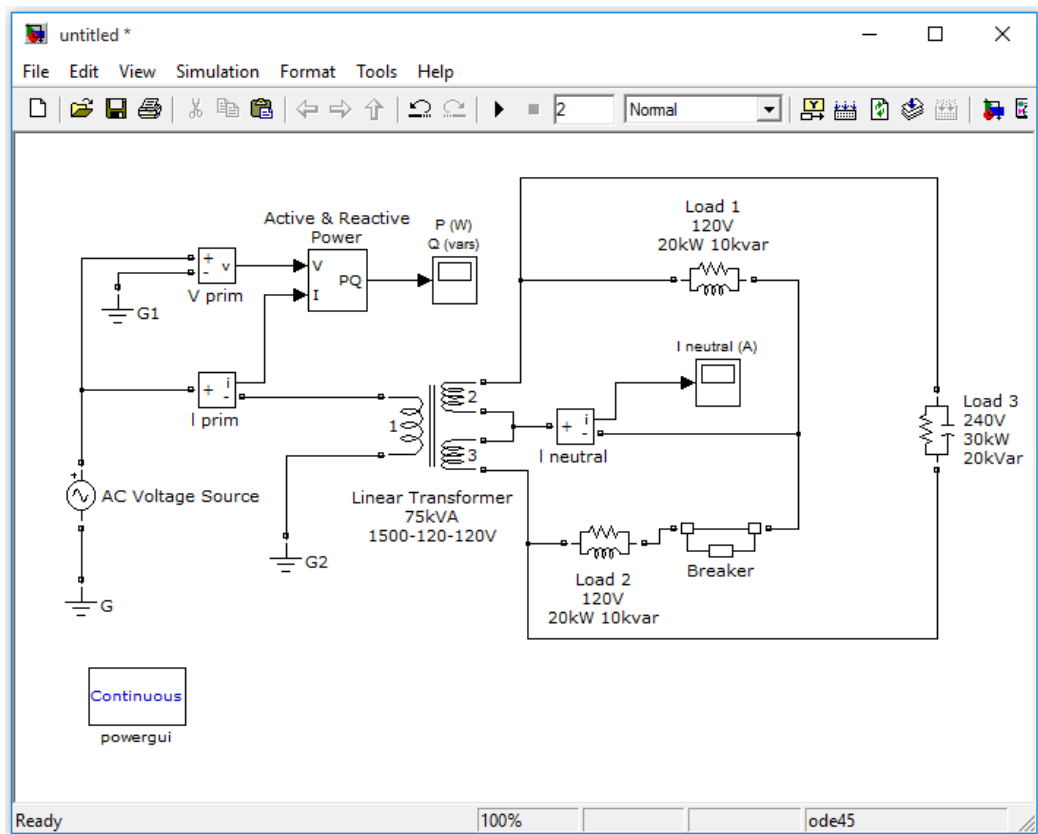


Рисунок 12 - Модель линейного трансформатора

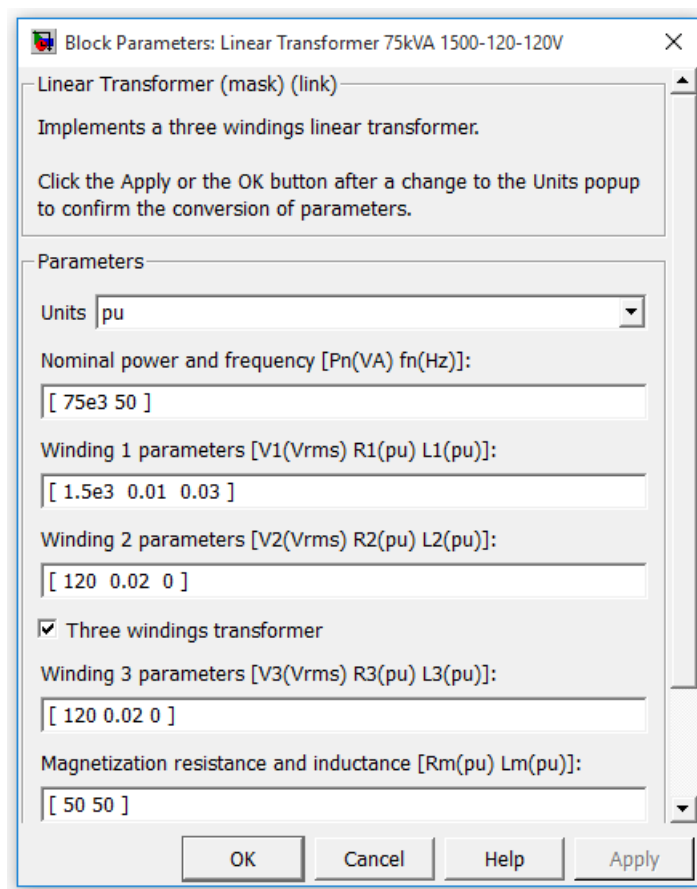


Рисунок 13 - Окно настройки модели линейного трансформатора

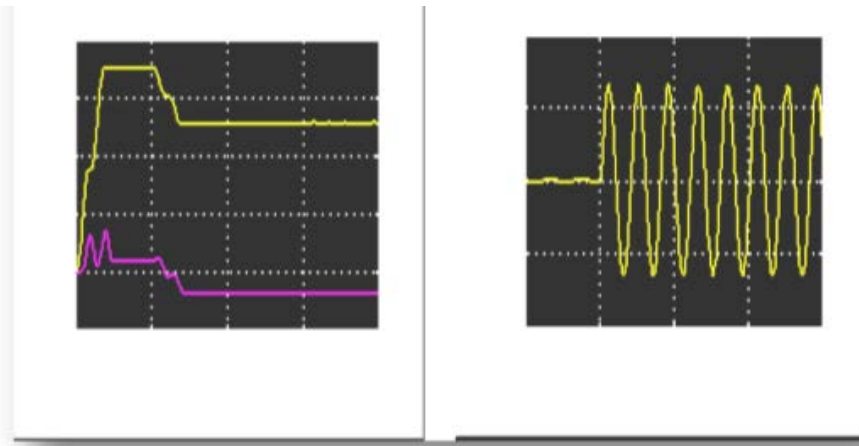


Рисунок 14 - Контрольные осциллограммы процессов

54ъ

*Программа исследований:*

1. Ознакомиться с моделью и изучить настройки блоков SPS –модели.
2. Используя исходную модель, исследовать характер переходных процессов в режиме размыкания прерывателя Breaker.

При этом необходимо:

- определить при начально-заданных нагрузках напряжения, токи и мощности в цепях схемы, а также время установления переходного процесса;
- Повторить эксперименты п.п. 4.1, но при индуктивных и емкостных нагрузках.

3. Исследовать переходные процессы в режиме включения трансформатора при номинальной нагрузке и в режиме холостого хода. При этом отследить, как переходные процессы зависят от фазы питающего напряжения в момент включения.

4. Повторить эксперименты п.п. 3 при различных видах нагрузки: активной, индуктивной и емкостной.

*Методические указания по порядку проведения работы:*

1. Для выполнения п.п. 2 программы исследований в исходную модель дополнительно требуется ввести необходимые датчики тока CurrentMeasurement и напряжения VoltageMeasurement, а также средства отображения получаемой информации Scope.

2. При выполнении п.п. 3 и 4 программы исследований в исходной модели исключается прерыватель Breaker и дополнительно вводится ключ, который имитирует процесс включения первичной обмотки трансформатора. Необходимый ключ и управляющий контроллер можно скопировать из модели рисунка 1 применяемой в лабораторной работе №2 (см. рисунок 16.) Схема подключения трансформатора указана на рисунке 15.

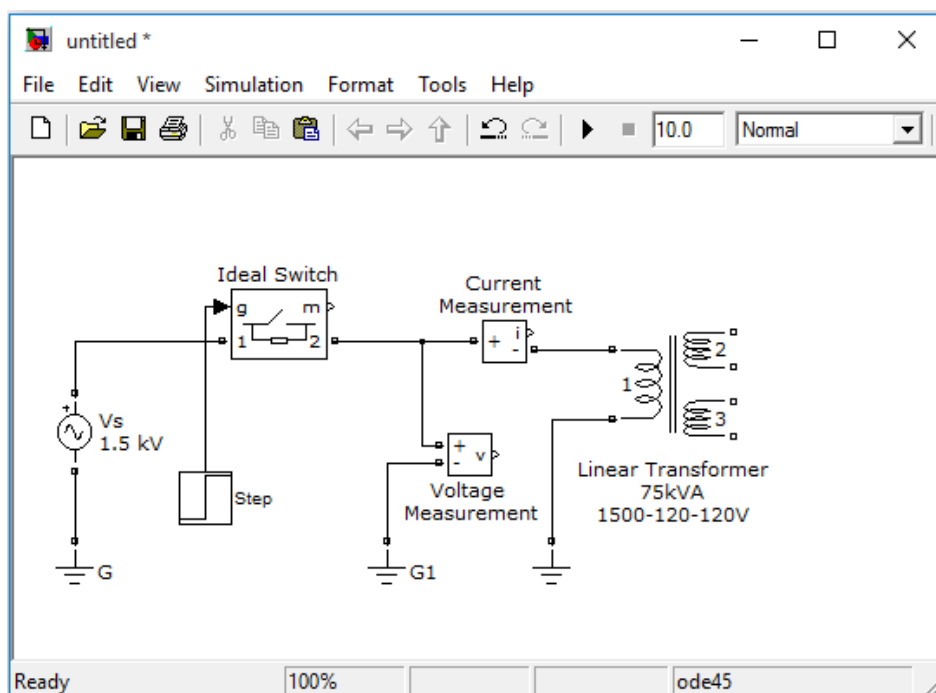


Рисунок 15 - Схема подключения трансформатора.

3. При выполнении лабораторной работы значения нагрузок задавать после предварительных консультаций с преподавателем.

## 2.6 Исследование переходных процессов в трехфазных асинхронных двигателях

*Цель работы:* исследование при помощи имитационных SPS-моделей переходных процессов при пуске трехфазных асинхронных электрических машин.

*Описание объекта исследования*

Используемая для исследования PSB-модель (см. рисунок 17) находится в файле «AS\_Mashin1».

В состав модели входят следующие основные блоки/модели из состава библиотек SIMPOWERSYSTEM.

*Inductivesourcewithneutral* - трехфазный генератор переменного напряжения, SPS –модель которого показана на рисунке 17. Используемые в работе настройки генератора приведены на рисунке 18.

*Tree-Phase V-I Measurement* - блок датчиков тока и напряжения для измерений во входных цепях асинхронной машины.

Исходная (входящая в состав библиотеки ExtraLibrary\Measurements) схема подключения датчиков приведена на рисунке 17.

Для удобства работы и вывода результатов непосредственно в значениях мгновенных токов и напряжений в данном блоке следует исключить компоненты  $K_i$  и  $K_v$ , с помощью которых осуществляется нормирование, также в модель полезно ввести панель вывода данных POWERGUI. Преобразованный подобным образом блок *Tree-Phase V-I Measurement* не требует каких-либо настроек.

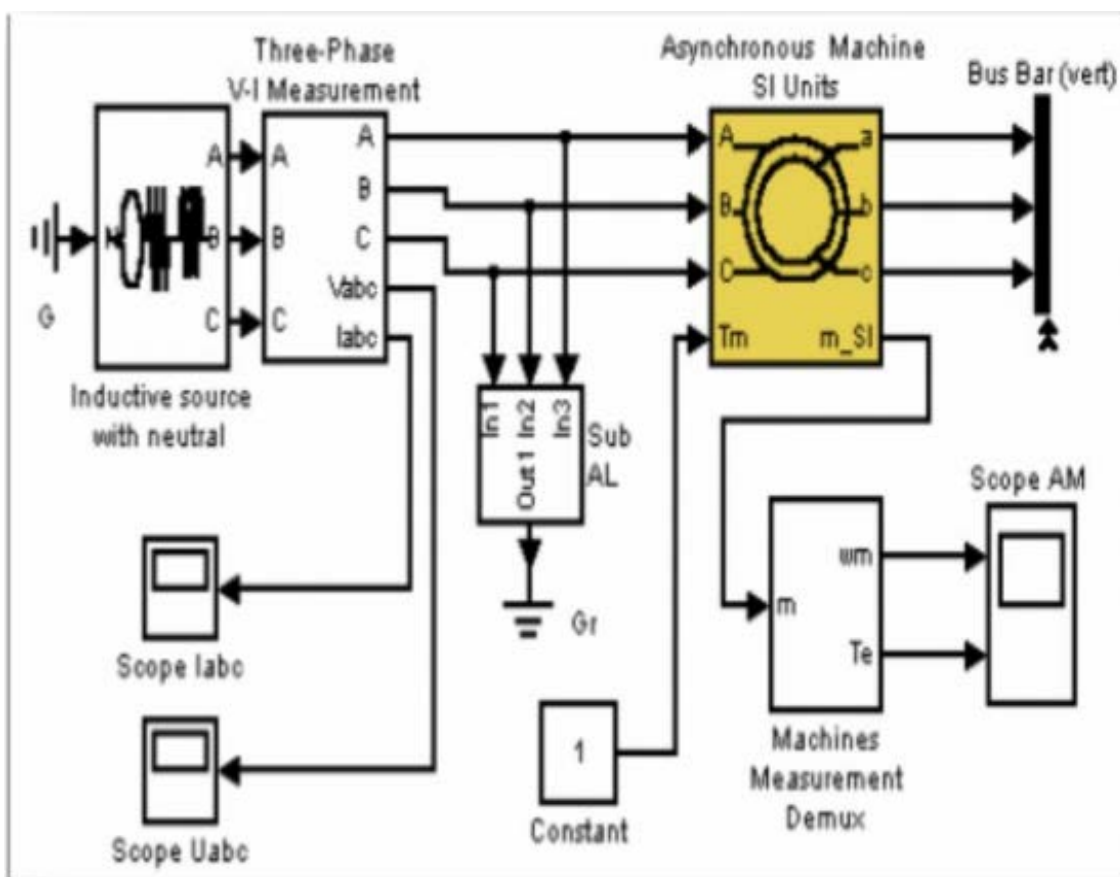


Рисунок 16 - PSB-модель асинхронной машины

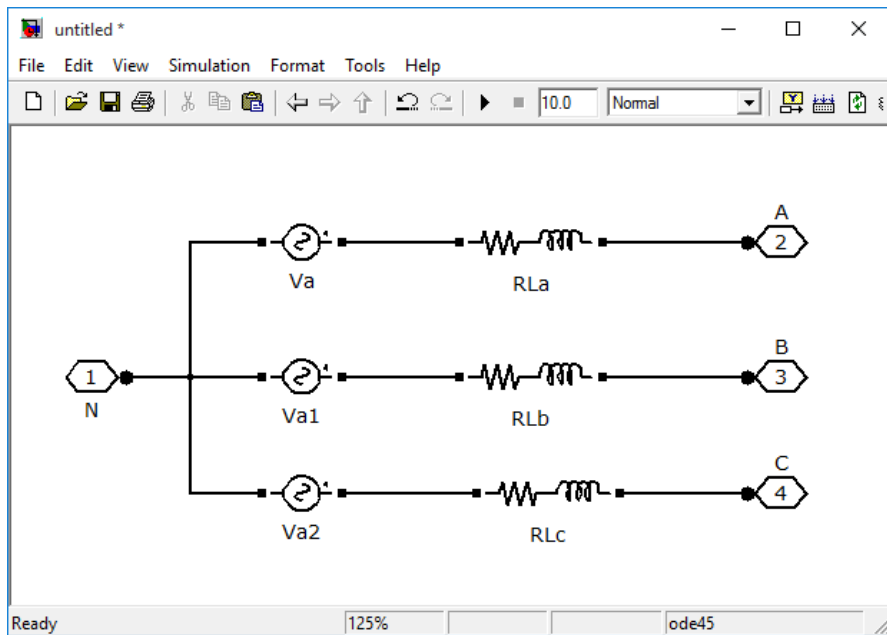


Рисунок 17 - SPS –модель блока Inductivesourcewithneutral

Asynchronous Machine SI Units— модель трехфазной асинхронной машины, обмотки статора которой обозначены буквами ABC, а ротора abc. Настройка параметров модели выполняется согласно рисунку 18.

Для задания нагрузочного момента к входу Tm подключен блок Constant.

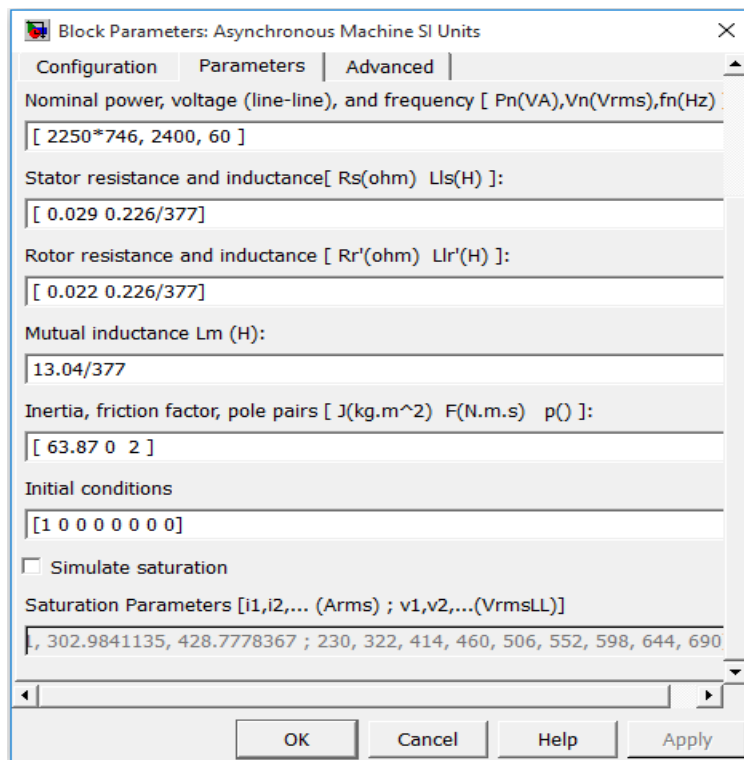


Рисунок 18 - Окно настроек блока AsynchronousMachineSIUnits

Machines Measurement Demux - селектор измеряемых параметров исследуемой асинхронной машины. Выбор необходимых параметров осуществляется из меню, представленного на рисунке 19.

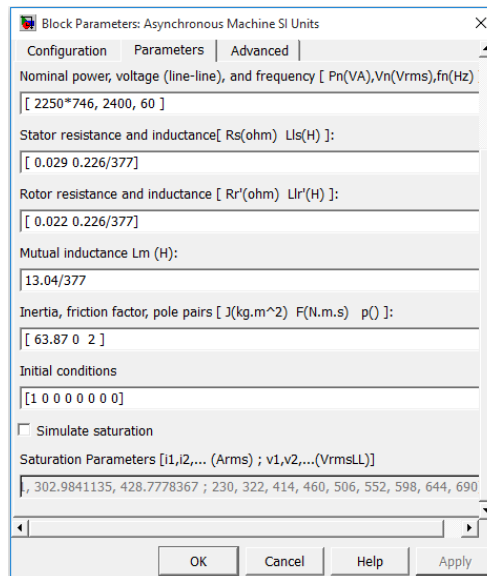


Рисунок 19 - Окно настройки блока измерений параметров машины Machines Measurement Demux

Кроме того, модель содержит стандартные схемы отображения информации из библиотеки Simulink и подсистему SubAL, которая имитирует потери в соединительных проводах. Включение этой подсистемы необходимо для корректной работы модели. Правильность настройки исходной модели можно проконтролировать по временным диаграммам на осциллографе Scope AM, которые показаны на рисунке 20.

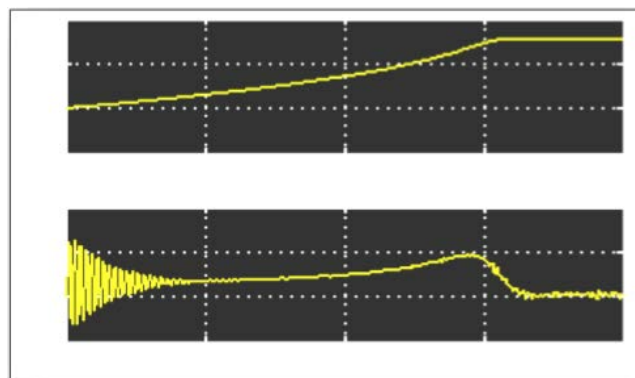


Рисунок 20 - Контрольные осциллограммы работы асинхронной машины

*Программа исследований:*

1. Используя исходную модель, исследовать характер переходных процессов в режиме холостого хода (без нагрузки) и в режиме максимальной нагрузки.

При этом необходимо:

- определить зависимость времени разгона двигателя от значения вращающего момента на валу;
- определить зависимость установившейся скорости вращения от значения вращающего момента на валу;
- построить графики изменения мгновенных и действующих значений токов и напряжений в обмотках статора асинхронной машины при различных нагрузках в режиме пуска;
- построить графики изменения активной и реактивной мощности в обмотках статора асинхронной машины при различных нагрузках в режиме пуска.

2. Исследовать характер переходных процессов в асинхронной машине при различных значениях выходных параметров трехфазного генератора, посредством которых имитируется мощность сети питания.

Соответствующие исследования провести для параметров и характеристик, указанных выше.

3. Используя возможности подсистемы Sub AL для имитации компенсирующих конденсаторных батарей, исследовать характер переходных процессов в асинхронной машине при различных значениях емкости компенсирующих конденсаторов. При этом исследования провести для параметров и характеристик, указанных в п.п. выше.

*Методические указания по порядку проведения работы*

1. Для измерения скорости вращения выходного вала об/мин к исходной модели добавить блоки нормирования (Gain) и цифрового измерения



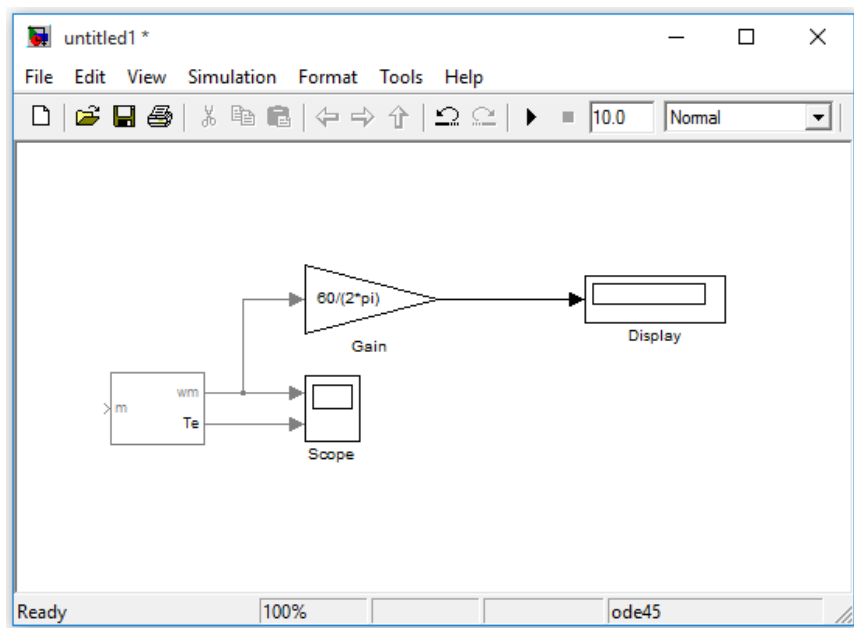


Рисунок 21 - Блоки для измерения скорости вращения вала об/мин

2. Для измерения в переходном режиме действующих значений напряжений и токов в обмотках статора в исходной модели сделайте следующие дополнения. К выходам блока Tree-Phase V-I Measurement подключите демультиплексоры, которые имеются в библиотеке Simulink \ Signals&Systems. Пример демультиплексирования и 1074 вектора  $I_{abc}$  показан на рисунке 22.

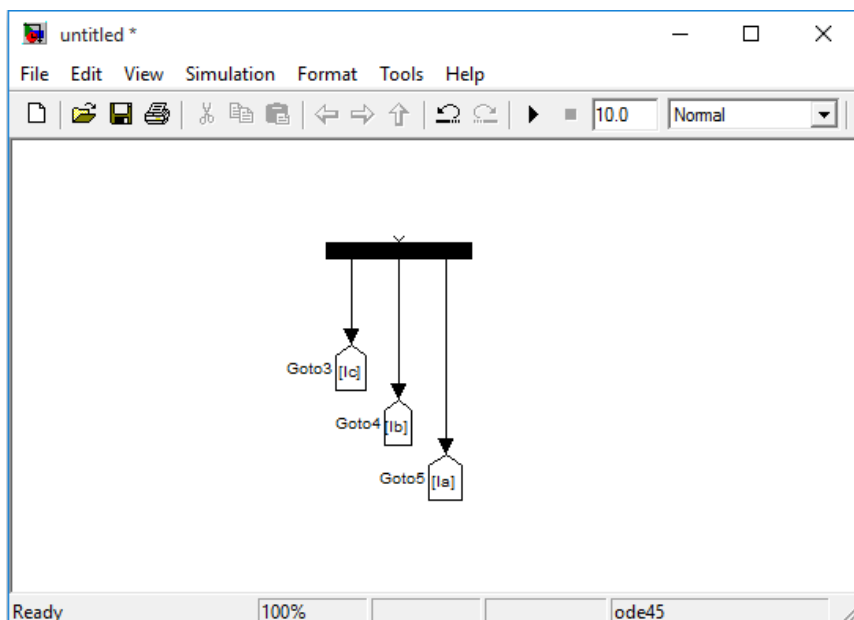


Рисунок 22 - Демультиплексор вектора данных  $I_{abc}$

Используя информацию с выходов компонент Goto и блоки измерения действующих значений (RMS) из библиотеки ExtraLibrary\Measurements,

организовать подсистемы для измерения соответствующих токов и напряжений. В качестве примера на рисунке 23 показана схема для измерения действующих значений фазных токов.

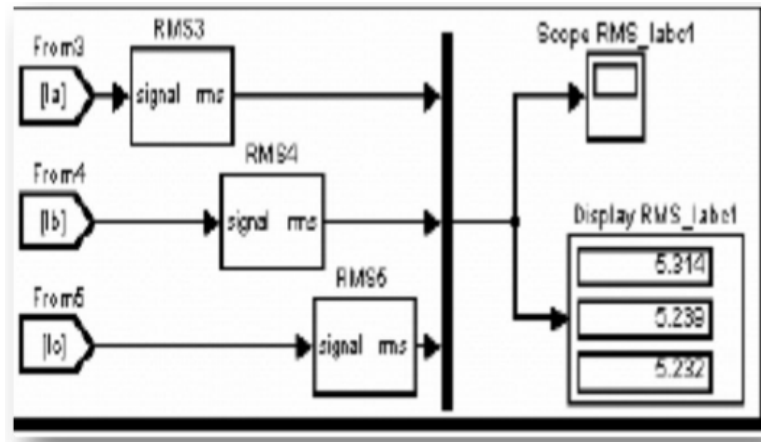


Рисунок 23 - Блок-диаграмма модели для измерения временных зависимостей действующих значений токов Iab

На рисунке 24 приведен характерный пример изменения токов в момент пуска асинхронной машины.

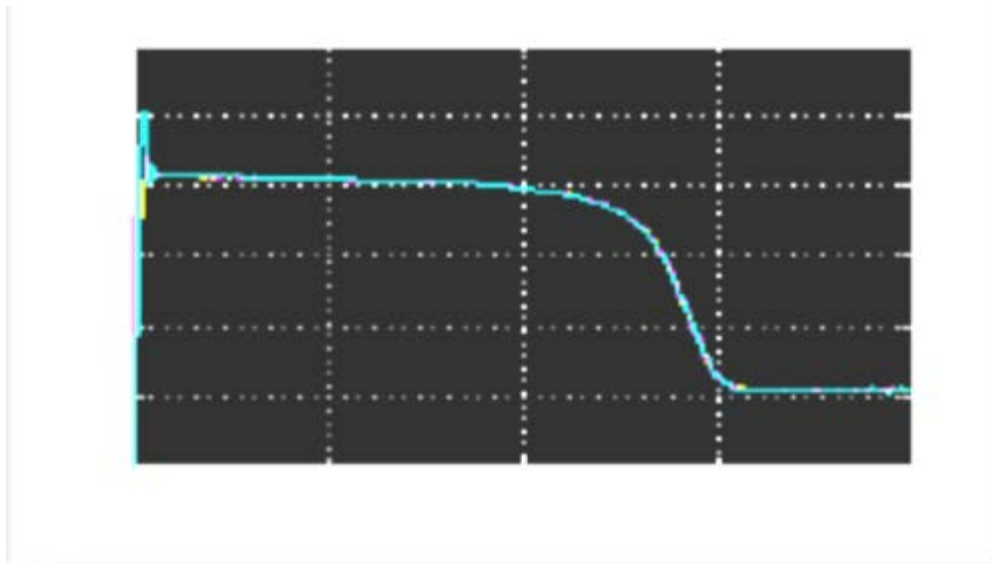


Рисунок 24 - Осциллограммы действующих значений токов Iabc

3. Для измерения в переходном режиме активной и реактивной мощности используйте информацию с выходов компонент Goto и блоки измерения Active&ReactivePower из библиотеки ExtraLibrary \ Measurements.

Пример организации подсистемы для измерения суммарных активных и реактивных мощностей показан на рисунке 25, а характерные кривые изменения P и Q приведены на рисунке 26.

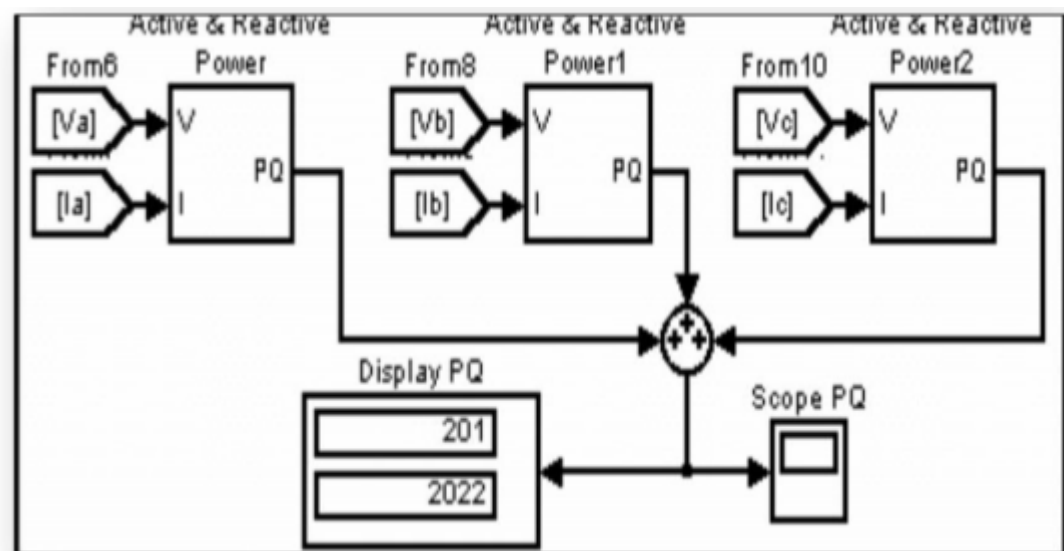


Рисунок 25 - Подсистема для измерения активной и реактивной мощностей

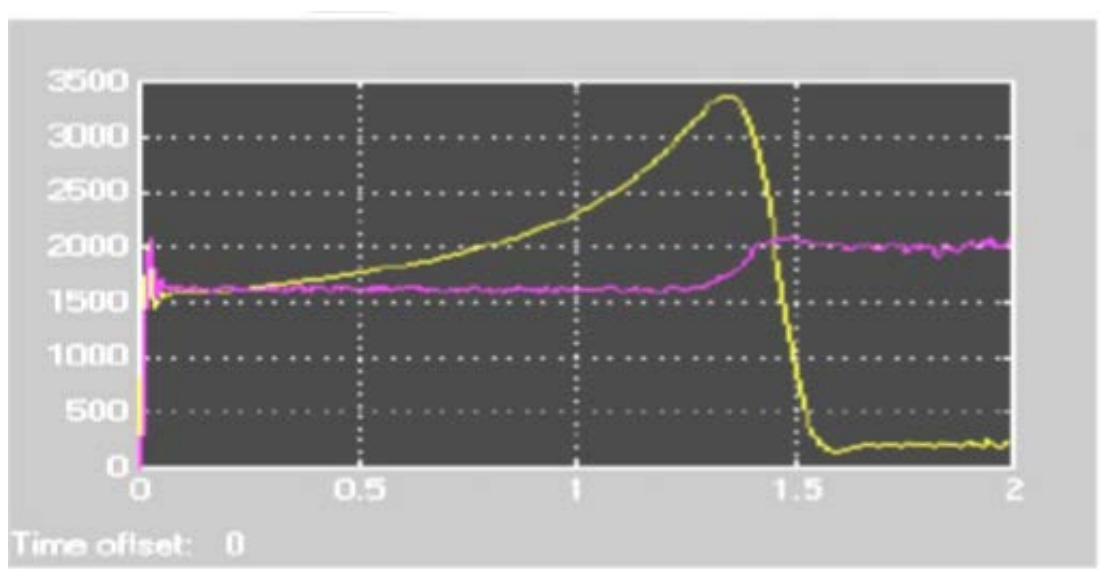


Рисунок 26 - Графики изменения активной и реактивной мощностей

## 2.7 Исследование переходных процессов в двигателе постоянного тока

*Цель работы:* исследование переходных процессов при пуске двигателя постоянного тока.

*Описание объекта исследования*

Используемая для исследования SPS-модель (рисунок 28) находится в файле «DC\_motor».

*Объект исследования* - электрический двигатель постоянного тока моделируется посредством подсистемы DC\_motor, содержание которой показано на рисунке 27, а соответствующее окно настройки параметров модели на рисунке 28.

В используемой модели входы A+ и A- являются входами обмотки якоря, а входы F+ и F- моделируют обмотку возбуждения.

Вход TL воспринимает нагрузочный момент на валу, а выход m, представленный в виде четырехмерного вектора обеспечивает вывод информации о параметрах работы двигателя:

- о частоте вращения вала  $\omega$ ;
- о токе якоря  $I_a$ ;
- о токе обмотки возбуждения  $I_f$ ;
- о вращающем моменте  $T_e$ .

Как видно из рисунка 27, рассматриваемая модель учитывает индуктивности и сопротивления потерь в обмотках ротора и статора.

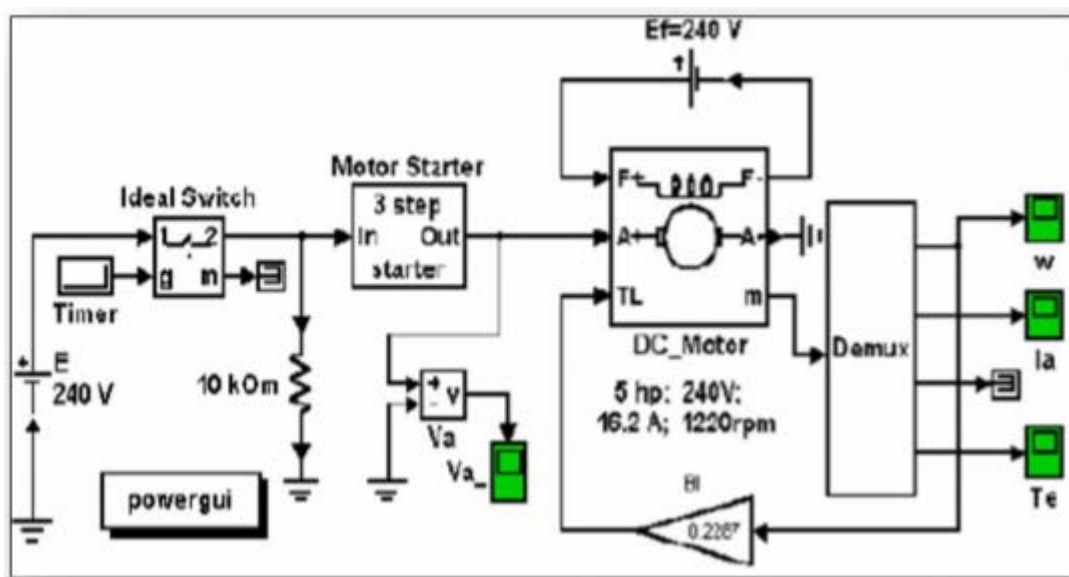


Рисунок 27 - Модель электродвигателя постоянного тока

Указанные на рисунке 29 параметры настройки моделируют двигатель мощностью 5 л.с. с номинальной частотой вращения 1220 об. / мин.

Процесс «включения» двигателя осуществляется блоком IdealSwitch с управляющим таймером и подсистемой MotorStarter, состав которой показан на рисунке 30. Таким образом, имитируется типовая схема пуска

электродвигателя постоянного тока, которая предусматривает включение в начальный момент в цепь якоря балластных сопротивлений и их отключение в процессе разгона двигателя. В рассматриваемой модели нагрузочный момент на валу моделируется как зависящий от скорости вращения вала.

Контрольные осциллограммы работы модели приведены на рисунке 31 и рисунке 32.

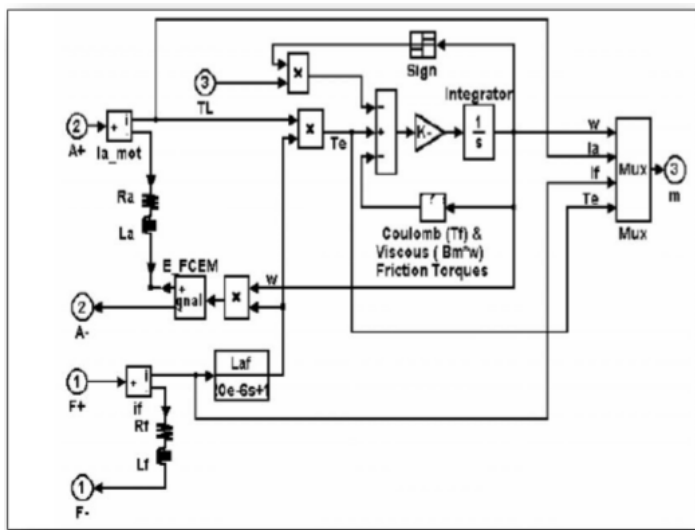


Рисунок 28 - Подсистема DC\_motor

Parameters	
Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)]	[ 0.6 0.012 ]
Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)]	[ 240 120 ]
Field-armature mutual inductance Laf (H) :	1.8
Total inertia J (kg.m <sup>2</sup> )	1
Viscous friction coefficient Bm (N.m.s)	0
Coulomb friction torque Tf (N.m)	0
Initial speed (rad/s) :	1

Рисунок 29 - Окно настройки параметров модели DC\_motor

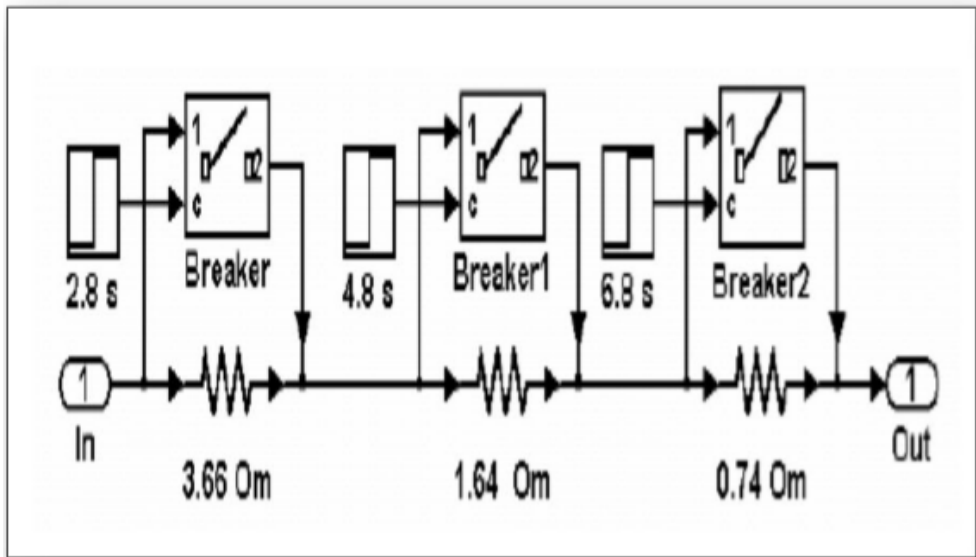


Рисунок 30 - SPS -модель подсистемы MotorStarter

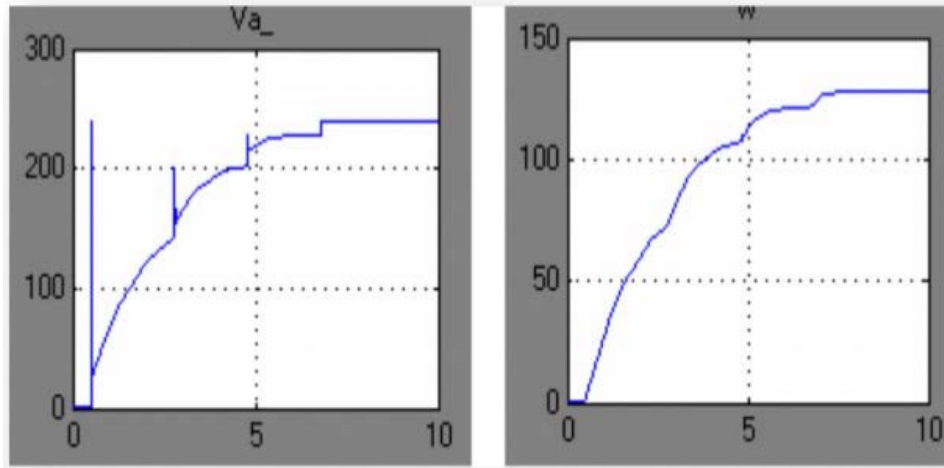


Рисунок 31 - Графики переходных процессов

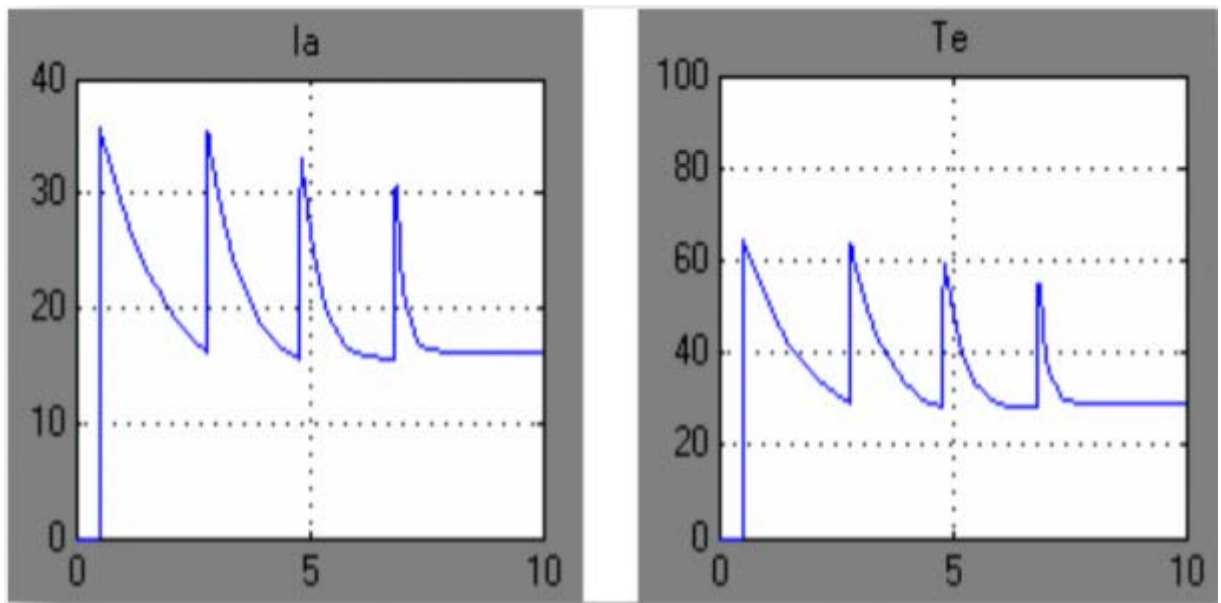


Рисунок 32 - Графики переходных процессов

### *Программа исследований*

1. Используя исходную модель, исследовать характер переходных процессов в режиме холостого хода (без нагрузки) и в режиме максимальной нагрузки.

*При этом необходимо:*

- определить зависимость времени разгона двигателя от значения вращающего момента на валу;
- определить зависимость установившейся скорости вращения от значения вращающего момента на валу;
- построить графики изменения мгновенных и действующих значений токов и напряжений в обмотках при различных нагрузках в режиме пуска;
- построить графики изменения активной и реактивной мощности в обмотках при различных нагрузках в режиме пуска.

2. Исследовать характер переходных процессов в машине постоянного тока при различных значениях мощности сети питания.

3. Исследовать характер переходных процессов в машине постоянного тока при различных значениях момента нагрузки на валу двигателя.

*Методические указания по порядку проведения работы.*

1. Для проведения измерений характеристик переходных процессов согласно п. 1 необходимо из исходной модели исключить блок В1 и, используя блок Constant из Simulink-библиотеки Sources, задавать необходимые значения момента ТL на валу двигателя.

2. Все необходимые измерения параметров и характеристик выполнять, используя методические указания к предыдущим работам.

### **3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН**

#### **3.1 Сравнение различных технологий проведения лабораторных работ: метода натурального эксперимента и виртуального лабораторного практикума**

Лабораторный практикум является важнейшим, базовым компонентом процесса обучения при подготовке инженерных кадров. Цели практикума во всех случаях примерно одинаковы. Это помощь в усвоении теоретического материала, изучение экспериментальных методик и методов обработки результатов измерений. Это также знакомство с конкретными приборами, установками, электрическими схемами.

При этом лабораторная работа – это не просто разглядывание установки и работы приборов, а активно выполняемая работа. На сегодняшний день в учебном процессе применяются различные технологии проведения лабораторных работ. Наиболее распространенными из них являются метод натурального эксперимента и виртуальный лабораторный практикум.

При традиционном методе проведения лабораторных работ – на реальных лабораторных стендах – студент проводит эксперимент на реальном оборудовании, имеет возможность увидеть, «почувствовать» данное оборудование; получаемые в ходе выполнения данные имеют естественную физическую природу. Но при этом наблюдается и ряд существенных недостатков – организационно-методических и сугубо технических, снижающих эффективность процесса обучения.

Во-первых, существует организационный и временной разрыв между этапом подготовки к выполнению лабораторной работы, который обычно планируется на внеаудиторную самостоятельную работу студентов, и



этапами выполнения и контроля. В условиях слабого развития у студентов умения работы с литературой, недостатка времени и в силу ряда других факторов большинство студентов приходит на лабораторный практикум неподготовленными, что негативно сказывается и на эффективности выполнения последующих этапов лабораторной работы. Многочисленные попытки объединить все три этапа в целостный процесс в рамках одного традиционного лабораторного занятия приводят к существенному дефициту учебного времени для реализации полноценного процесса обучения.

Во-вторых, при выполнении лабораторной работы неподготовленный студент может получить частные экспериментальные результаты, не поняв общую картину изучаемого физического явления, что приводит к низкой эффективности использования учебного времени и самого процесса обучения. Кроме того, лабораторная база объективно физически и морально устаревает, вследствие чего происходит периодический выход из строя различных компонентов лабораторных стендов, и при выполнении лабораторных работ студенты большую часть времени тратят не на проведение эксперимента, а на поиск неисправностей.

Необходимо также отметить высокую стоимость лабораторного оборудования.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод: устаревшая, традиционно применяемая методика проведения лабораторных работ в силу присущих организационно-методических, технико-экономических недостатков и ограниченности применения делает ее малоэффективной для дальнейшего использования.

В этом смысле появление виртуальных лабораторных практикумов позволило объединить все три этапа проведения лабораторной работы в единый процесс в течение одного лабораторного занятия. При этом подготовительный этап, выполняемый на компьютере с помощью виртуальной лабораторной работы, позволяет быстро и эффективно подойти к пониманию сущности изучаемого явления и его изменениям при

варьировании теми или иными его параметрами. Сегодня применение виртуального лабораторного практикума стало неотъемлемой частью образовательного процесса при подготовке инженерных кадров.

Существует несколько подходов к созданию виртуальных лабораторных работ:

1. Виртуальный лабораторный практикум разрабатывается с применением различных языков программирования высокого уровня (Visual C, Visual Basic, Delphi и т.д.). Преимуществом данного подхода является максимальная конкретизация конечного продукта применительно к изучаемой дисциплине. Отрицательной стороной являются большая трудоемкость разработки программного продукта и «закрытость» полученного программного продукта.

2. Виртуальный лабораторный практикум разрабатывается с применением современных инструментальных средств (Labview, Demoshield, Stratum и т.д.). Это наиболее эффективный и перспективный подход, позволяющий в сжатые сроки разработать комплекс виртуальных лабораторных работ. Оперативность разработки обусловлена наличием большого количества готовых средств для моделирования, интерфейсного и информационного наполнения.

3. Виртуальный лабораторный практикум разрабатывается с применением моделирующих программ (Electronics Workbench, MatLAB, MicroCAP, Multisim и т.д.). Сложность данного подхода заключается в проблематичности качественного интерфейсного оформления работ и в необходимости владения специализированными языками программирования.

Методически грамотно организованный эксперимент способствует как формированию практических умений, так и активизации теоретических знаний, полученных ранее. В процесс обучения вовлекаются различные каналы восприятия (слух, зрение, осязание, обоняние и т.д.). Это позволяет организовать полученную информацию, как систему ярких образов и заложить ее в долговременную память. С другой стороны, подготовка и

проведение лабораторных работ являются довольно непростым делом и требуют от преподавателя знания некоторых методических особенностей, в значительной степени зависящих от наличия тех или иных приборов и инструментов. Частично эти и другие проблемы можно решить, используя при обучении компьютерный эксперимент (виртуальный лабораторный практикум). Под данным термином понимается лабораторная работа, проводимая полностью на компьютере, без использования других технических средств обучения. Некоторые эксперименты, проводимые в области компьютеризации учебного процесса, показывают, что применение компьютерного эксперимента позволяет существенно сократить время, которое тратится на рутинную работу (варьирование параметров эксперимента путем изменения схемы установки, расчета результатов измерения) и, тем самым высвобождая время для более серьезного уяснения целей и задач проводимого эксперимента. Кроме того, появляется возможность продемонстрировать опыты, которые невозможно провести в условиях учебного кабинета. Однако при всей привлекательности и несомненной дидактической выгоде компьютерного эксперимента в обучении остаются нерешенными некоторые проблемы.

Во-первых, восприятие информации учащимся существенным образом отличается от того, как это происходит при выполнении традиционной лабораторной работы. В частности, сенсорно-моторный этап практически отсутствует (все действия студенты выполняют посредством клавиатуры или «мышки», но не имеют дело с реальными объектами). Без данного этапа восприятие не может быть полноценным. Следовательно, неполноценным может оказаться и преподавание соответствующей дисциплины.

Во-вторых, возникает проблема получения политехнических навыков работы с реальными приборами и установками. Очень важна и все еще мало исследована проблема формирования адекватного представления о мире при работе с нереальными объектами. Частично эту проблему можно решить,

используя в процессе обучения программные продукты, максимально точно отображающие процессы и явления, происходящие в реальном мире.

### **3.2 Применение программного пакета MatlabSimulink в процессе обучения студентов электротехнических специальностей**

Создание математических моделей для анализа установившихся и нестационарных процессов в разветвленных электрических цепях, устройствах преобразовательной техники и системах информационного назначения является неотъемлемой частью современного процесса обучения студентов электротехнических специальностей.

Математическое и имитационное моделирование позволяют исследовать электромагнитные процессы в электрических устройствах, оптимизировать их параметры и разработать предпочтительные алгоритмы управления. Наиболее мощным средством имитационного моделирования электротехнических устройств, систем энергетики является программный пакет MatlabSimulink.

Данный пакет представляется студентам как новый инструмент для освоения основ электротехники (линейные и нелинейные цепи, магнитные цепи, переходные процессы в электрических цепях) и электроники (управляемые выпрямители, транзисторные усилители), углубленного изучения машинных методов анализа режимов электротехнических устройств (трансформаторы, двигатели постоянного и переменного тока, генераторы).

Применение данной программы при высокой степени наглядности позволяет расширить границы физического эксперимента. Рациональное сочетание «виртуального» и «физического» экспериментов позволяет значительно расширить тематику лабораторных исследований по всем основным разделам электротехнических дисциплин.

При подготовке инженера важную роль в освоении технических наук играет лабораторный практикум, целью которого является

экспериментальная проверка теоретических положений, формирование практических умений и навыков работы с реальными физическими объектами и оборудованием, а также привитие навыков экспериментальных исследований и обработки полученных результатов.

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что в настоящее время во всем мире ведется активная разработка и внедрение виртуальных лабораторий в учебный процесс.

### **3.3 Возможность использования компьютерных виртуальных лабораторий для проведения лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ)**

В настоящее время существует множество компьютерных программ для моделирования, проектирования и расчетов электрических схем, которые используются в учебном процессе. Программа изучения теоретических основ электротехники студентами электротехнических специальностей предусматривает курс лекций, проведение практических и лабораторных занятий.

Лабораторная работа – это выполнение студентами по заданию преподавателя опытов с использованием приборов, применением инструментов и других технических приспособлений, т. е. это изучение студентами каких-либо явлений с помощью специального оборудования.

Лабораторные работы по теоретическим основам электротехники проводятся на реальных физических макетах, которые имеют ряд существенных ограничений.

Во-первых, они недостаточно универсальны, а их количество ограничено.

Во-вторых, при несоблюдении правил техники безопасности работа на них опасна для самой установки и для студентов. Также работы на таких

установках выполняются группой из нескольких человек, что ограничивает возможность дать индивидуальное задание каждому студенту.

Поэтому необходимо расширить возможности студентов при освоении теоретических основ электротехники с помощью различных технологий.

Рассмотрим на примере использования MATLAB Simulink выполнение индивидуального задания при подготовке к лабораторной работе «Исследование процессов в RL и RC цепях переменного тока».

Виртуальные приборы и оборудования для проведения виртуального эксперимента представлены на рисунке 33.

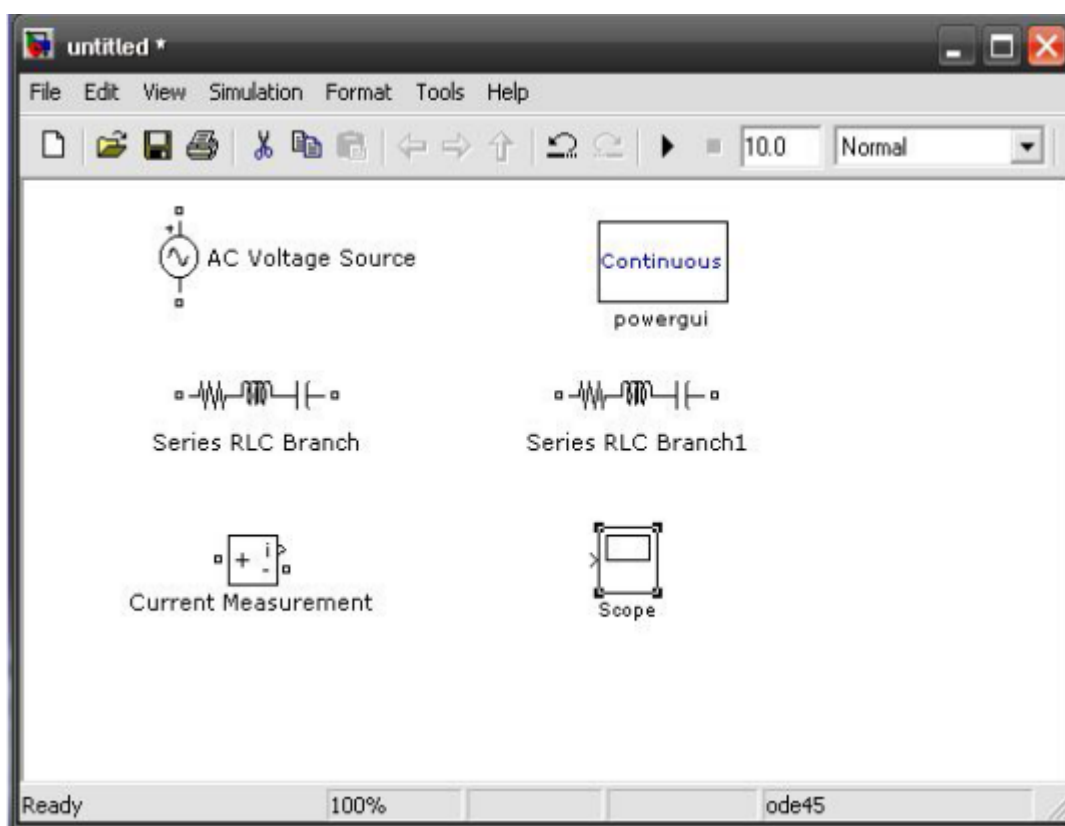


Рисунок 33 - Окно программы – виртуальные приборы и оборудование

Они содержат источник синусоидального напряжения (AC Voltage Source), последовательные RLC-цепи (Series RLC), измерительные приборы (Voltage Measurement, Current Measurement, Multimetr, powergui), элементы соединения (Ground input, Ground output) и элемент для вывода на экран графических зависимостей (Scope).

Исследование процессов в RC-цепи переменного тока реализуется с помощью модели, представленной на рисунке 34.

Параметры источника задаются в окне задания, где можно выбрать необходимую амплитуду напряжения на выходе источника в вольтах, начальную фазу в градусах и частоту в герцах. Параметры RC-элементов задаются в блоке Series RLC. В поле Measurement выбираются величины, подлежащие измерению блоком Multimetr. Во всплывающем меню этого поля можно задать измерение только напряжения, только тока, напряжения и тока, а можно вообще отказаться от измерений в зависимости от поставленной задачи.

Окно блока графического интерфейса пользователя (powergui) показано на рисунке 35. При включенном флажке Measurement в поле блока отражаются измеряемые величины, в частности представлены результаты измерения действующего напряжения и тока, начальные фазы при последовательном соединении RC-цепи.

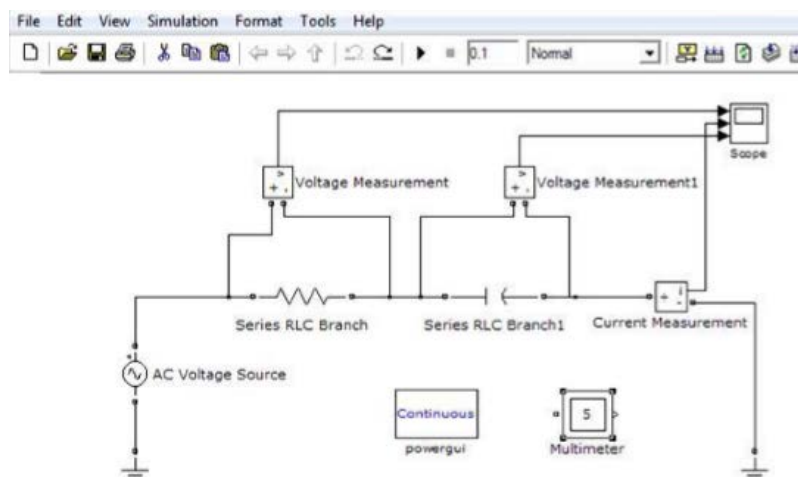


Рисунок 34 - Модель исследования RC-цепи переменного тока

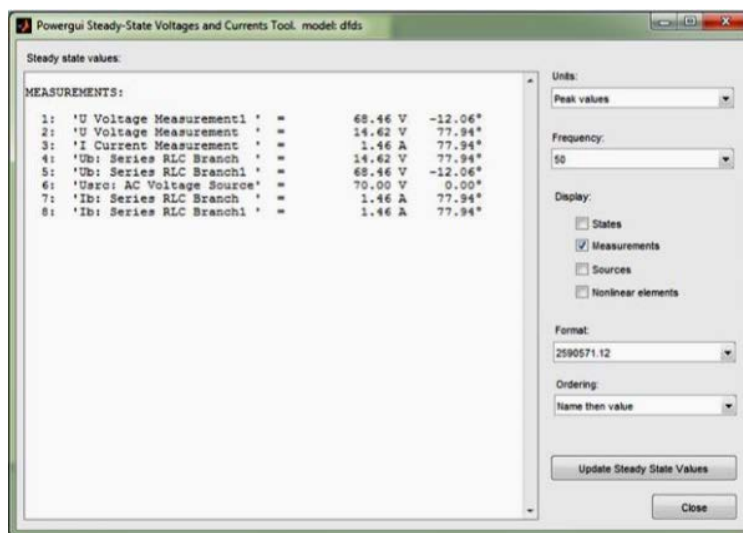


Рисунок 35 - Окно блока графического интерфейса пользователя (powergui)

Для самостоятельного исследования данных процессов параметры элементов задаются студентам по вариантам в методических указаниях по выполнению лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники». Результаты измерений и вычислений необходимо занести в таблицу. Мгновенные значения напряжения на емкости и активном сопротивлении и тока, через них проходящего, наблюдаются при настройке блока Multimetr. На рисунке 36 приведены графики исследуемых величин.

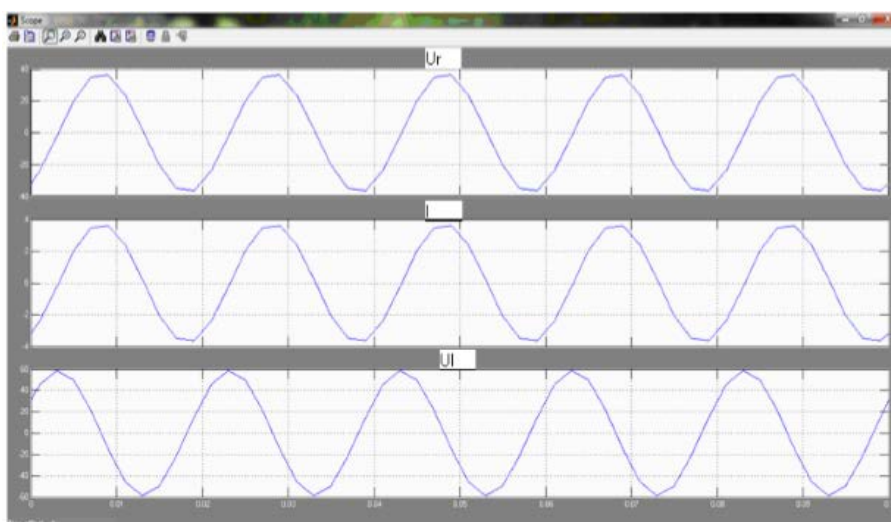


Рисунок 36- Графики исследуемых величин

Описание исследования процессов в RL-цепи переменного тока (рисунки 37, 38, 39) является аналогичным описанию исследования процессов в RC-цепи переменного тока.



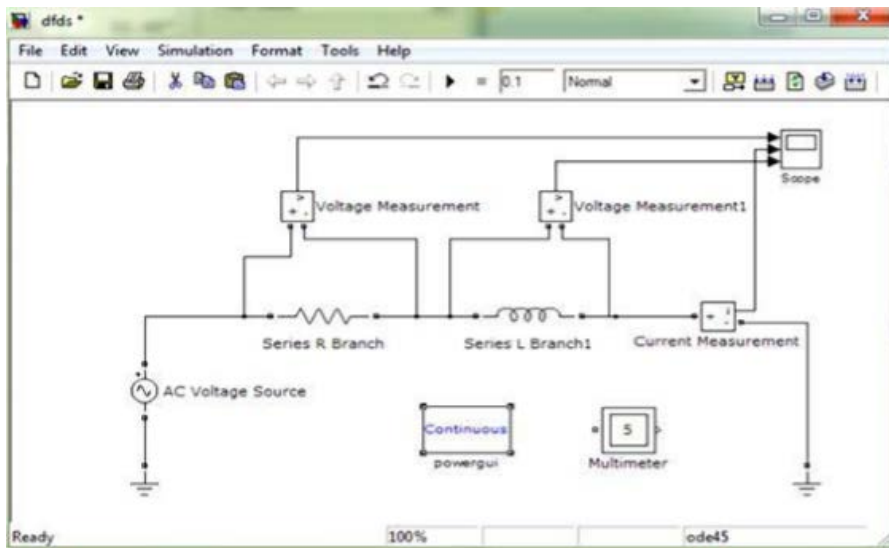


Рисунок 37 - Модель исследования RL-цепи переменного тока

Steady state values:			
MEASUREMENTS:			
1:	'U Voltage Measurement1'	=	59.05 V 32.48°
2:	'U Voltage Measurement'	=	37.59 V -57.52°
3:	'I Current Measurement'	=	3.76 A -57.52°
4:	'Ud: Series R Branch'	=	37.59 V -57.52°
5:	'Ud: Series L Branch1'	=	59.05 V 32.48°
6:	'Usrc: AC Voltage Source'	=	70.00 V 0.00°
7:	'Ib: Series R Branch'	=	3.76 A -57.52°
8:	'Ib: Series L Branch1'	=	3.76 A -57.52°

Рисунок 38 - Окно блока графического интерфейса пользователя (powergui)

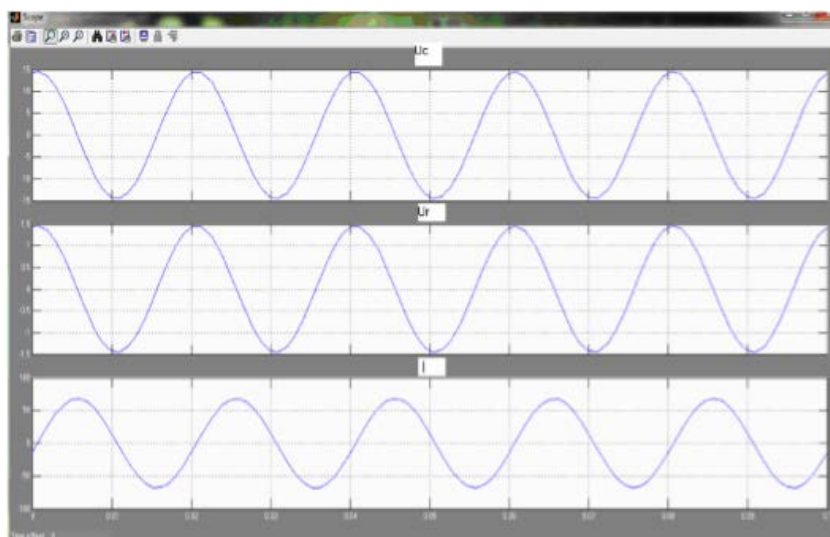


Рисунок 39 - Графики исследуемых величин

Дальнейшее использование системы моделирования MATLAB с пакетом расширения Simulink позволяет решать и выполнять курсовые проекты при изучении специальных дисциплин на старших курсах при подготовке будущих инженеров-электроэнергетиков внедрение программы MATLAB с пакетом расширения Simulink в учебный процесс позволит значительно улучшить качество подготовки будущих специалистов в области электроэнергетики.

### **3.4 Сопоставление элементной базы стенда УИЛС и виртуальной лаборатории с использованием математического пакета MATLAB**

Лабораторный практикум, который проводится сейчас на кафедре теоретических основ электротехники (ТОЭ), благодаря наличию Универсальных исследовательских лабораторных стендов (УИЛС), специального набора элементов, предназначенных для сборки электрических цепей, и измерительных приборов позволяет исследовать реальные физические процессы, происходящие в реальных электрических цепях. Используя данную базу можно проводить лабораторный практикум не только по всему курсу ТОЭ, но и по таким дисциплинам, как электрические измерения, промышленная электроника, теория цепей.

Общие сведения о стенде УИЛС-2

Универсальные учебно-исследовательские лабораторные стенды типа УИЛС предназначены для выполнения комплекса лабораторных работ по I и II частям курсов, которые могут быть объединены понятием «Теоретическая электротехника» (ТОЭ, теория электрических и магнитных цепей, электротехнические основы устройств вычислительной техники и др.), расчетно-лабораторных заданий и учебно-исследовательских работ студентов.

Общий вид стенда УИЛС-2 приведен на рисунке 40.

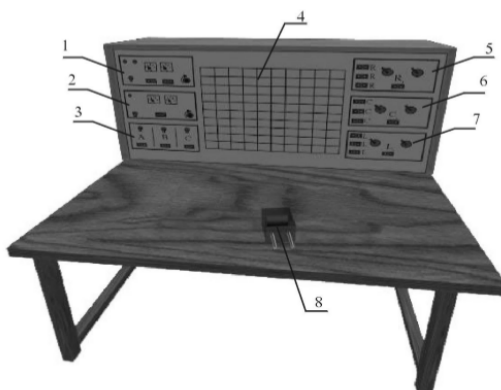


Рисунок 40 - Общий вид стенда УИЛС-2:

1 - блок источников постоянного напряжения; 2 - блок однофазного переменного напряжения синусоидальной, треугольной и прямоугольной форм; 3 - блок трёхфазного напряжения; 4 - наборное поле; 5 - блок резисторов; 6 - блок ёмкостей; 7 - блок индуктивностей; 8 - сменный элемент стенда

Питание стенда осуществляется от трёхфазной сети с напряжением 380, 220, 127 В. Потребляемая мощность не более 500 ВА. Стенд имеет блоки питания постоянного, однофазного и трёхфазного переменного токов, блоки пассивных R, L, C – элементов и наборное поле. Все блоки питания стенда снабжены электронной защитой, срабатывающей при токе 1 А. На задней стенке стенда имеются розетки с напряжением 220В для питания измерительных приборов. Каждому стенду придается комплект-набор съёмных R, L, C – элементов, соединительных проводов и перемычек в виде штепсельных вилок. Технические данные стенда указаны в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1- Блоки источников энергии

№ пп	Источник	U, В	I, А	f	R <sub>B</sub> , Ом
------	----------	------	------	---	---------------------

1	Нерегулируемого постоянного напряжения	20	1	-	5-6,5
2	Регулируемого постоянного напряжения	0-24	1	-	1,4-2.2
3	Однофазного переменного напряжения	0-24	1	1-8 кГц	-
4	Трёхфазного напряжения	0-40	1	50 Гц	-

Таблица 2- Блоки пассивных элементов

R	$R_1=100 \text{ Ом}$ , $P_{\text{доп}}=10 \text{ Вт}$	$R_2=200 \text{ Ом}$ , $P_{\text{доп}}=10 \text{ Вт}$	$R_1=400 \text{ Ом}$ , $P_{\text{доп}}=7.5-15 \text{ Вт}$	$R_1=0-1000 \text{ Ом}$ , $P_{\text{доп}}=2 \text{ Вт}$
C	$C_1=5 \text{ мкФ}$	$C_2=10 \text{ мкФ}$	$C_3=20 \text{ мкФ}$	$C_4=0-10 \text{ мкФ}$
L	$L_1=175 \text{ мГн}$ $r_1=3.75 \text{ Ом}$	$L_1=690 \text{ мГн}$ $r_1=21 \text{ Ом}$	$L_1=5.5 \text{ мГн}$ $r_1=6.5 \text{ Ом}$	$L_1=0-100 \text{ мГн}$ $r_1=0-52 \text{ Ом}$
Элементы $L_1$ и $L_2$ размещены на общем сердечнике, $M_{12}= 250 \text{ мГн}$				

Таблица 3- Комплект-набор съёмных элементов

Резисторы		Конденсаторы		Индуктивности			
№ Элемента	$R_{\text{доп}}=2 \text{ Вт}$ ; R, Ом	№ Элемента	$U_{\text{доп}}=160 \text{ В}$ ; C, мкФ	№ Элемента	L, мГн	$r_L$ , Ом	$I_{\text{доп}}$ , мА
1	51			20	2	0.35	220
2	75	11	0.1	21	3	0.64	190
3	100	12	0.25	22	5	0.78	150
4	150	13	0.5	23	7	0.9	125
5	200	14	0.75	24	10	0.9	100
6	300	15	1.0	25	15	1.18	85
7	510	16	1.25	26	20	1.38	75
8	700	17	1.5	27	30	1.63	60
9	800	18	1.75	28	50	2.05	50
10	1000	19	2.0	29	70	2.5	40
Разброс параметров указанных элементов составляет $\pm 5-10\%$							

НЭ1- нелинейное сопротивление
НЭ2 – лампа накаливания
НЭ3 – полупроводниковый диод
В комплекте – набор имеются также: длинные провода – 14 шт; короткие провода – 15 шт; перемычки (вилки) – 25 шт.

УИЛС состоит из нескольких функциональных частей: источников питания, рабочего поля и блоков переменного сопротивления, емкости и индуктивности.

Проведение лабораторных работ по курсу ТОЭ на стендах УИЛС знакомит студентов с реальными элементами электрических цепей, с современными измерительными приборами, дает навыки сборки простейших схем и проведения измерений.

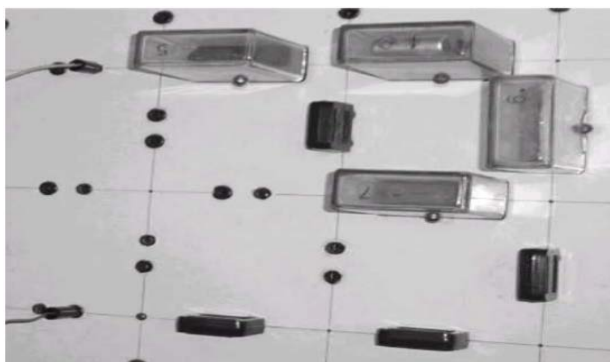
С точки зрения практического усвоения курса ТОЭ - это наиболее оптимальный вариант. Однако, как показывает практика, сборка электрических цепей и подключение измерительных приборов занимает около 30% времени на лабораторной работе.

При этом возникают определенные трудности:

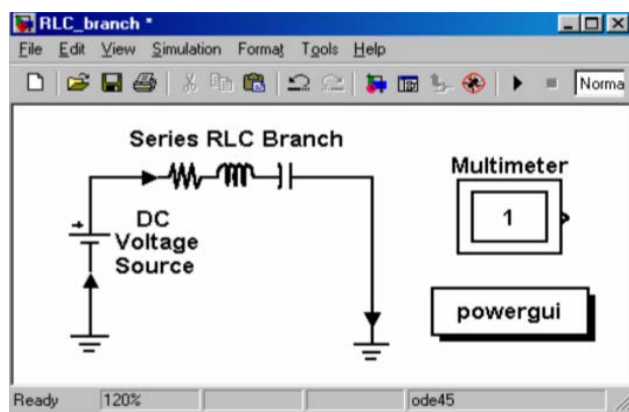
- для фронтальной постановки лабораторных работ требуется дорогостоящее оборудование и большой набор современных измерительных приборов;
- результаты исследований подвержены влиянию ненадежных контактных соединений, обрыву соединительных проводов, ненадежности работы измерительных приборов и т.д.;
- имеется опасность перегрузки и выхода из строя как источников питания, так и измерительных приборов.

Развитие соответствующего программного обеспечения компьютеров позволяет моделировать любые электронные устройства, производить всевозможные измерения, а также с помощью численных методов расчёта исследовать достаточно сложные модели, при этом точность полученных результатов приближается к точности экспериментальных исследований на реальных объектах.

Причем, с точки зрения сборки цепей и подключения измерительных приборов нет разницы между реальными и виртуальными элементами и устройствами (рисунок 42).



А)



Б)

Рисунок 42 - Сопоставление элементной базы стенда УИЛС (а) и виртуальной лаборатории с использованием математического пакета MATLAB (б)

Существует несколько основных программ моделирования электронных схем: «Electronics Workbench» («Электронная лаборатория»); «Micro – Cap» («Программа анализа схем на микрокомпьютерах») и в настоящее время в системах высшего образования все большее распространение в учебной и научно - исследовательской работе вузов приобретает пакет Matlab и его приложения.

Для изучения и анализа процессов в сложных электрических и электронных схемах, например, при моделировании различных статистических и динамических режимов работы электрических цепей, полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, микросхем) и на их основе различных функциональных узлов аналоговых и цифровых устройств,

чрезвычайно привлекательным является пакет Matlab и его приложения, который представляет собой виртуальную лабораторию с очень широкими возможностями (рисунок 43). В данной среде имеется большое количество виртуальных элементов и измерительных приборов. Как отмечалось выше, с помощью их можно моделировать любую электрическую и электронную схему, а также проводить исследования реальных физических процессов, протекающих в цепях.

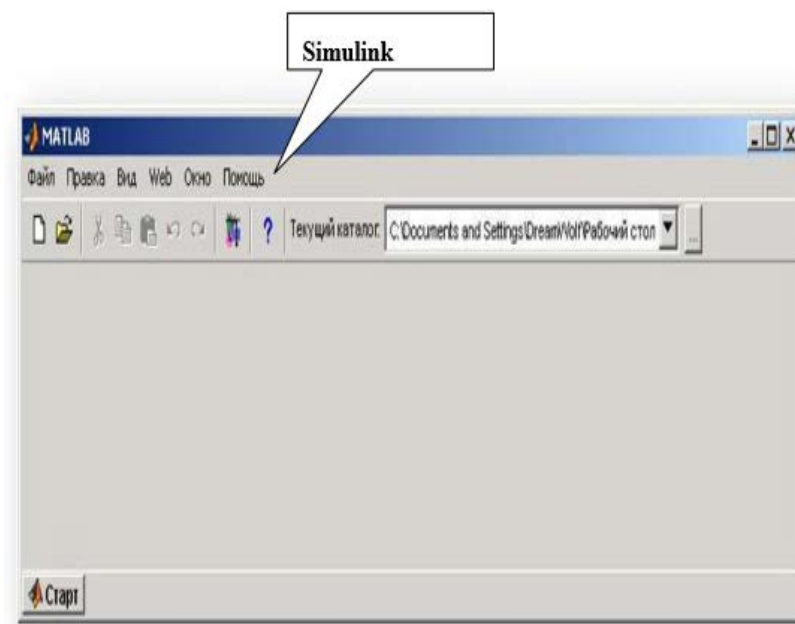


Рисунок 43 - Рабочий стол системы MATLAB

После открытия основного окна программы MATLAB можно запустить и программу Simulink.

Это можно сделать одним из трех способов:

- 1) нажать кнопку Simulink на панели инструментов командного окна MATLAB (рисунок 42);
- 2) в строке командного окна MATLAB напечатать Simulink и нажать клавишу Enter на клавиатуре;
- 3) выполнить команду Open меню File и открыть файл модели, имеющий расширение mdl.

Последний способ предпочтителен при запуске уже готовой и отлаженной модели, когда требуется лишь провести моделирование и не

нужно добавлять новые блоки в модель. При применении двух первых способов открывается окно обозревателя библиотеки блоков (рисунок 44).



Рисунок 44 - Обозреватель библиотеки блоков Simulink

Окно обозревателя библиотеки блоков Simulink Library Browser содержит следующие элементы (рисунок 43):

1. Заголовок с названием окна - Simulink Library Browser.
2. Меню с командами File, Edit, View, Help.
3. Панель инструментов с кнопками наиболее часто используемых команд меню.
4. Окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном разделе библиотеки или блоке.
5. Список разделов библиотеки.
6. Окно для вывода содержимого раздела библиотеки.

На рисунке 43 выделена часть библиотеки Simulink (в левой части окна) и показаны ее разделы (в правой части окна).



Основная библиотека системы Simulink содержит большое количество разделов. Ниже мы рассмотрим лишь те разделы библиотеки, компоненты которых будут представлять для нас интерес, и будут полезны в дальнейшем при моделировании систем электроснабжения. Это разделы Sources - источники сигналов и Sinks - приемники сигналов.

Список разделов библиотеки Simulink представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида: пиктограмма свернутого узла дерева содержит символ «+», а пиктограмма развернутого содержит символ «-».

Для того чтобы развернуть или свернуть узел дерева, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши.

При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (см. рисунок 44)

Для удобства работы и вывода результатов непосредственно в значениях мгновенных токов и напряжении в данном блоке следует исключить некоторые элементы.

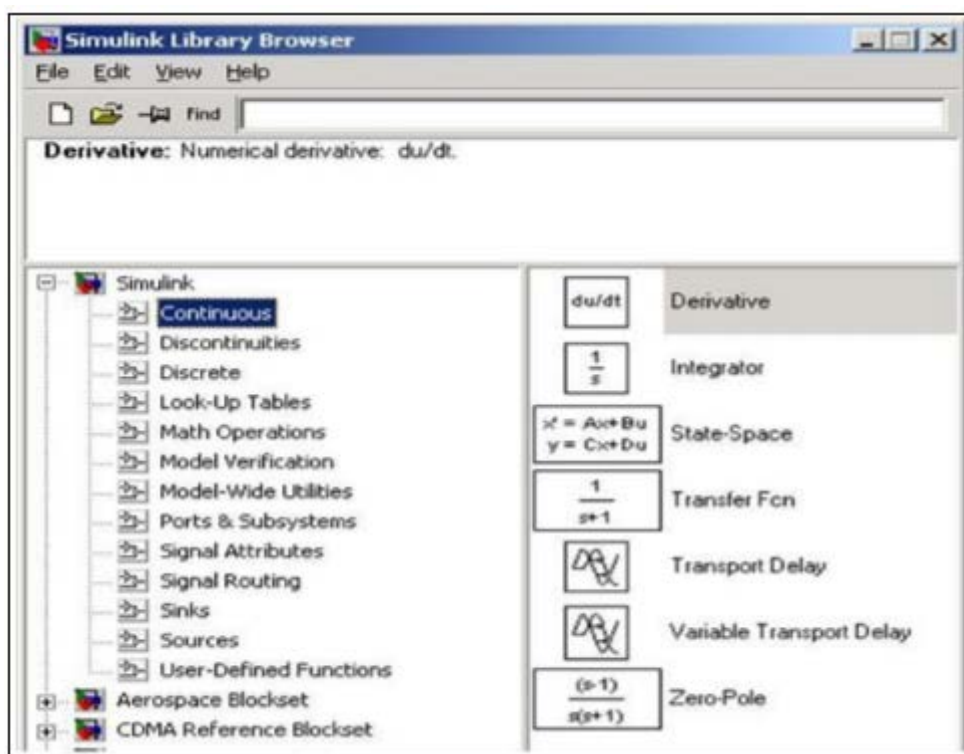


Рисунок 45 - Отображение содержимого библиотеки Continuous

Для работы с окном используются команды, собранные в меню.

Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты:

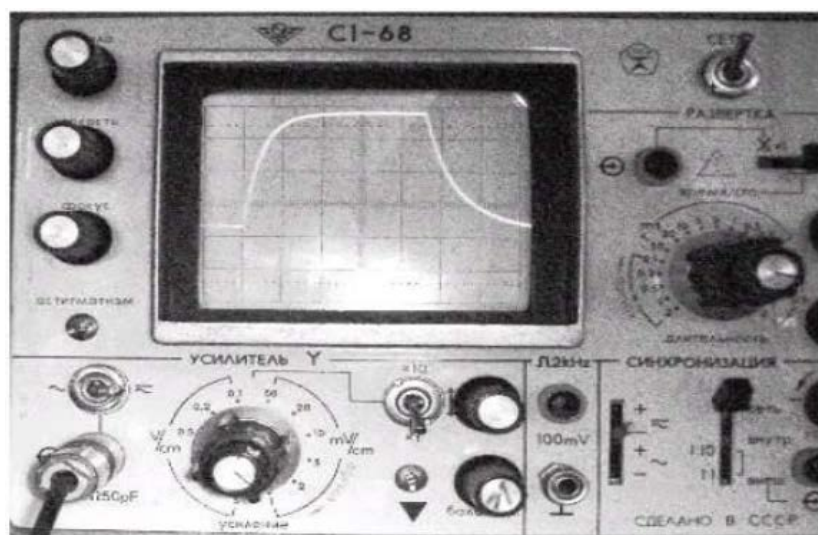
- *File* (Файл) - работа с файлами библиотек;
- *m* (Редактирование) - добавление блоков и их поиск (по названию);
- *View* (Вид) - управление показом элементов интерфейса;
- *Help* (Справка) - вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов.

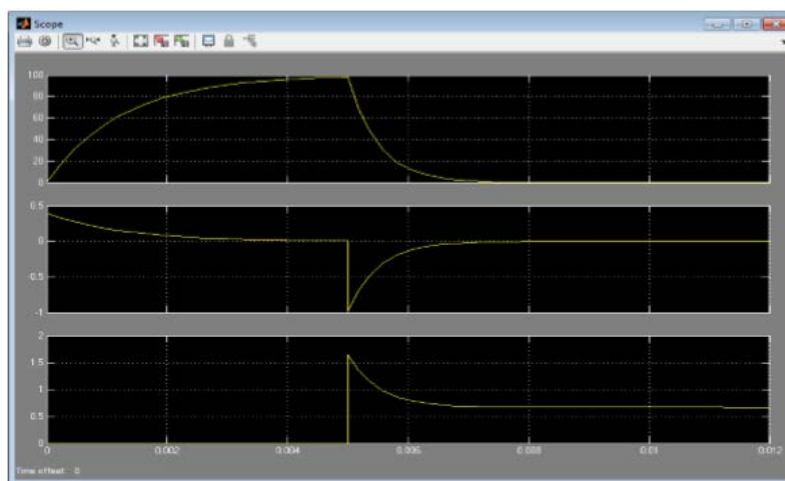
Кнопки на панели инструментов слева - направо имеют следующее назначение:

1. Создать новую Simulink-модель (открыть новое окно модели).
2. Открыть одну из существующих S-моделей.
3. Изменить свойство окна обозревателя «всегда сверху». После нажатия на кнопку окно обозревателя будет отображаться поверх других открытых окон.
4. Найти блок, название которого указано в расположенном справа от кнопки текстовом поле.

Результаты измерений, проведенных в электронно-виртуальной лаборатории, более точны, чем на практике, так как не подвержены влиянию плохих контактов в цепях, обрыва проводов и т.д. На рисунке 46, А показана экспериментальная осциллограмма напряжения на емкости в лабораторной работе «Исследование переходных процессов в разветвленных цепях первого порядка», полученная на стенде УИЛС, а на рисунке 46 Б показана та же осциллограмма, полученная с помощью виртуальной лаборатории Matlab Simulink. Результат сопоставления осциллограмм явно в пользу виртуальной лаборатории, которая относится к классу универсальных унифицированных лабораторий.



А)



Б)

Рисунок 46 - Сопоставление экспериментальных осциллограмм стенда УИЛС (А) и виртуальной лаборатории Matlab Simulink (Б)

Исследование возможностей компьютерной лаборатории показало, что ее можно использовать в лабораторном практикуме с использованием методических указаний, разработанных для стендов УИЛС. Методика постановки лабораторных работ, заложенная в стендах УИЛС, полностью соответствует возможностям виртуальной лаборатории Matlab Simulink. В стенде УИЛС имеются отдельные элементы (источники питания, катушки индуктивности, конденсаторы и т.д.), с помощью которых собираются исследуемые электрические цепи. Те же самые элементы и измерительные приборы заложены и в виртуальной лаборатории Matlab Simulink.

Но возможности виртуальной лаборатории Matlab Simulink с точки зрения элементной базы и измерительных приборов гораздо шире.

При этом программа может служить тренажёром для усвоения принципов работы с реальными измерительными приборами и схемами, формировать необходимые для этого навыки.

Виртуальный лабораторный практикум, бесспорно, отдаляет студентов от реальных физических объектов, но он имеет свои достоинства.

#### *Выводы и перспективы дальнейших исследований*

1. Исследования электрических явлений на реальных физических макетах требует наличия дорогостоящего лабораторного оборудования, измерительных приборов. Однако они являются наиболее оптимальным методом проведения лабораторных работ, так как дают возможность получить навыки работы с реальными электрическими цепями и измерительными приборами, несмотря на определенные трудности проведения экспериментов.

2. Применение электронно-виртуальных лабораторий в процессе обучения позволяет расширить круг решаемых задач: помогает студентам создавать математические модели устройств, моделировать и создавать разные режимы работы электрических схем, исследовать в широком диапазоне особенности работы электрических цепей, проводить детальный анализ полученных результатов с помощью математических пакетов.

## **4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

### **4.1 Цель выпускной квалификационной работы**

Целью выпускной квалификационной работы является разработка исследовательского комплекса дисциплины «Электрические машины и аппараты». В исследовании будет представлена необходимая информация о дисциплине, информация необходимая для формирования умений самостоятельного решения профессиональных задач, знания электромеханических переходных процессов. Изучение курса ознакомит с изучением теории, устройства и практики электрического привода, что может быть использовано при выполнении курсовых проектов.

### **4.2 Техническое описание разрабатываемого мероприятия**

#### **Порядок расчета**

Расчет себестоимости разработки исследования и расчет затрат на исследование электромеханических переходных процессов.

Порядок расчета:

1. Расчет затрат на разработку исследования переходных процессов.
2. Расчет затрат на внедрение разработки в учебный процесс.

#### **Объем и места внедрения**

После окончательного утверждения исследовательский материал может быть сохранен на веб-сервере и быть доступным в сети Интернет всем пользователям, а также в электронной базе данных РГППУ или бумажном виде на кафедре, обеспечивающей преподавание данной дисциплины.

### **4.3 Экономический расчет**

#### **Расчет себестоимости разработки исследовательской работы**

В себестоимость разработки исследовательской работы входят следующие статьи затрат:

1. Основная заработная плата.
2. Дополнительная заработная плата.
3. Страховые взносы.
4. Прочие расходы.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 4.

Разработку исследования и внедрение в учебный процесс проводят два исполнителя: инженер и педагог, читающий дисциплину. Зарплата инженера-педагога составляет 80 руб/час, педагога методической части - 110 руб/час. При этом продолжительность рабочего дня каждого из них составляет 6 часов.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 4.

Таблица 4 - Расчет основной заработной платы

Этапы	Виды работ	Кол-во	Должность	Часовая ставка	Длит. Выполнения, ч.	Размер зарплаты, руб.
1. Начальный	Сбор и обработка собранного материала, информации по дисциплине	1	инженер	80	15	1200
2. Поиск учебной литературы и анализ ее	Поиск актуальной литературы для изучения, а также анализ всех источников	1	инженер	80	11	880

Окончание таблицы 4

3. Разработка структуры дисциплины, поиск и разработка темы, лекций	Разработка темы дисциплины, а так же поиск лекционного материала.	1	педагог	110	14	1400
4. Разработка лабораторных работ, контрольных работ, практических занятий	Разработка лабораторных работ	1	инженер	80	7	560
	Разработка контрольных работ	1	педагог	110	9	990
	Разработка практических занятий	1	педагог	110	8	880
	Разработка вопросов для тестов, контрольных вопросов, а так же вопросов на зачет/экзамен	1	педагог	110	8	880
5. Этап разработки вопросов, выносимых на зачет, тестовых заданий, занятий	Разработка вопросов для тестов, контрольных вопросов, а так же вопросов на зачет	1	педагог	110	11	1100
Итого						8770
Дополнительная зарплата (20%)						2031
Всего					83	10801

К дополнительной заработной плате относятся: оплата отпусков, выплата вознаграждения за выслугу лет и т.д. Дополнительная заработная плата составляет 20% от основной:

$$8770 * 0,2 = 2031 \text{ руб.}$$

К страховым взносам относятся отчисления на оплату перерывов в работе в связи с временной нетрудоспособностью и отчисления в

пенсионный фонд. Норматив отчислений на социальное страхование составляет 30% от величины основной заработной платы:

$$8770 \cdot 0,3 = 2631 \text{ руб.}$$

К прочим расходам следует отнести расходы на электроэнергию.

Затраты на электроэнергию рассчитываются исходя из потребляемой мощности устройства и тарифа на электроэнергию. В нашем случае предполагается использование компьютера с мощностью 0,3 кВт час. Стоимость одного кВт часа электроэнергии равна 2,2 руб. Время использования электроэнергии в процессе разработки: 60 часов.

Следовательно, плата за электроэнергию составит:

$$0,3 \cdot 2,20 \cdot 60 = 39 \text{ руб.}$$

Расчет себестоимости разработки системы представлен в таблице 5.

Таблица 5 - Расчет основных затрат на разработку

Статьи затрат	Сумма, руб.
Основная заработная плата	8770
Дополнительная	2031
Страховые взносы	2631
Плата за электроэнергию	39
Итого:	13471

#### 4.4 Выводы

В представленной экономической части выпускной квалификационной работы рассмотрена идея разработки исследовательского проекта для студентов, преподавателей, вузов. Расчет себестоимости разработки исследования и внедрение в учебный процесс показывает, что проект реализуем и эффективен.

Внедрение данного исследовательского проекта формирует базовые понятия, необходимые для восприятия и осмысления дисциплины «Электрические машины и аппараты», базовые знания, необходимые для



осмысления методических дисциплин, ориентированных на использование электрооборудования. Проверка качества освоения материала по дисциплине предполагается осуществлять через проведение планируемых мероприятий, разных по форме и объему, позволяющий в течение семестра определить уровень освоения практического и теоретического материала.

Данное исследование также может быть использовано студентами для самостоятельного обучения дисциплины «Электрические машины и аппараты», так как в нем содержатся все необходимые для этого материалы.

Расчет затрат показал, что на разработку данного исследования необходимо затратить около 13471 руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях, когда на смену калькуляторам в инженерную практику пришли компьютеры и компьютерные программы, позволяющие решать сложные научные и инженерные задачи, нельзя не отметить, что в системе высшего образования многие подходы в подготовке специалистов не соответствуют возможностям и потребностям времени.

Современные социальные и экономические условия предъявляют высокие требования к качеству выпускаемых вузами специалистов, нацеливают на формирование в студентах личности, характеризующейся не репродуктивным, а творческим типом мышления, инициативой и самостоятельностью в принятии профессиональных решений. Эти требования требуют поиска новых подходов в обучении. Обучение в современном мире все в большей мере основывается не на трансляции готовых знаний, а на создании условий для творческой активности учащихся.

В учебно-методических комплексах вузов сегодня делаются попытки органично увязать в систему в как традиционные компоненты учебного процесса: лекции, лабораторные работы, средств контроля качества самостоятельной работы, так и компоненты, базирующиеся на современных информационных технологиях и компьютерных программах, обеспечивающих самостоятельную работу обучаемых.

Изучение и использование современных компьютерных программ должно стать обязательным элементом при подготовке современных специалистов для расширения возможностей инженерных исследований и разработок. Широкое применение при изучении научно-технических дисциплин пакета MATLAB, помогает перенести акцент в обучении на принципиальные вопросы, отдав «технические» задачи компьютеру.

В настоящее время в системах высшего образования России и ведущих стран мира все большее распространение в учебной и научно - исследовательской работе университетов приобретает пакет Matlab и его

приложения. Применение данного пакета показало свою эффективность, как при создании лабораторной базы, так и при подготовке магистерских диссертаций и выпускных работ бакалавров. О значимости данного пакета в научном мире и системе образования России можно судить по ежегодным всероссийским научным конференциям «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB», проводимых Институтом проблем управления РАН. Одна из секций на этих конференциях посвящена применению MATLAB в системе образования.

Целью данной работы было изучение возможностей, которые может предоставить математический пакет MATLAB и его приложения, в первую очередь SIMULINK и SIMPOWERSYSTEMS, для создания в университете современной лабораторной базы и внедрения в учебный процесс инновационных форм обучения. Все это, по нашему мнению, будет способствовать повышению качества подготовки специалистов в области электроэнергетики.

В процессе выполнения работы была проработана литература по теме, изданная на русском языке, освоена технология работы в среде MATLAB, а также технология визуально – объектного программирования и разработки динамических моделей.

Для демонстрации возможностей MATLAB в отчете приведено 6 работ, охватывающих решение различных задач электроэнергетики.

Работа 1 предназначена для демонстрации моделирования переходных процессов в RLC-цепях при включении их на источник сигнала произвольной формы.

Работа 2 предназначена для демонстрации моделирования резонансных явлений в электрических цепях.

Работа 3 предназначена для демонстрации моделирования переходных процессов при коммутации длинных линий электропередач с распределенными параметрами.

Работа 4 предназначена для демонстрации моделирования переходных процессов при коммутации силовых трансформаторов.

Работа 5 предназначена для демонстрации моделирования переходных процессов при запуске асинхронных электродвигателей.

Работа 6 предназначена для демонстрации моделирования переходных процессов при запуске двигателей постоянного тока.

Необходимо отметить, что представленные в отчете SPS модели не могут даже в малой степени показать всех возможностей, которые предоставляет МАТЛАБ при решении научных и инженерных задач.

Вывод по проделанной работе однозначен: Математический пакет МАТЛАБ необходимо внедрять в учебный процесс.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Герман-Галкин С.Г., Электрические машины: лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардонов. - СПб: КОРОНА, 2013. -555с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2012. -411с.
3. Дьяконов В.П., Matlab 6.5 Spl/7+Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. - М.: Солон-Пресс, 2015. - 313с.
4. Дьяконов В.П., Matlab 6.5 SP1/7/7 Sp2+Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. - М.: Солон-Пресс, 2016. - 456с.
5. Дьяконов В.П., Matlab. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / Владимир Дьяконов, Владимир Круглов. - М.: СПб: Питер, 2012. - 448 с.
6. Дьяконов В.П., VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математичес. моделирование / Владимир Дьяконов. - М.: Солон-Пресс, 2014. - 384 с.
7. Кетков Юлий MATLAB 6.x: программирование численных методов / Юлий Кетков, Александр Кетков, Михаил Шульц. - М.: БХВ-Петербург, 2014. - 672 с.
8. Курбатова Е.А. MATLAB 7. Самоучитель / Е.А. Курбатова. - М.: Вильямс, 2016. - 256 с.
9. Потемкин, В. Г. MATLAB 6: среда проектирования инженерных приложений / В.Г. Потемкин. - М.: Диалог-Мифи, 2003. - 448 с.12. Вебер, Э. Переходные процессы в линейных цепях / Э. Вебер. - М.: Питер, 2012. - 392 с.
10. Вебер, Э. Переходные процессы в линейных цепях / Э. Вебер. - М.: Москва, 2015. - 392 с.

11. Волошин, И.Ф. Переходные процессы в цепях с термисторами / И.Ф. Волошин, В.А. Палагин. - М.: Минск: Наука и техника, 1975. - 244 с.
12. Евсеев, И. В. Когерентные переходные процессы в оптике / И.В. Евсеев, Н.Н. Рубцова, В.В. Самарцев. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 123 с.
13. Вентцель, А.Д Курс теории случайных процессов / А.Д, Вентцель. - М.: Москва 1996. - 567 с.
14. Волошин, И.Ф. Переходные процессы в цепях с термисторами / И.Ф. Волошин, В.А. Палагин. - М.: Минск: Наука и техника, 1986. - 244 с.
15. Гарднер, М. Ф. Переходные процессы в линейных системах / М.Ф. Гарднер, Дж.Л. Бэрнс. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1997. - 551 с.
16. Гинзбург, С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях / С.Г. Гинзбург. - М.: Советское радио, 1980. - 404 с.
17. Дзюбенко, Б. В. Моделирование стационарных и переходных теплогидравлических процессов в каналах сложной формы / Б.В. Дзюбенко, Л.В. Ашмантас, М.Д. Сегаль. - М.: Pradai, 1994. - 230 с.
18. Евсеев, И. В. Когерентные переходные процессы в оптике / И.В. Евсеев, Н.Н. Рубцова, В.В. Самарцев. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 536 с.
19. Переходные процессы в русской художественной культуре: моногр. - М.: Наука, 2003. - 496 с.
20. Прокунцев, А.Ф. Переходные процессы в цифровых мостах переменного тока / А.Ф. Прокунцев. - М.: Энергия, 1978. - 112 с

**ПРИЛОЖЕНИЕ А БЛОКИ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ СТЕНДА  
УИЛС**

№ пп	Источник	U, В	I, А	f	R <sub>В</sub> , Ом
1	Нерегулируемого постоянного напряжения	20	1	-	5-6,5
2	Регулируемого постоянного напряжения	0-24	1	-	1,4-2.2
3	Однофазного переменного напряжения	0-24	1	1-8 кГц	-
4	Трёхфазного напряжения	0-40	1	50 Гц	-

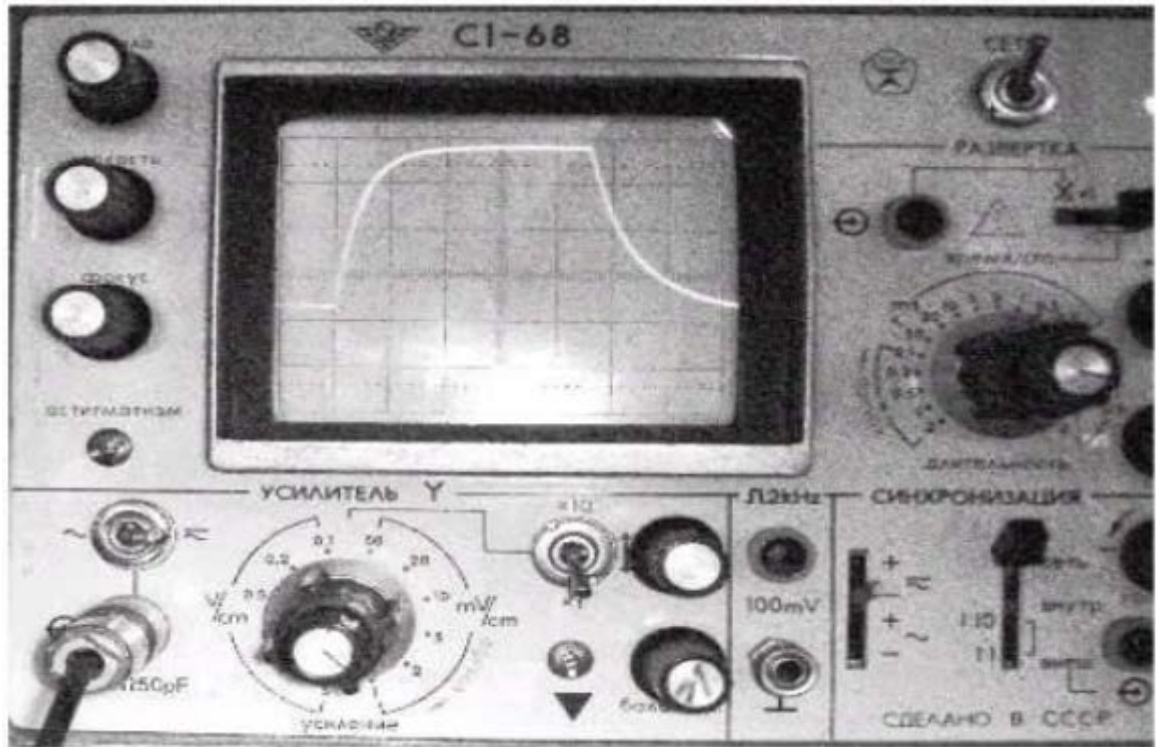
R	R <sub>1</sub> =100 Ом, P <sub>доп</sub> =10 Вт	R <sub>2</sub> =200 Ом, P <sub>доп</sub> =10 Вт	R <sub>1</sub> =400 Ом, P <sub>доп</sub> =7.5-15 Вт	R <sub>1</sub> =0-1000 Ом, P <sub>доп</sub> =2 Вт
C	C <sub>1</sub> =5 мкФ	C <sub>2</sub> =10 мкФ	C <sub>3</sub> =20 мкФ	C <sub>4</sub> =0-10 мкФ
L	L <sub>1</sub> =175 мГн r <sub>1</sub> =3.75 Ом	L <sub>1</sub> =690 мГн r <sub>1</sub> =21 Ом	L <sub>1</sub> =5.5 мГн r <sub>1</sub> =6.5 Ом	L <sub>1</sub> =0-100 мГн r <sub>1</sub> =0-52 Ом
Элементы L <sub>1</sub> и L <sub>2</sub> размещены на общем сердечнике, M <sub>12</sub> = 250 мГн				

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б КОМПЛЕКТ-НАБОР СЪЁМНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ СТЕНДА УИЛС**

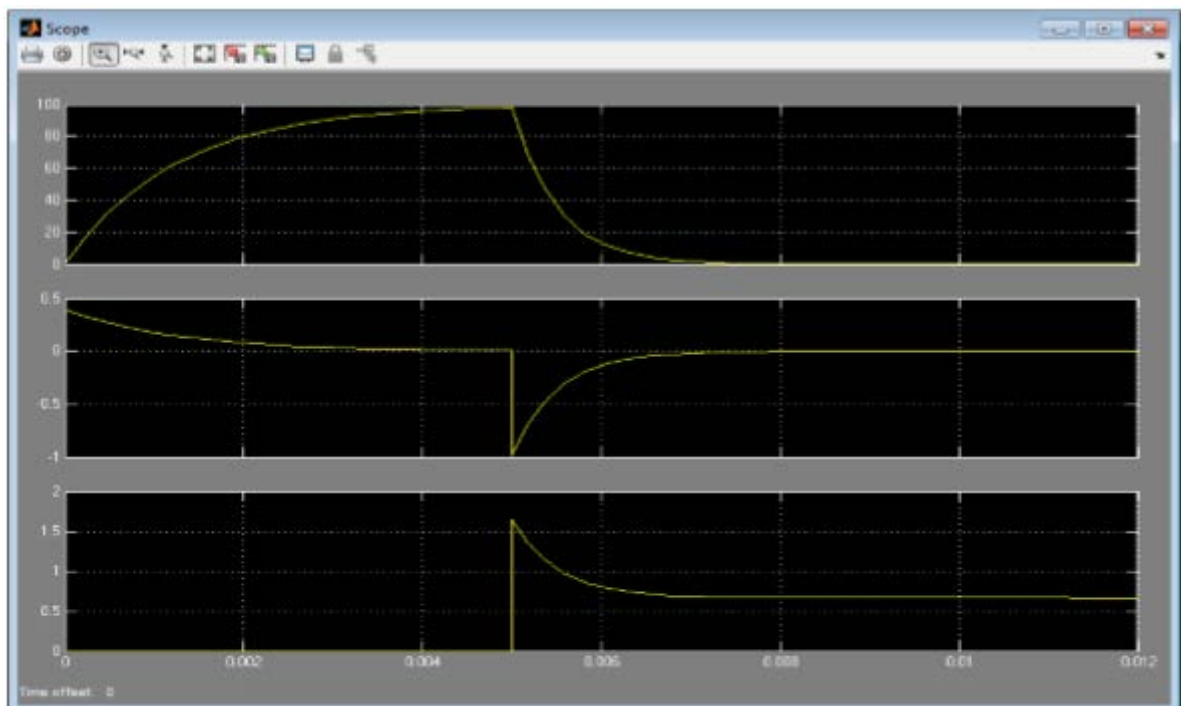
Резисторы		Конденсаторы		Индуктивности			
№ Элемента	$R_{\text{доп}}=2 \text{ Вт};$ R, Ом	№ Элемента	$U_{\text{доп}}=160 \text{ В};$ C, мкФ	№ Элемента	L, мГн	$r_L,$ Ом	$I_{\text{доп}},$ мА
1	51			20	2	0.35	220
2	75	11	0.1	21	3	0.64	190
3	100	12	0.25	22	5	0.78	150
4	150	13	0.5	23	7	0.9	125
5	200	14	0.75	24	10	0.9	100
6	300	15	1.0	25	15	1.18	85
7	510	16	1.25	26	20	1.38	75
8	700	17	1.5	27	30	1.63	60
9	800	18	1.75	28	50	2.05	50
10	1000	19	2.0	29	70	2.5	40
Разброс параметров указанных элементов составляет $\pm 5-10\%$							
НЭ1- нелинейное сопротивление							
НЭ2 – лампа накаливания							
НЭ3 – полупроводниковый диод							
В комплекте – наборе имеются также: длинные провода – 14 шт; короткие провода – 15 шт; перемычки (вилки) – 25 шт.							



**ПРИЛОЖЕНИЕ В СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ОСЦИЛЛОГРАММ СТЕНДА УИЛС (А) И ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ  
МАТЛАВ SIMULINK (Б)**

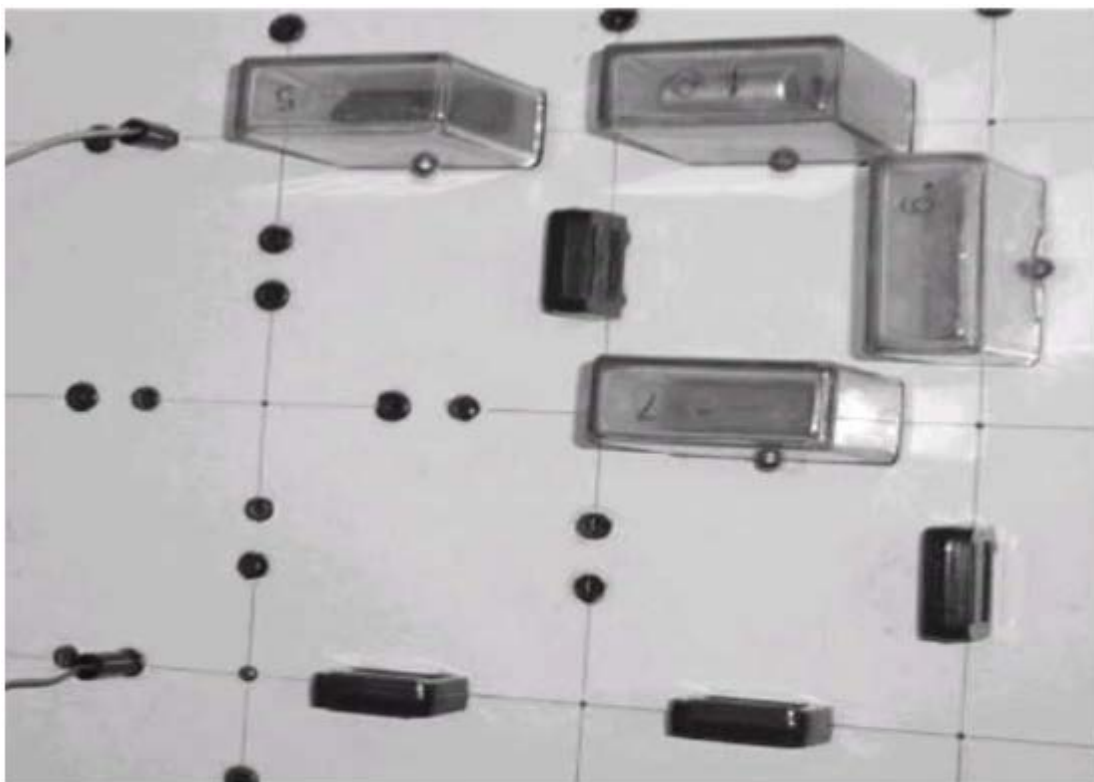


А) Осциллограмма стенда УИЛС-2

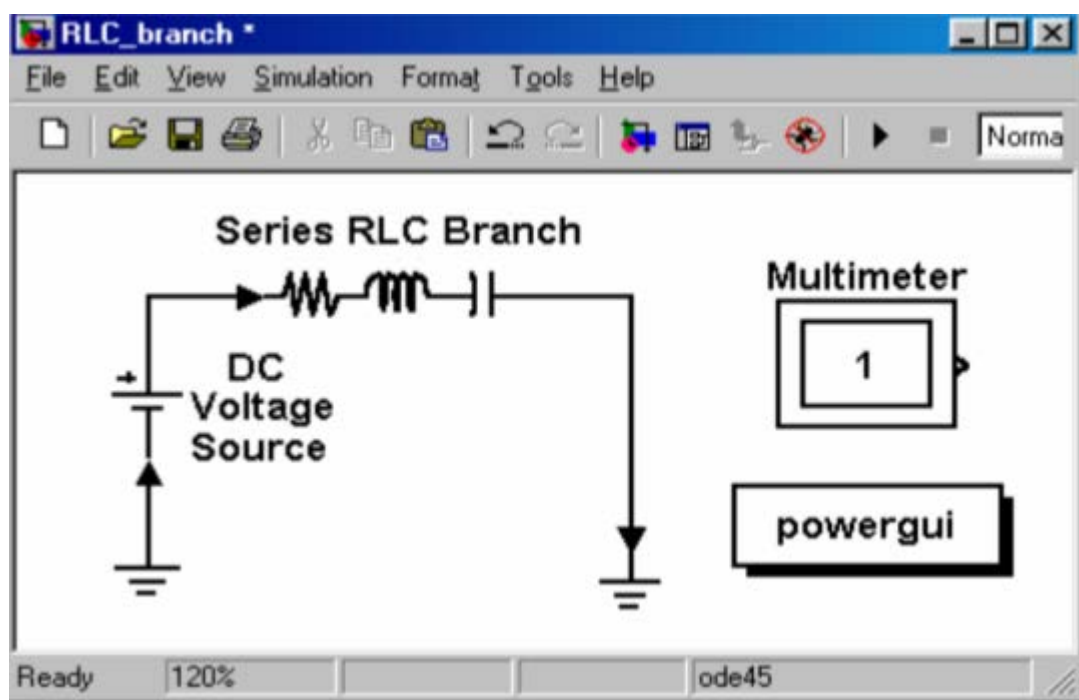


Б) Осциллограмма Matlab Simulink

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ  
СТЕНДА УИЛС (А) И ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА МАТЛАВ (Б)**



А)



Б)