

**МИНИСТЕРСТВО ПО РАЗВИТИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**НУКУССКИЙ ФИЛИАЛ ТАШКЕНТСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ИМЕНИ МУХАММАДА АЛ-ХОРАЗМИЙ**

Кафедра «Информационные технологии»

направление Компьютерный инжиниринг («Компьютерный инжиниринг»)

Допуск к защите
Заведующий кафедрой
к.ф.-м.н., доц. Турениязова А.

« ____ » _____ 2019 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему

**«Разработка виртуальной лабораторной работы на базе
асинхронной машины»**

Выполнил:

Кошмуратов Д.Б.

Научный руководитель:

Ph.D. Джайков Г.М.

НУКУС - 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПАКЕТ MATLAB	7
1.1 Краткая характеристика математического пакета MATLAB	7
1.2 Краткий обзор расширений Toolbox, включаемых в пакет MATLAB	11
ГЛАВА 2. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	22
2.1 Принцип действия асинхронных машин в режимах двигателя, генератора с отдачей энергии в сеть и электромагнитного тормоза	22
2.2 Устройство асинхронных двигателей	24
2.3. Математические модели асинхронной машины	31
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПРОГРАММЕ MATLAB	34
3.1 Пакет визуального программирования Simulink	34
3.2 Разработка виртуальной лабораторной работы на базе виртуальной асинхронной машины	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	60

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день подготовка грамотных специалистов невозможна без применения новых форм обучения с использованием компьютерных технологий, базирующихся на современных прикладных программных продуктах.

Современные компьютерные технологии позволяют качественно изменить и существенно улучшить технологию изучения электрических машин, перевести её в виртуальную действительность, осуществить в этой виртуальной лаборатории исследования статических и динамических режимов работы электрических машин, их механических характеристик, условий пуска и технико-экономических показателей с получением количественных результатов.

Для грамотного использования компьютерных технологий при исследовании электрических машин необходимо хорошо знать и понимать физические процессы, протекающие в электрических машинах; знать уравнения, описывающие работу электрической машины; уметь рассчитать параметры для построения математических моделей. Использование компьютерных технологий позволит расширить круг и глубину изучаемых вопросов, провести множество экспериментов с использованием виртуальных электрических машин, что благотворно скажется на уровне подготовки специалистов.

В данной работе необходимо разработать и создать виртуальные лабораторные работы для изучения асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным роторами и исследовать в них переходных процессы, пусковые свойства, естественные и искусственные механические, а также рабочие характеристики. Поставленная задача реализована в наглядном и эффективном средстве визуального программирования моделей – пакете Simulink программы MATLAB.

Разрабатываемые виртуальные лабораторные работы будут намного превосходить по техническим и экономическим возможностям реальную физическую лабораторную установку. В созданных виртуальных лабораторных работах будет иметь место широчайший спектр возможностей по исследованию асинхронной машины в различных режимах работы, что в реальной лаборатории требует больших финансовых расходов из-за дороговизны необходимого оборудования.

В полученных виртуальных лабораторных работах появится возможность исследования переходных процессов в асинхронном двигателе, снятия рабочих и искусственных механических характеристик при различных значениях добавочного сопротивления в цепи ротора, напряжения и частоты питающей сети.

Большим плюсом разрабатываемых лабораторных работ является то, что виртуальную лабораторию можно использовать в дистанционном обучении студентов и в различных учебных заведениях, где нет возможности поработать в реальной лаборатории. Единственное, что необходимо для работы виртуальной лаборатории, это наличие персонального компьютера, который в наше время является общедоступным и имеется в каждом учебном заведении.

ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПАКЕТ MATLAB

1.1 Краткая характеристика математического пакета MATLAB

Пакет MATLAB был создан компанией Math Works. Работа сотен ученых и программистов из различных научноисследовательских 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 проникнуть 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 «C» или «Fortran» из среды или программ MATLAB, обращаться к функциям MATLAB из программ на "C" 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.

1.2 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.

Toolbox Partial Differential Equations (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).

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.

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.

ГЛАВА 2. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Принцип действия асинхронных машин в режимах двигателя, генератора с отдачей энергии в сеть и электромагнитного тормоза

Принцип действия двигателя. Асинхронной машиной называется такая машина переменного тока, скорость вращения ротора которой не находится в строгом соответствии с частотой тока сети. Как и все электрические машины, асинхронные машины обладают свойством обратимости, т. е. могут работать как в двигательном, так и в генераторном режиме.

При протекании трёхфазной системы токов по трёхфазной обмотке статора в двигателе создаётся магнитное поле с индукцией $B(x)$, распределённой вдоль окружности воздушного зазора между статором и ротором по синусоидальному закону и вращающееся в направлении чередования фаз с угловой скоростью ω_1 (рисунок 2.1)

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}, \quad (2.1)$$

где f_1 – частота тока в сети;

p – число пар полюсов статора.

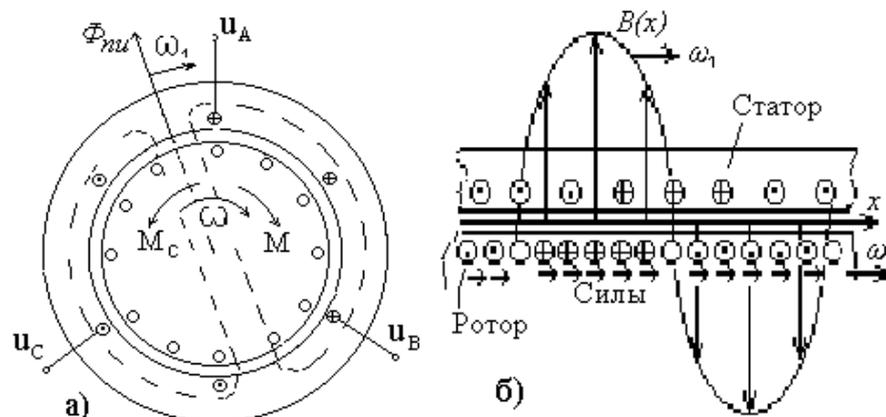


Рисунок 2.1 а) Устройство и б) принцип действия асинхронного двигателя

Это поле обеспечивает изменяющееся во времени потокосцепление с контурами обмоток статора и ротора, индуцирующее в этих контурах ЭДС

электромагнитной индукции. Под действием ЭДС ротора в проводниках его обмотки протекают переменные токи, взаимодействующие с вращающимся магнитным полем. В результате этого взаимодействия на проводники ротора действуют электромагнитные силы (силы Ампера), определяющие момент M , который может привести ротор во вращение с угловой скоростью $\omega < \omega_1$ в направлении вращения поля, преодолевая момент сопротивления M_c рабочего механизма, сочленённого с двигателем. Если бы, разгоняясь, ротор догнал вращающееся магнитное поле, то перестало бы изменяться потокоцепление обмотки ротора, исчезли бы её ЭДС и ток и, следовательно, электромагнитные силы и момент M . Ротор начал бы замедляться и скользить относительно поля. Относительную скорость проскальзывания ротора и поля называют скольжением S :

$$S = (\omega_1 - \omega) / \omega_1 . \quad (2.2)$$

Замедление ротора прекратится при такой скорости вращения $\omega < \omega_1$, при которой ЭДС и ток ротора обеспечивают момент M , равный по значению моменту сопротивления M_c механизма, т.к. согласно уравнению движения системы механически связанных тел ускорение (замедление):

$$(d\omega / dt) = (M - M_c) / J , \quad (2.3)$$

где J – суммарный момент инерции роторов двигателя и механизма.

Таким образом, энергия источника переменного тока (сети), подводимая к обмотке статора, превращается в механическую энергию на валу, передаваемую рабочему механизму, и частично в потери (в сопротивлениях обмоток, на трение вращающихся частей, на гистерезис и вихревые токи в ферромагнитных сердечниках статора и ротора). При этом ротор вращается со скоростью $\omega < \omega_1$, т.е. асинхронно с магнитным полем. Ротор вращается под действием электромагнитного момента M в направлении вращения магнитного поля. Следовательно, для изменения направления вращения ротора (реверса) необходимо изменить чередование фаз напряжения,

подводимого к обмотке статора, т.е. поменять присоединение двух любых проводов.

Генераторный режим с отдачей энергии в сеть. Асинхронные машины, как и все электрические машины, обратимы и при известных условиях могут работать в генераторном режиме.

Допустим, что с помощью какого-либо первичного двигателя ротор асинхронной машины, включенной в сеть, будет вращаться в прежнем направлении, но со скоростью ω , превышающей синхронную ω_1 . При этом полярность поля статора сохраним ту же, что и в двигательном режиме. Тогда скольжение s станет отрицательным и ротор при вращении будет обгонять вращающееся магнитное поле, а его проводники будут пересекать силовые линии в направлении, обратном тому, которое было при работе машины в двигательном режиме. Вследствие этого ЭДС и токи в роторе изменяют свое направление на обратное. В результате изменяет свое направление сила взаимодействия вращающегося поля и токов ротора, а также момент на валу, т. е. развиваемый асинхронной машиной момент становится отрицательным по отношению к моменту первичного двигателя. Таким образом, асинхронная машина будет работать генератором, преобразовывая механическую энергию, получаемую от первичного двигателя, в электрическую, отдаваемую в сеть.

2.2 Устройство асинхронных двигателей

Основными частями асинхронного двигателя являются неподвижный статор и вращающийся внутри него ротор, отделенный от статора воздушным зазором. С целью уменьшения вихревых токов сердечники ротора и статора собираются из отдельных листов, отштампованных из электротехнической стали и изображенных на рисунке 2.2. Листы изолируются друг от друга тонким слоем лака (в маломощных машинах - слоем окалины).

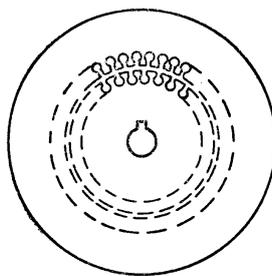


Рисунок 2.2 - Листы сердечника статора и ротора асинхронного двигателя

Сердечник статора встраивается в корпус, являющийся внешней частью машины. Сердечник ротора укрепляется либо непосредственно на валу двигателя, либо на втулке, выполненной в форме крестовины и надетой на вал двигателя. Вал вращается в подшипниках, которые укреплены в торцовых щитах двигателя, называемых подшипниковыми щитами.

Поскольку магнитный поток асинхронного двигателя создается подключенной к сети обмоткой статора, то и намагничивающий ток потребляется двигателем из сети. С целью уменьшения величины этого тока магнитное сопротивление потоку должно быть как можно меньше. Для этого величина воздушного зазора принимается настолько малой, насколько это возможно по соображениям механической конструкции. У машин малой мощности зазор равен 0,3 мм, а у машин большой мощности 1,5 мм. В синхронных машинах, у которых основной поток создается постоянным током, воздушный зазор гораздо больше: он достигает 3-15 мм. Статор асинхронного двигателя ничем не отличается от статора синхронной машины. Как уже было сказано, сердечник статора набирается из отдельных изолированных листов, которые для лучшего охлаждения делятся воздушными каналами на отдельные пакеты. Трёхфазная распределённая обмотка статора асинхронного двигателя, уложена в изолированные пазы статора. Пазы статора, как правило, имеют полузакрытую форму, при которой сохраняется удобство укладки обмотки в пазы и, кроме того, удается получить наименьшие значения тока намагничивания, от которого в свою очередь

зависит также и коэффициент мощности $\cos\varphi$ двигателя. Обмотка статора выполняется из медных изолированных проводников.

Ротор асинхронного двигателя в зависимости от вида обмотки может быть выполнен фазным или короткозамкнутым. Роторы выполняются из листов электротехнической стали, собранных между двумя нажимными шайбами. Пазы ротора (обычно полузакрытой формы) идут вдоль оси машины и равномерно расположены на поверхности по всей окружности.

Наиболее проста конструкция короткозамкнутого ротора, в пазы которого укладываются круглые или прямоугольные стержни из меди или алюминия, неизолированные, замкнутые накоротко на обоих концах ротора при помощи медных или алюминиевых колец большого сечения. Такого рода обмотку принято называть «беличьей клеткой» (рисунок 2.3), она очень прочна, дешева и надежна в работе.

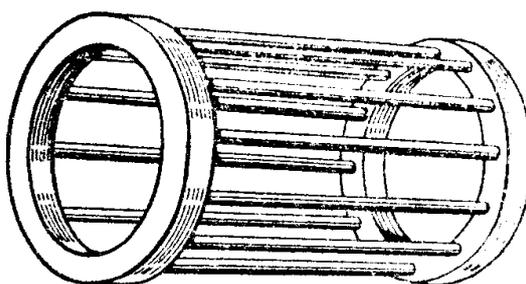


Рисунок 2.3 - Короткозамкнутая обмотка ротора асинхронного двигателя

При $P_n \leq 100\text{кВт}$ современные короткозамкнутые роторы часто выполняются в виде клетки, изготовляемой заливкой пазов ротора алюминием. Стержни и замыкающие кольца с вентиляционными лопатками представляют собой в этом случае одну цельную отливку.

Ротор асинхронной машины с фазными обмотками - фазный ротор - имеет в пазах трехфазную обмотку, аналогичную обмотке статора. Фазы обмотки соединены в звезду, а выводы обмотки присоединяются к медным контактными кольцам, укрепленным на валу машины и изолированным как друг от друга, так и от вала. На контактных кольцах установлены щётки,

выводы от которых расположены в коробке выводов. К этим выводам подключают пусковые или регулировочные реостаты.

Асинхронные двигатели (АД) с улучшенными пусковыми свойствами. Значительное улучшение пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором достигается изменением конструкции ротора. В качестве таких конструкций широко используют роторы с двойной короткозамкнутой обмоткой и с глубокими пазами.

АД с глубокопазым ротором. В двигателях с глубокими пазами на роторе его короткозамкнутая обмотка выполняется в виде тонких высоких полос (рисунок 2.4). При такой конструкции обмотки происходит отеснение тока к верхней части проводников вследствие того, что нижние части проводников сцеплены с большим числом магнитных линий потока рассеяния, чем верхние части.

Таким образом, ток, протекающий по проводникам, стремится сконцентрироваться преимущественно в верхней их части, что равносильно уменьшению поперечного сечения или увеличению активного сопротивления этих проводников.

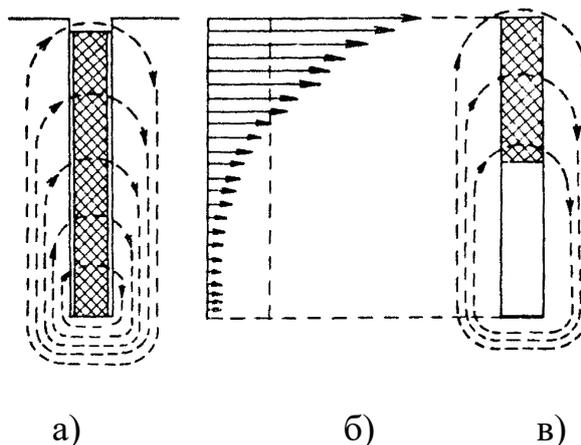


Рисунок 2.4 - Схема устройства ротора с глубокими пазами и явление вытеснения тока: а) магнитное поле; б) диаграмма распределения плотности тока; в) рабочая часть проводника

Это явление отеснения тока в верхние части проводников особенно сильно сказывается в момент включения двигателя, когда частота тока в роторе равна частоте тока сети и, следовательно, при пуске в ход

увеличивается активное сопротивление обмотки ротора, в результате чего возрастает пусковой момент. При увеличении скорости вращения ротора частота тока в его обмотке уменьшается, и ток более равномерно распределяется по сечению стержней и при нормальной скорости вращения неравномерность распределения тока по поперечному сечению стержней почти полностью исчезает.

Пусковой момент двигателей этого типа $M_{\Pi} = (1,2 - 1,5)M_H$.

Регулирование скорости АД с короткозамкнутым ротором.

Изменение скорости вращения двигателей с короткозамкнутым ротором возможно при изменении частоты f_1 , U_1 и числа пар полюсов p . К способам регулирования скорости предъявляются весьма высокие требования как в отношении их экономичности и надежности в работе, так и в отношении пределов и плавности регулирования.

Регулирование скорости изменением частоты питающей сети.

Частота промышленных сетей f_1 обычно постоянна и равна 50 Гц. Поэтому для изменения частоты питающей сети требуется применять преобразователь частоты. Следует иметь в виду, что при изменении частоты напряжения на зажимах, магнитный поток, ток холостого хода, вращающий момент, мощность и другие параметры машины в общем случае также не остаются постоянными. Механические характеристики при изменении частоты f_1 и постоянном напряжении представлены на рисунке 2.5.

При регулировании скорости желательно сохранять перегрузочную способность, для этого необходимо одновременно и пропорционально изменять частоту и ЭДС обмотки статора или питающее напряжение U_1 , так как оно мало отличается от ЭДС. Этот способ позволяет обеспечить широкий диапазон плавного и экономичного регулирования скорости. Механические характеристики при этом способе регулирования скорости представлены на рисунке 2.9.

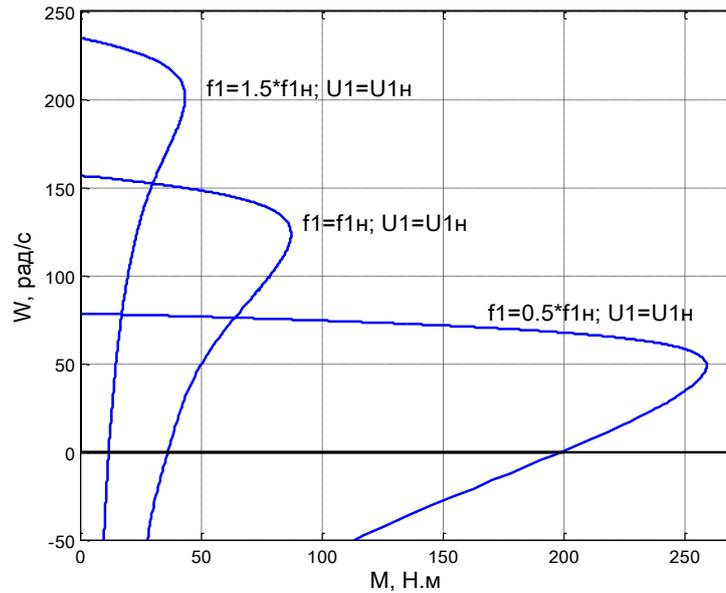


Рисунок 2.5 - Механические характеристики при различных частотах и неизменном напряжении

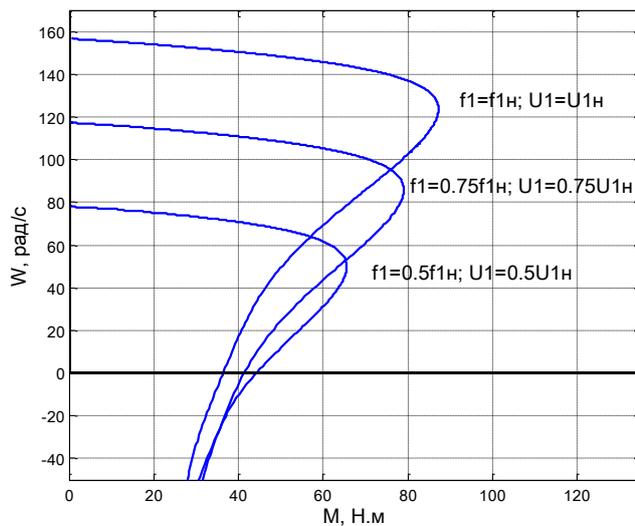


Рисунок 2.6 - Механические характеристики при пропорциональном изменении частоты и напряжения

Регулирование скорости изменением числа пар полюсов. Так как скорость вращения вращающегося поля $\omega_1 = 60f_1/p$, при постоянном значении частоты сети f_1 зависит только от числа пар полюсов этого поля, то, изменяя его, можно изменить также и скорость вращения ротора двигателя. Этот способ дает возможность регулировать скорость вращения асинхронного

двигателя без таких больших потерь мощности, как при реостатном способе, что достигается за счет усложнения и удорожания конструкции машины.

Ввиду того, что число пар полюсов p может быть только целым числом, при переключении числа пар полюсов изменение скорости будет происходить ступенчато. Такие двигатели часто называются многоскоростными.

Разместив на статоре две отдельные обмотки (одну на p пар полюсов, а другую на p_1 пар полюсов) и включая их поочередно, можно получить две скорости вращения поля, а следовательно, и две скорости вращения ротора. Отношение скоростей будет обратно пропорционально отношению числа пар полюсов.

Ротор двигателя при этом должен иметь короткозамкнутую обмотку, для которой число полюсов создаваемого поля всегда равно числу полюсов вращающегося поля обмотки статора.

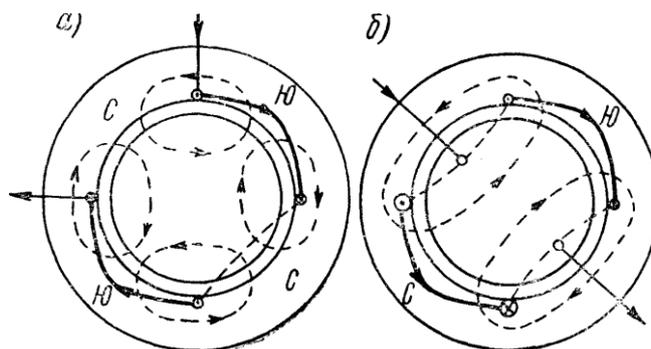


Рисунок 2.7 - Изменение числа пар полюсов асинхронного двигателя переключением цепей обмотки статора: а - при большем числе полюсов; б - при числе полюсов в 2 раза меньшем

Более простым и дешевым является способ, при котором на статоре укладывается одна обмотка, позволяющая производить изменение числа пар полюсов обмотки статора. Увеличение или уменьшение пар полюсов, например, вдвое может быть произведено сравнительно просто. Для этого каждая фаза обмотки статора делится на две одинаковые части - полуобмотки и в одной из них изменяется направление тока.

На рисунке 2.7 показаны схемы обмотки статора при изменении числа пар полюсов в отношении 2:1.

Следовательно, при переключении числа пар полюсов могут быть изменены характеристики обмотки и индукция в воздушном зазоре.

Различными способами переключения числа пар полюсов можно осуществить работу двигателя в двух режимах: 1) сохраняя постоянство вращающего момента и изменение мощности пропорционально скорости вращения (переключение обмотки со звезды на двойную звезду); 2) сохраняя примерное постоянство мощности и изменение вращающего момента обратно пропорционально скорости вращения (переключение обмотки с треугольника на двойную звезду).

Асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов изготавливают в основном как двухскоростные и реже (небольшой мощности) как трех- и четырехскоростные. Трех- и четырехскоростные двигатели выпускают с двумя обмотками на статоре, причем одну из них или обе выполняют с переключением числа пар полюсов.

К недостаткам многоскоростных двигателей следует отнести их увеличенные размеры по сравнению с нормальными асинхронными двигателями и более высокую стоимость.

2.3. Математические модели асинхронной машины

Математическое описание обобщённой машины. Обобщённая асинхронная машина содержит трёхфазную обмотку на роторе и статоре. Обмотки подключены к симметричным источникам напряжения. Математическое описание такой машины базируется на известных законах.

Уравнения равновесия ЭДС на обмотках статора и ротора базируется на втором законе Кирхгофа.

Для статора:

Для ротора:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}, \\ u_B &= R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}, \\ u_C &= R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} u_a &= R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}, \\ u_b &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \\ u_c &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

В уравнениях (2.4) фигурируют мгновенные напряжения, токи и потокосцепления статора и ротора, а также активные сопротивления обмоток. Обычно обмотки выполняются симметричными, к поэтому $R_A=R_B=R_C=R_S$ - активное сопротивление статорной обмотки, $R_a=R_b=R_c=R_R$ - активное сопротивление роторной обмотки.

Вторым используемым законом является **закон Ампера**, который связывает потокосцепления обмоток с токами, протекающими по обмоткам:

Для статора:

$$\left. \begin{aligned} \psi_A &= L_{AA}i_A + L_{AB}i_B + L_{AC}i_C + L_{Aa}i_a + L_{Ab}i_b + L_{Ac}i_c, \\ \psi_B &= L_{BA}i_A + L_{BB}i_B + L_{BC}i_C + L_{Ba}i_a + L_{Bb}i_b + L_{Bc}i_c, \\ \psi_C &= L_{CA}i_A + L_{CB}i_B + L_{CC}i_C + L_{Ca}i_a + L_{Cb}i_b + L_{Cc}i_c. \end{aligned} \right\} \quad (2.5 a)$$

Для ротора:

$$\left. \begin{aligned} \psi_a &= L_{aA}i_A + L_{aB}i_B + L_{aC}i_C + L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c, \\ \psi_b &= L_{bA}i_A + L_{bB}i_B + L_{bC}i_C + L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c, \\ \psi_c &= L_{cA}i_A + L_{cB}i_B + L_{cC}i_C + L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c. \end{aligned} \right\} \quad (2.5 б)$$

Удивительно симметричные уравнения для определения потокосцеплений показывают, что потокосцепление каждой обмотки зависит от токов во всех обмотках; эти зависимости проявляются через взаимную индукцию. В уравнениях (2.5) L_{AA} , L_{BB} , L_{CC} , L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} , являются собственными индуктивностями соответствующих обмоток, все остальные - взаимными индуктивностями между соответствующими обмотками.

Третьим законом, лежащим в основе анализа, является второй закон Ньютона - закон равновесия моментов на валу машины:

$$J \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} = \bar{M} - \bar{M}_c, \quad (2.6)$$

где J (кг·м²) - момент инерции на валу машины, учитывающий инерционность как самой машины, так и приведенной к валу инерционности рабочего механизма и редуктора, ω_m ($\frac{rad}{c}$) - угловая скорость вала машины, \bar{M}_c (Н·м) - момент рабочего механизма, приведенный к валу, в общем случае он может быть функцией скорости и угла поворота, $M_c = M_2 + M_0$.

Наконец, четвертым и последним законом, лежащим в основа анализа машины, является закон, сформулированный Ленцем, как правило левой руки. Этот закон связывает векторные величины момента, потокосцепления и тока:

$$\bar{M} = k(\bar{\psi} \times \vec{i}) . \quad (2.7)$$

Следует сразу подчеркнуть, что, несмотря на полное и строгое математическое описание, использование уравнений (2.4) - (2.7) для исследования машины встречает серьезные трудности. Из них основные:

- в уравнениях (2.6 и 2.7) фигурируют векторные величины, а в уравнениях (2.4 и 2.5) скалярные;
- количество взаимосвязанных уравнений равно 16, а количество коэффициентов - 44;
- коэффициенты взаимоиנדукции между обмотками статора и ротора в уравнениях (2.5) являются функцией угла поворота ротора относительно статора, то есть уравнения (2.5) являются уравнениями с переменными коэффициентами;
- уравнение (2.7) является нелинейным, так как в нем перемножаются переменные.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПРОГРАММЕ MATLAB

3.1 Пакет визуального программирования Simulink

Одной из наиболее привлекательных особенностей системы MATLAB является наличие в ней наглядного и эффективного средства составления программных моделей - пакета визуального программирования Simulink.

Пакет Simulink позволяет осуществлять исследование (моделирование во времени) поведения динамических линейных и нелинейных систем, причем составление «программы» и ввод характеристик систем можно производить в диалоговом режиме, путем сборки на экране схемы соединений элементарных (стандартных или пользовательских) звеньев. В результате такой сборки получается модель системы (называемая S-моделью), которая сохраняется в файле с расширением *.mdl. Такой процесс составления вычислительных программ принято называть визуальным программированием.

S-модель может иметь иерархическую структуру, то есть состоять из моделей более низкого уровня, причем количество уровней иерархии практически не ограничено. В процессе моделирования есть возможность наблюдать за процессами, которые происходят в системе. Для этого используются специальные блоки («обзорные окна»), входящие в состав библиотеки Simulink. Библиотека может быть пополнена пользователем за счет разработки собственных блоков.

Создание моделей в пакете Simulink основывается на использовании технологии Drag-and-Drop (шаг за шагом). В качестве «кирпичиков» при построении S-модели применяются визуальные блоки (модули), которые сохраняются в библиотеках Simulink.

Библиотека блоков Simulink (рисунок 3.1) – это набор визуальных объектов, при использовании которых, соединяя отдельные блоки между собой линиями связей, можно составлять функциональную блок-схему любого устройства.

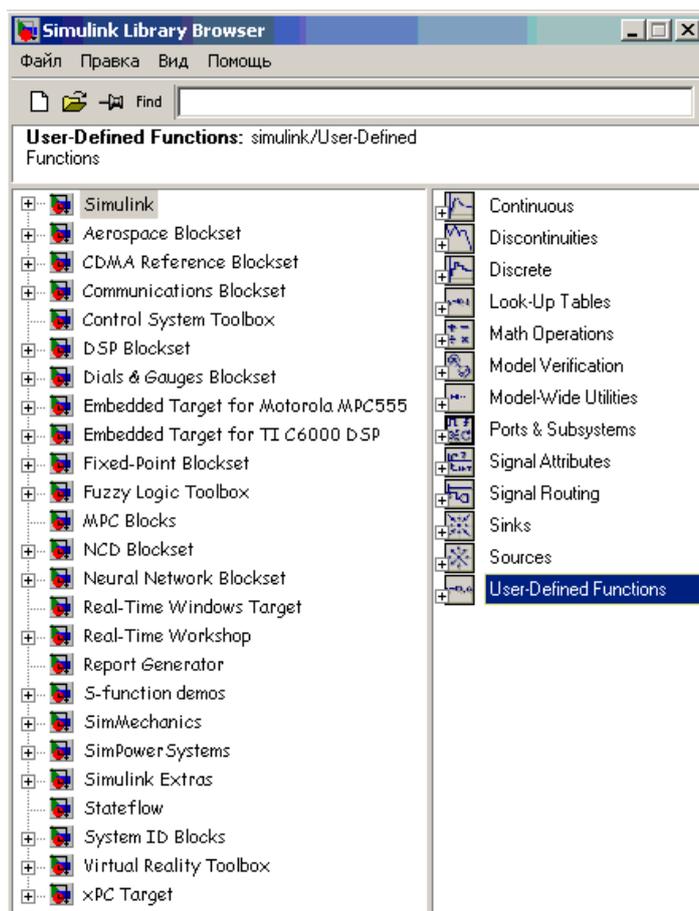


Рисунок 3.1 - Окно Simulink Library Browser

Сборка блок-схемы S-модели заключается в том, что графические изображения выбранных блоков с помощью мыши перетягиваются из окна раздела библиотеки в окно блок-схемы, а затем выходы одних блоков в окне блок-схемы соединяются со входами других блоков (также с помощью мыши). Соединение блоков выполняется следующим образом: указатель мыши подводят к определенному выходу нужного блока (при этом указатель должен приобрести форму крестика), нажимают левую кнопку и, не отпуская ее, перемещают указатель к нужному входу другого блока, а потом отпускают кнопку. Если соединение осуществлено верно, на входе последнего блока появится изображение черной стрелки.

Сборка модели осуществляется в рабочем поле специального окна (рисунок 3.2). Это окно имеет строку меню, панель инструментов и рабочее поле. Меню File (Файл) содержит команды, предназначенные для работы с MDL - файлами; меню Edit (Правка) - команды редактирования блок-схемы; меню View (Вид) команды изменения внешнего вида окна; меню Simulation

(Моделирование) - команды управления процессом моделирования; меню Format (Формат) - команды редактирования формата (то есть команды, позволяющие изменить внешний вид отдельных блоков и блок-схемы в целом). Меню Tools (Инструменты) включает некоторые дополнительные сервисные средства, предназначенные для работы с S-моделью.

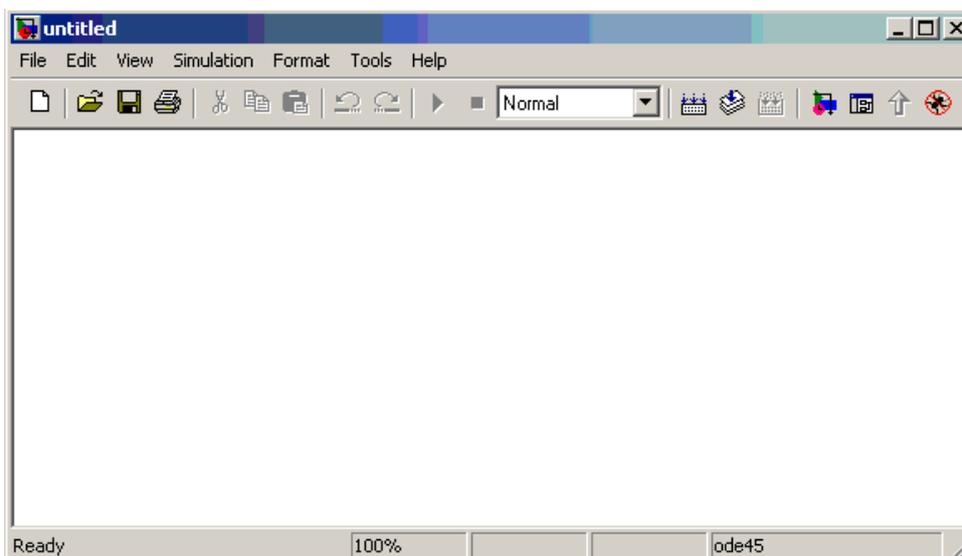


Рисунок 3.2 - Окно, в котором осуществляется сборка модели

Любая блок-схема моделируемой системы должна включать в себя один или несколько блоков-источников, генерирующих сигналы, которые, собственно, и вызывают «движение» моделируемой системы, и один или несколько блоков-приемников, которые позволяют получить информацию о выходных сигналах этой системы (увидеть результаты моделирования).

Запуск модели на выполнение осуществляется нажатием на кнопку , либо через меню Simulation→Start, остановка нажатием на кнопку , либо через меню Simulation→Stop, пауза - на кнопку , либо через меню Simulation→Pause, пауза активна, когда модель запущена на выполнение. Кнопки расположены на панели инструментов.

Расчёт параметров модели для АД серии 4А. Для моделирования выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором марки 4А112М4У3 со следующими паспортными данными:

- номинальная выходная мощность $P_{2н}=5.5$ кВт,
- номинальное фазное напряжение обмотки статора $U_{1н}=220$ В,

- номинальная частота тока $f_1=50$ Гц,
- номинальный коэффициент полезного действия $\eta_n=85.5\%$,
- номинальный коэффициент мощности статорной обмотки $\cos\varphi=0.85$,
- критическое скольжение ротора $S_k=25\%$,
- номинальное скольжение ротора $S_n=3.6\%$,
- число пар полюсов: $p=2$,
- число фаз: $m=3$,
- скорость холостого хода: $n_1=1500$ об/мин,
- момент инерции на валу машины: $J=0,017$ кг·м²,
- параметры Г-образной схемы замещения в режиме короткого замыкания (рисунок 4.3) в относительных единицах:
- в номинальном режиме:
 $R'_1=0.064$, $X'_1=0.078$, $R''_2=0.041$, $X''_2=0.13$, $X_m=2.8$,
- в режиме короткого замыкания:
 $R''_{2кз}=0.048$, $X''_2=0.062$.

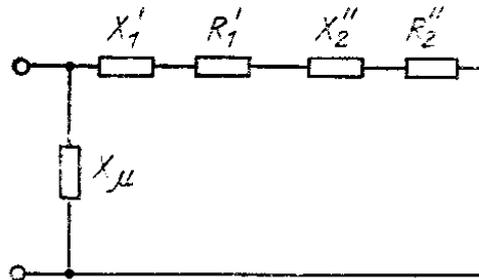


Рисунок 3.3 – Г-образная схема замещения

По известным паспортным данным АД и параметрам Г-образной схемы замещения рассчитываются параметры Т-образной схемы замещения в режиме короткого замыкания (рисунок 3.4) и коэффициенты системы уравнений (3.2) и параметры блоков модели АД.

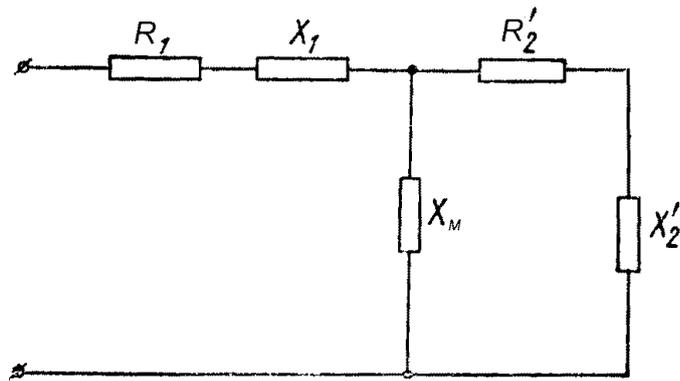


Рисунок 3.4 – Т-образная схема замещения

Номинальный фазный ток статора

$$I_{1n} = \frac{P_{2n} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1n} \cdot \eta_n \cdot \cos \phi_n} = \frac{5.5 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.855 \cdot 0.85} = 11.467 \text{ А.} \quad (3.1)$$

Базисное значение сопротивления

$$Z_{\text{баз}} = \frac{U_{1n}}{I_{1n}} = \frac{220}{11.467} = 19.186 \text{ Ом.} \quad (3.2)$$

Угловая частота тока

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}. \quad (3.3)$$

Реактивное сопротивление рассеяния статора в относительных единицах

$$X_{1*} = \frac{2 \cdot X_{1*}^{\wedge} \cdot X_{m*}}{X_{m*} + \sqrt{X_{m*}^2 + 4 \cdot X_{1*}^{\wedge} \cdot X_{m*}}} = \frac{2 \cdot 0.078 \cdot 2.8}{2.8 + \sqrt{2.8^2 + 4 \cdot 0.078 \cdot 2.8}} = 0.0759. \quad (3.4)$$

Коэффициент, связывающий параметры машины в Т и Г-образной схемах замещения

$$c_1 = \frac{X_{1*}^{\wedge}}{X_{1*}} = \frac{0.078}{0.0759} = 1.027. \quad (3.5)$$

Реактивное сопротивление рассеяния фазы статора

$$X_1 = \frac{X_{1*}^{\wedge} \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1} = \frac{0.078 \cdot 19.186}{1.027} = 1.457 \text{ Ом.} \quad (3.6)$$

Активное сопротивление фазы статора

$$R_1 = R_s = \frac{R_{1*}^{\wedge} \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1} = \frac{0.064 \cdot 19.186}{1.027} = 1.1955 \text{ Ом.} \quad (3.7)$$

Индуктивность рассеяния фазы статора

$$L_{1s} = \frac{X_1}{\omega_1} = \frac{1.457}{314} = 0.0046 \text{ Гн.} \quad (3.8)$$

Реактивное сопротивление рассеяния фазы ротора

$$X_2 = \frac{X_{2*} \cdot Z_{баз}}{c_1^2} = \frac{0.13 \cdot 19.186}{1.027^2} = 2.365 \text{ Ом.} \quad (3.10)$$

Активное сопротивление фазы ротора

$$R_2 = R_R = \frac{R_{2*} \cdot Z_{баз}}{c_1^2} = \frac{0.041 \cdot 19.186}{1.027^2} = 0.7456 \text{ Ом.} \quad (3.11)$$

Индуктивность рассеяния фазы ротора

$$L_{2s} = \frac{X_2}{\omega_1} = \frac{2.365}{314} = 0.0075 \text{ Гн.} \quad (3.12)$$

Реактивное сопротивление взаимоиндукции

$$X_m = X_{m*} \cdot Z_{баз} = 2.8 \cdot 19.186 = 53.72 \text{ Ом.} \quad (3.13)$$

Индуктивность взаимоиндукции

$$L_m = \frac{X_m}{1.5 \cdot \omega_1} = \frac{53.72}{1.5 \cdot 314} = 0.114 \text{ Гн.} \quad (3.14)$$

Полная индуктивность фазы статора

$$L_s = L_m + L_{1s} = 0.114 + 0.0046 = 0.1186 \text{ Гн.} \quad (3.15)$$

Полная индуктивность фазы ротора

$$L_R = L_m + L_{2s} = 0.114 + 0.0075 = 0.1215 \text{ Гн.} \quad (3.16)$$

Настраиваемыми параметрами являются:

Sine type – тип синусоидальной волны,

Amplitude - амплитуда сигнала, для данной схемы $\sqrt{2} \cdot U_{1n} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311$

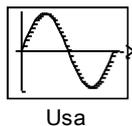
Bias – смещение (постоянная составляющая синусоиды),

Frequency – угловая частота колебаний, для данной схемы равная ω_1 ,

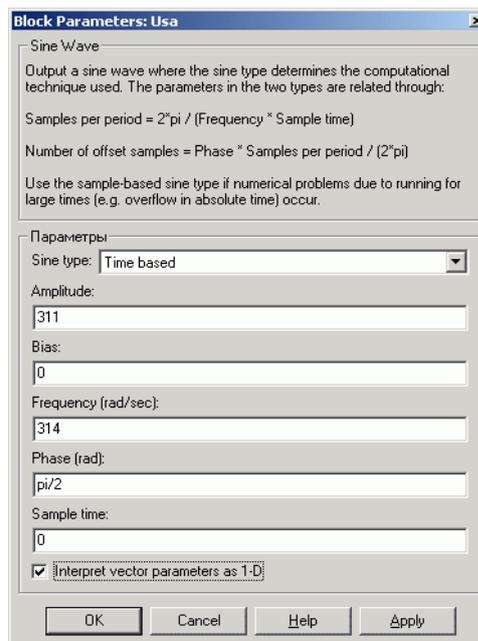
Phase – начальная фаза (в радианах), равная:

$\frac{\pi}{2}$ - для косинусоиды, 0 – для синусоиды,

Sample time – величина дискрета времени.



а)



б)

Рисунок 3.5 - Блок Usa: а) внешний вид, б) окно параметров

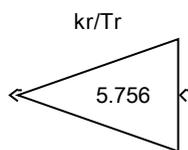
Блок k_R/T_R (рисунок 3.6) осуществляет умножение входного сигнала на постоянную величину, значение которой задаётся в настройке блока.

Аналогичные в схеме блоки: $k_R \cdot p$, $k_R \cdot R_R$, p , $k_R \cdot 1.5 \cdot p$, $1/J$, F .

Настраиваемыми параметрами являются:

Gain – коэффициент усиления, для данной схемы $k_R/T_R=5.756$,

Multiplication – тип способа умножения.



а)



б)

Рисунок 3.6 - Блок k_R/T_R : а) внешний вид, б) окно параметров

Блок Sum (рисунок 3.7) суммирует поступающие на него сигналы (в том числе с разными знаками).

Настраиваемыми параметрами являются:

Icon shape – форма изображения (круг или прямоугольник),

List of signs – список входов и их знаки.

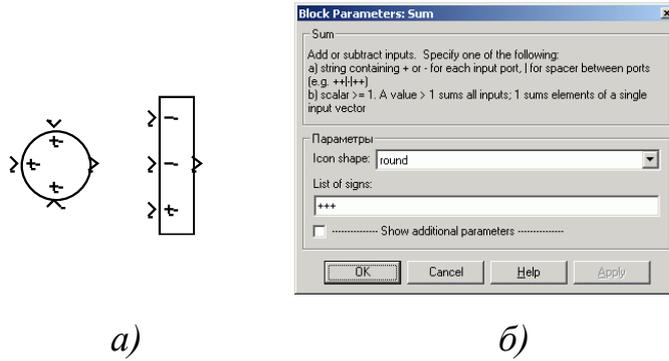


Рисунок 3.7 - Блок Sum: а) внешний вид, б) окно параметров

Блок $\frac{1/r}{T_s s + 1}$ (рисунок 3.8) реализует звено введённой в него

передаточной функции. Аналогичный в схеме блок: $\frac{T_R}{T_R s + 1}$.

Настраиваемыми параметрами являются:

Numerator – числитель, для данной схемы $1/r = 0.54$,

Denominator – делитель, для данной схемы $T_s = 0.0063$.

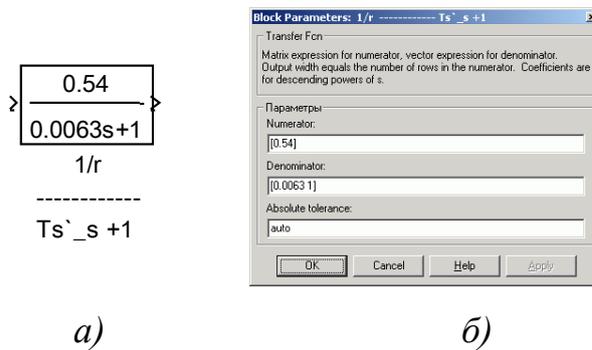


Рисунок 3.8 - Блок $\frac{1/r}{T_s s + 1}$: а) внешний вид, б) окно параметров

Блок Klych (рисунок 4.10) служит для переключения типа момента нагрузки на валу, либо M2 либо $\alpha \cdot M2$. Переключение происходит при двойном нажатии правой кнопкой мыши на блоке.

Настраиваемых параметров не имеет.



Klych

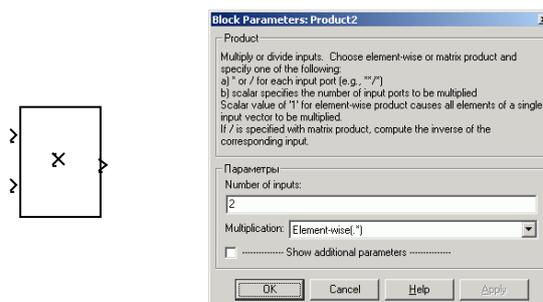
Рисунок 3.9 - Блок *Klych*

Блок Product (рисунок 3.10) выполняет умножение (деление) входных сигналов.

Настраиваемыми параметрами являются:

Number of inputs – количество входов,

Multiplication – тип способа умножения.



а)

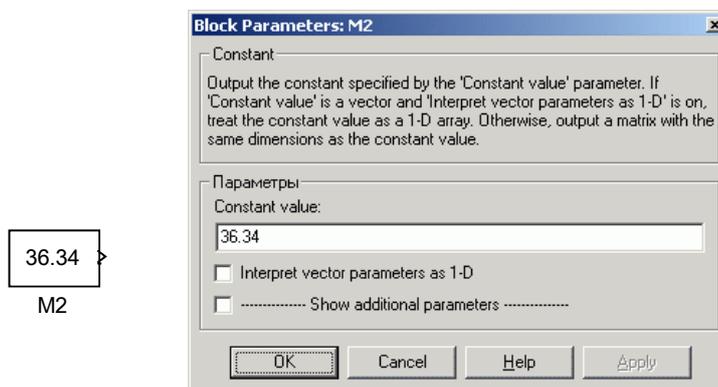
б)

Рисунок 3.10 - Блок *Product*: а) внешний вид, б) окно параметров

Блок M2 (рисунок 3.11) формирует постоянную величину нагрузки на валу, которая является неизменной во времени.

Настраиваемыми параметрами являются:

Constant value – постоянная величина.



а)

б)

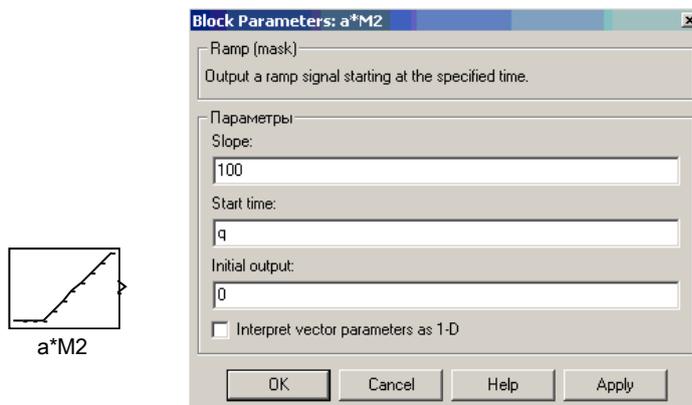
Рисунок 3.11 - Блок *M2*: а) внешний вид, б) окно параметров

Блок $\alpha \cdot M2$ (рисунок 3.12) является задатчиком нагрузки и устанавливает на валу линейно изменяющийся во времени момент нагрузки.

Настраиваемыми параметрами являются:

Slope – изменение величины за 1 секунду. В зависимости от знака возрастает или убывает,

Start time – момент времени в который начинает изменяться нагрузка,
 Initial output – начальное значение, с которого начнётся изменение нагрузки.



а) б)

Рисунок 3.12 - Блок $\alpha \cdot M2$: а) внешний вид, б) параметры

Настраиваемыми параметрами являются:

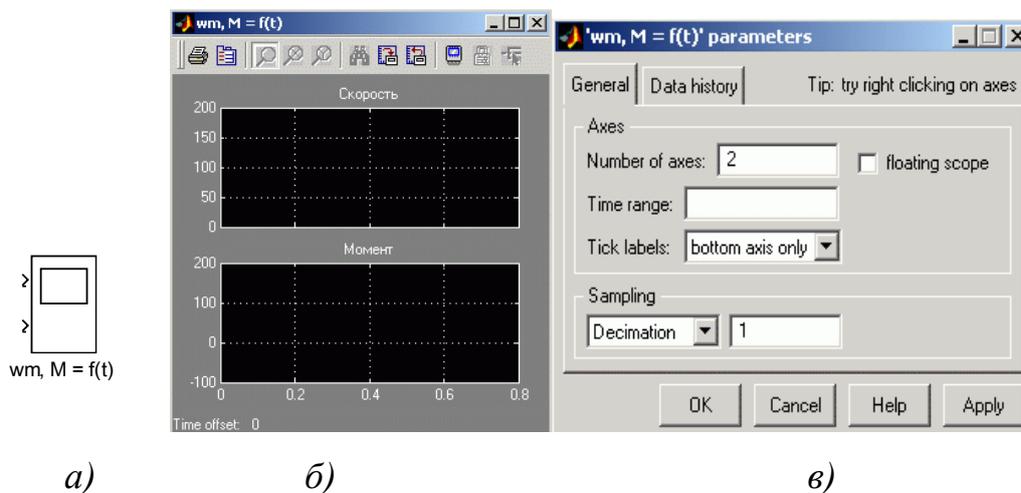
Number of axes – количество осей,

Time range – интервал времени,

Tick labels – метки осей,

Sampling – используется только для дискретных во времени процессов.

Его значение (1), установленное по умолчанию, для непрерывных процессов изменять не рекомендуется. Позволяет задать периодичность (через сколько дискретов времени) отображения значений времени.



а) б) в)

Рисунок 4.13 - Блок « $w_m, M=f(t)$ »: а) внешний вид, б) внутренний вид, в) окно параметров

Шинный формирователь Mux (рисунок 3.14) выполняет объединение входных величин в единый выходной вектор (шину), что очень удобно, так как схема получается мене загромождённой.

Настраиваемыми параметрами являются:

Number of inputs – число входов,

Display option – вид отображения блока.

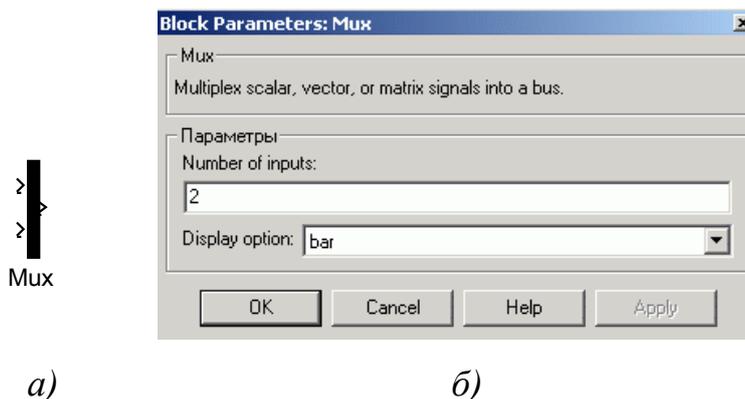


Рисунок 3.14 - Блок Mux: а) внешний вид, б) окно параметров

Цифровой дисплей «wm, M» (рисунок 3.15) выводит на экран числовые значения входящих в блок величин (скорости и момента).

Настраиваемыми параметрами являются:

Format – формат вывода чисел,

Decimation – позволяет задать периодичность (через сколько дискретов времени) отображения значений времени,

Sample time – используется только для дискретных во времени процессов. Его значение (-1), установленное по умолчанию, для непрерывных процессов изменять не рекомендуется.

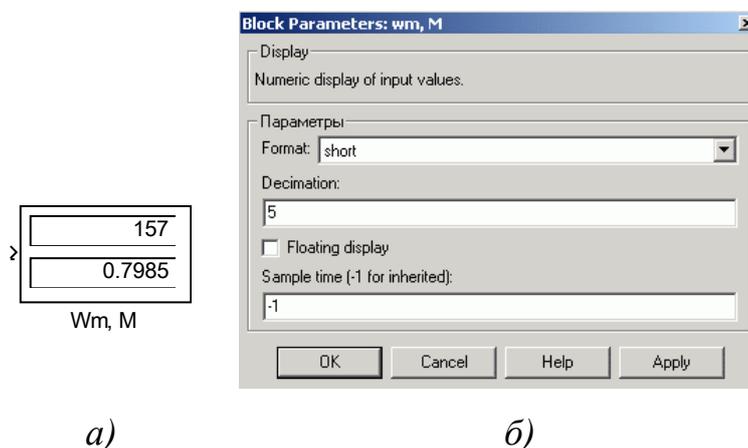


Рисунок 3.15 - Блок «wt, M»: а) внешний вид, б) окно параметров

Осциллограф XY (рисунок 3.16) – графическое окно, отображающее зависимость одной переменной от другой. В данной схеме отображает механическую характеристику. Большим минусом этого блока является то, что в графическом окне нет сетки и нет возможности нанести надписи.

Настраиваемыми параметрами являются:

x-min, x-max, y-min, y-max – пределы осей по X и Y,

Sample time – смотри выше.

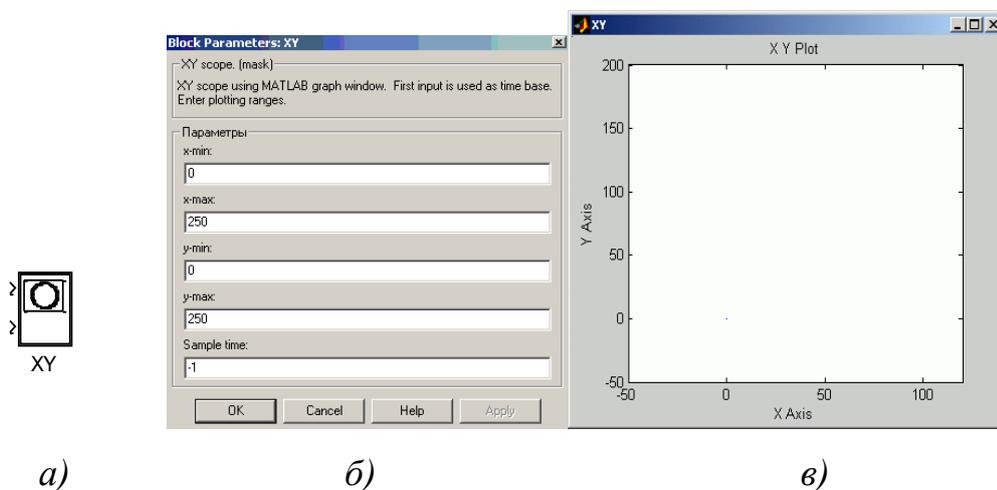


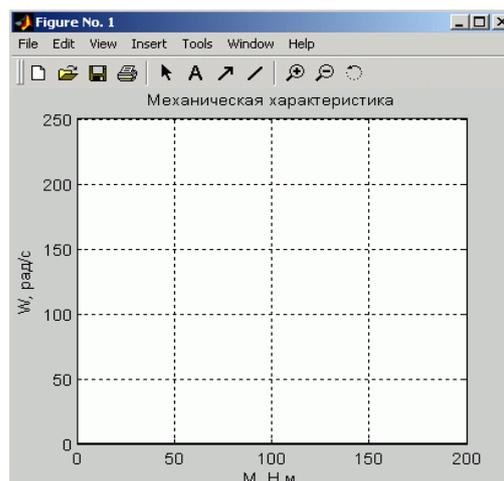
Рисунок 3.16 - Блок XY: а) внешний вид, б) окно параметров, в) графическая область

Блок «Построение механической характеристики» (рисунок 3.17) является ссылкой на специально разработанную М-программу, в которой реализуется графическое построение механической характеристики. Большим удобством является то, что имеется сетка и можно наносить надписи осей и в графической области, а также редактирование полученных результатов.

Построение механической характеристики

$$W=f(M)$$

а)



б)

Рисунок 3.17 - Графическое окно для построения характеристик: а) внешний вид, б) графическая область

Результаты моделирования. После запуска схемы модели на моделирование и завершения процедуры моделирования можно проанализировать полученные результаты.

Графический дисплей «wm, $M=f(t)$ » отображает переходной процесс скорости и момента во времени.

При прямом пуске вначале наблюдаются значительные колебания момента и скорости. При приложении момента нагрузки, аналогично наблюдаются колебания момента и скорости, но менее значительные, чем при пуске, также видно, что при приложении момента нагрузки наблюдается уменьшение скорости.

Получив механическую характеристику, можно увидеть, что при пуске она получается динамической и на ней чётко виден колебательный процесс скорости и момента в виде концентрических окружностей с уменьшающимся радиусом по мере затухания колебаний скорости и момента. Аналогичная картина наблюдается при ступенчатом набросе нагрузки.

3.2 Разработка виртуальной лабораторной работы на базе виртуальной асинхронной машины

Иную возможность анализа АД представляет специализированный раздел по электротехнике Toolbox Power System Block. В его библиотеке имеются блоки виртуальных электрических машин и АД с короткозамкнутым и фазным ротором в том числе.

Схема виртуальной лабораторной работы для исследования двигателя с короткозамкнутым ротором представлена на рисунке 3.18.

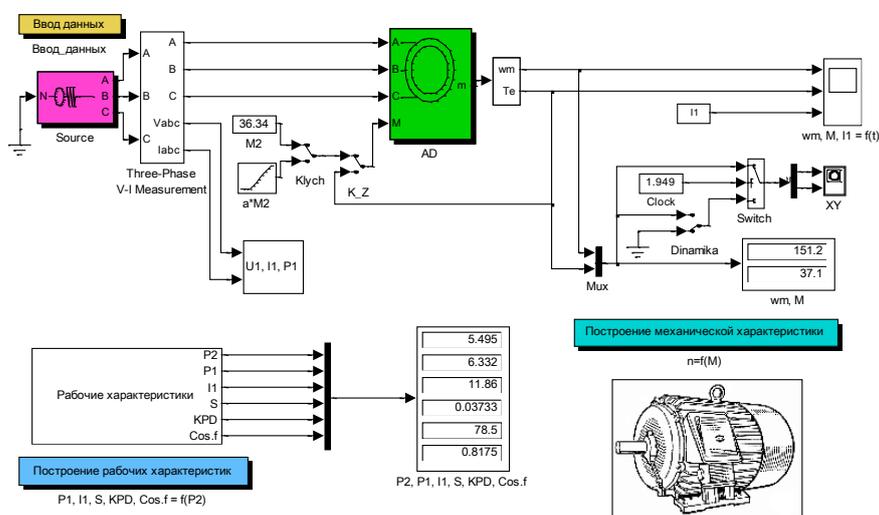


Рисунок 3.18 - Схема модели лабораторной работы для исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Поблочное описание схемы. Основными блоками схемы являются: источник трёхфазного напряжения (Source), трёхфазный измеритель напряжения и тока (Three-Phase V-I Measurement), трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (AD), датчик нагрузки (M2 и $\alpha \cdot M2$), измеритель (вывод) скорости и электромагнитного момента на валу (wm, Te).

Дополнительные блоки: переключатели (Klych и K_Z), управляемый ключ (Switch), машинное время (Clock), осциллограф (XY), шинный формирователь (Mux), цифровые и графические дисплеи («wm, M, I1»; «P2, P1, I1, S, KPD, Cos.f»), «Рабочие характеристики», блок «U1. I1. P1».

Блоки программ: «Ввод данных», «Построение механической характеристики» и «Построение рабочих характеристик».

Источник трёхфазного напряжения Source (рисунок 3.19) имитирует работу трёхфазного источника синусоидального напряжения с заземлённой нейтралью N и выходами фаз A, B и C.

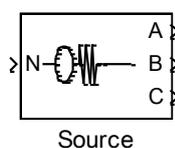
Настраиваемыми параметрами являются:

Phase to ground peak voltage (V) – амплитуда фазного напряжения,

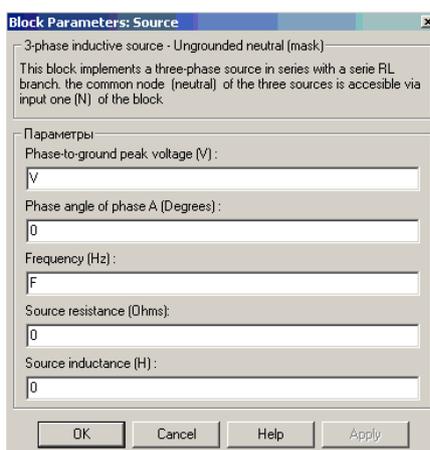
Phase angle of phase A (Degrees) – начальный фазовый угол фазы A,

Frequency (Hz) – частота напряжения,

Source resistance (Ohms), inductance (H) – сопротивление и индуктивность источника.



а)



б)

Рисунок 3.19 - Блок Source: а) внешний вид, б) окно параметров

Трёхфазный измеритель напряжения и тока Three-Phase V-I Measurement (рисунок 3.20) измеряет трёх фазное мгновенное напряжение и ток, потребляемые нагрузкой от источника.

Настраиваемыми параметрами являются:

Voltage measurement: phase-to-ground – измерение фазного напряжения от фазы до земли,

Use a label – использовать ярлык (ссылку) вместо выхода,

In pu – система относительных единиц,

Current measurement: yes – подтверждение измерения тока.

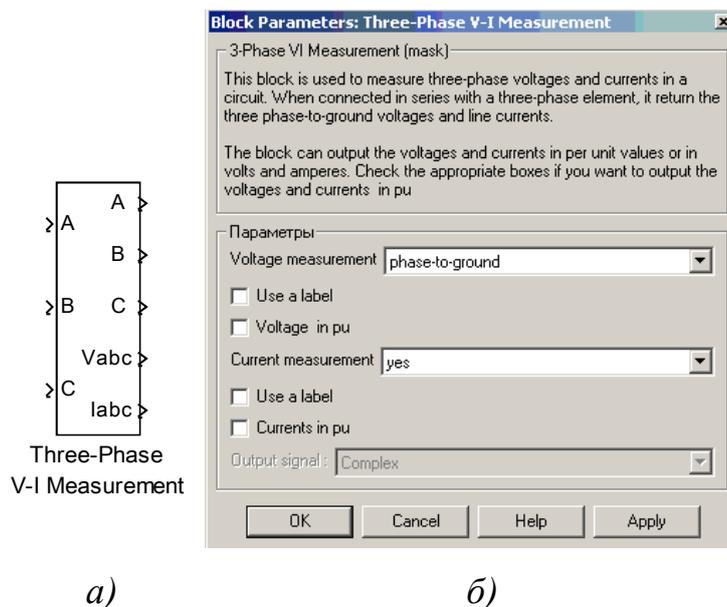


Рисунок 3.20 - Блок *Three-Phase V-I Measurement*: а) внешний вид, б) параметры

Трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором АД (рисунок 3.21) имитирует работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым (или фазным) ротором. Составлен на основе математических уравнений.

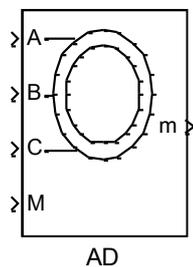
Настраиваемыми параметрами являются:

Nom. power P_n – номинальная мощность,

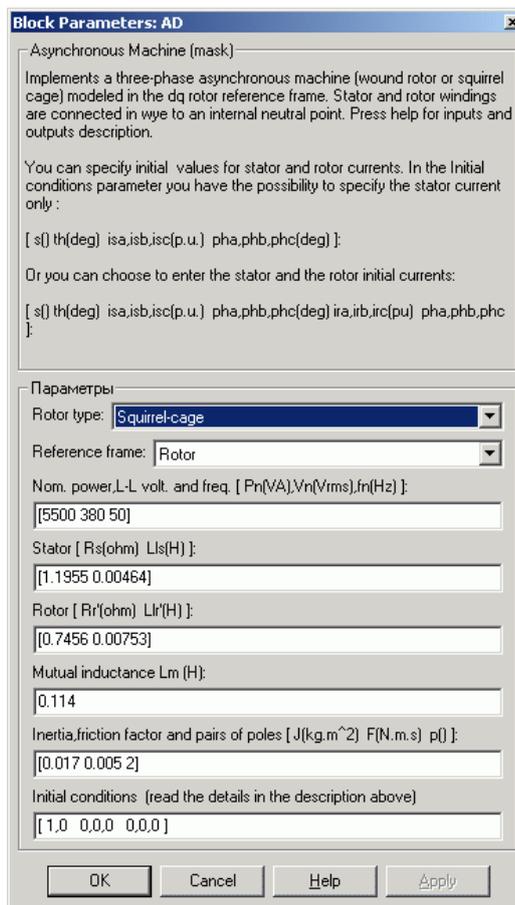
Volt V_n – номинальное линейное напряжение,

Frequency f_n – номинальная частота,

Stator (Rotor) R, L – активное сопротивление и индуктивность статора и приведённого ротора,



а)



б)

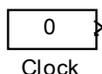
Рисунок 3.21 - Блок AD: а) внешний вид, б) параметры

Машинное время Clock (рисунок 3.22) отображает время моделирования.

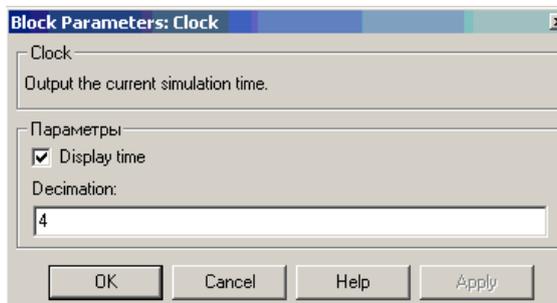
Настраиваемыми параметрами являются:

Display time – отображения времени в блоке,

Decimation – позволяет задать периодичность (через сколько дискретов времени) отображения значений времени.



а)



б)

Рисунок 3.22 - Блок Clock: а) внешний вид, б) параметры

Измеритель (вывод) «wm, Te» (рисунок 3.23) выводит для отображения различные параметры асинхронной машины. Имеет возможность выбрать необходимые для вывода параметры из имеющихся. В данной схеме выводятся значения угловой скорости и электромагнитного момента на валу.

Настраиваемыми параметрами являются:

Machine type – тип машины,

Rotor currents [ira irb irc] – трёхфазный ток ротора,

Rotor currents [ir_q ir_d] – ток ротора в осях q, d,

Rotor fluxes [phir_q phir_d] – поток в роторе в осях q, d,

Rotor voltages [vr_q vr_d]- напряжение в роторе в осях q, d,

Stator currents [ia ib ic] – трёхфазный ток статора,

Stator currents [is_q is_d] - ток статора в осях q, d,

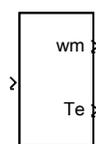
Stator fluxes [phis_q phis_d] – поток в статоре в осях q, d,

Stator voltages [vs_q vs_d] – напряжение в статоре в осях q, d,

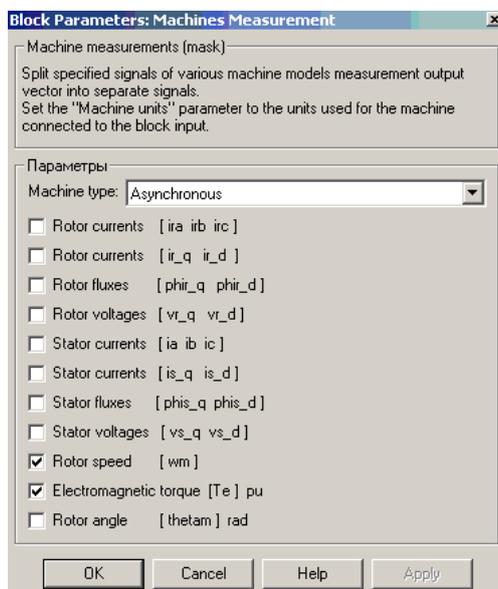
Rotor speed [wm] – скорость вращения ротора

Electromagnetic torque [Te] – электромагнитный момент,

Rotor angle [thetam] – угол поворота ротора.



а)



б)

Рисунок 3.23 - Блок «wm, Te»: а) внешний вид, б) параметры

Переключатели Klyuch, K_Z и Dinamika (рисунок 3.24) служат для переключения входного сигнала. Klyuch для переключения типа момента

нагрузки на валу, K_Z для переключения на схему снятия пускового момента, а Dinamika для снятия динамической механической характеристики. Переключение происходит при двойном нажатии правой кнопкой мыши на блоке.

Настраиваемых параметров не имеет.

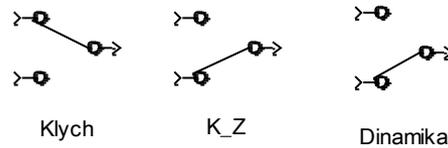
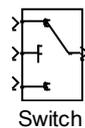


Рисунок 3.24 - Блоки Klych, K_Z и Dinamika

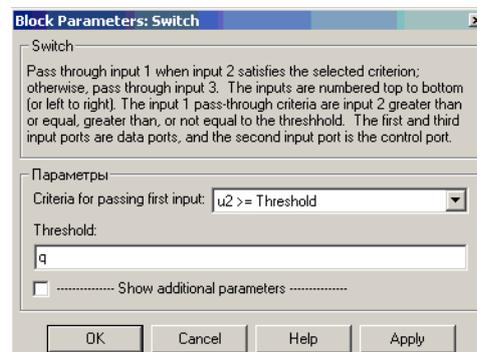
Управляемый ключ Switch (рисунок 3.25) служит для управляемого переключения входного сигнала. Имеет три входа, 1 и 3 - информационные, 2 - управляющий. Если величина управляющего сигнала не меньше некоторого ограничения, заданного в поле Threshold, то на выход подаётся сигнал с первого входа, в противном случае – сигнал с третьего входа. В схеме на первый вход подаётся вектор значений скорости и момента, также и на третий вход подаётся вектор скорости и момента при условии, что ключ Dinamika в верхнем положении, а на второй вход время.

Настраиваемыми параметрами являются:

Criteria for passing first input – критерий для прохождения сигнала с первого входа, Threshold – порог переключения входа.



а)



б)

Рисунок 3.25 - Блок Switch: а) внешний вид, б) параметры

Блок «Рабочие характеристики» (рисунок 3.26) – это не стандартный блок, он разработан при создании данной виртуальной лабораторной работы. Внутри него реализуется расчёт рабочих характеристик по следующим формулам:

$$P_2 = \omega_m \cdot M_2, \text{ КПД} = 100 \cdot \frac{P_2}{P_1 + p_{cm1}}, S = (n_1 - n) / n_1, \cos \phi = \frac{P_1 + p_{cm1}}{3 \cdot U_1 \cdot I_1},$$

к входной мощности добавляются потери в стали p_{cm1} , так как в модели они не учитываются.

Настраиваемых параметров не имеет.

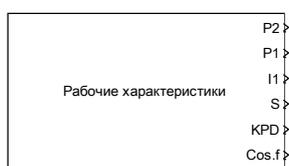


Рисунок 3.26 - Блок «Рабочие характеристики»

Блок «U1. I1. P1» (рисунок 3.27) также является не стандартным. В нём реализуется преобразование входных трёхфазных напряжений и токов в действующие значения, а также вычисление активной мощности.

Настраиваемых параметров не имеет.

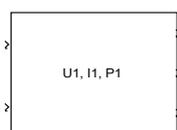


Рисунок 3.27 - Блок «U1. I1. P1»

Блоки программ: «Ввод данных», «Построение механической характеристики» и «Построение рабочих характеристик» (рисунок 3.28) – являются ссылками на специально написанные М-программы, в которых реализуется ввод данных с помощью меню (рисунок 3.29) и графическое построение (рисунок 3.30) механической и рабочих характеристик.

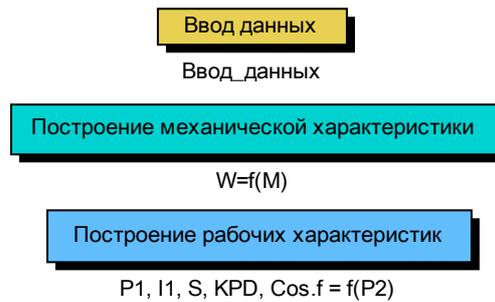


Рисунок 3.28 - Блоки программ

При открытии блока «Ввод данных», в котором реализована подпрограмма “Menu”, на экран выводится меню, в котором можно изменить параметры моделирования. Это является очень удобным элементом, так как не нужно перенастраивать саму модель и её блоки.

В меню ввода данных для модели:

время переходного процесса – это время необходимое для разгона двигателя до холостого хода при исчезновении колебаний момента и скорости,

время моделирования – время необходимое для выполнения одной процедуры моделирования,

амплитуда фазного напряжения – это номинальное значение $U_{1н}$ умноженное на $\sqrt{2}$,

частота – частота питающего напряжения.

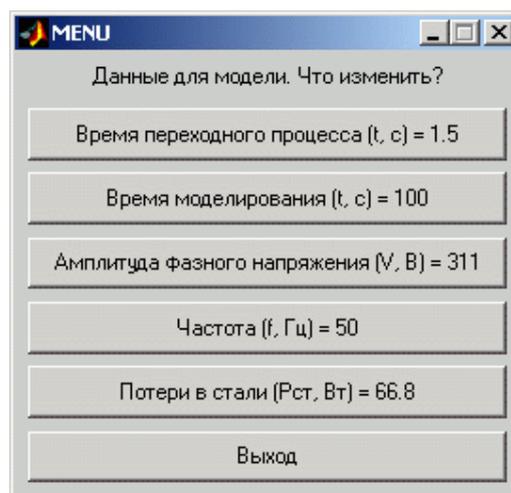


Рисунок 3.29 - Меню ввода данных

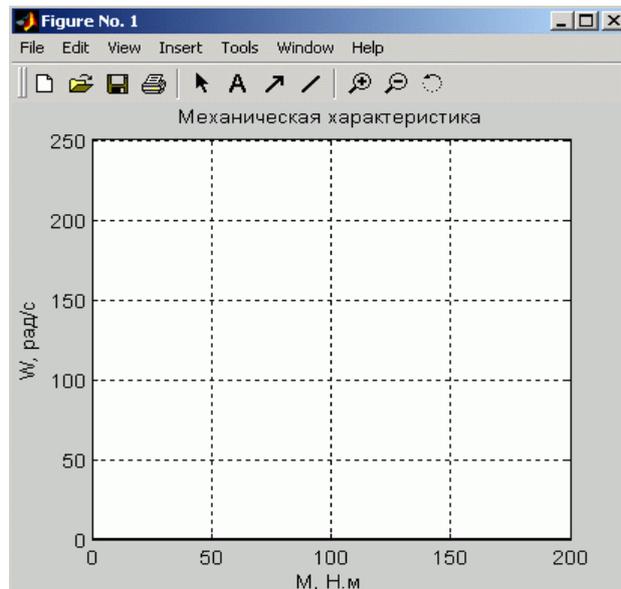


Рисунок 3.30 - Графическое окно для построения характеристик

Результаты моделирования. Графический дисплей «wm, $M=f(t)$ » отображает переходной процесс скорости и момента во времени, представленный на рисунке 3.31.

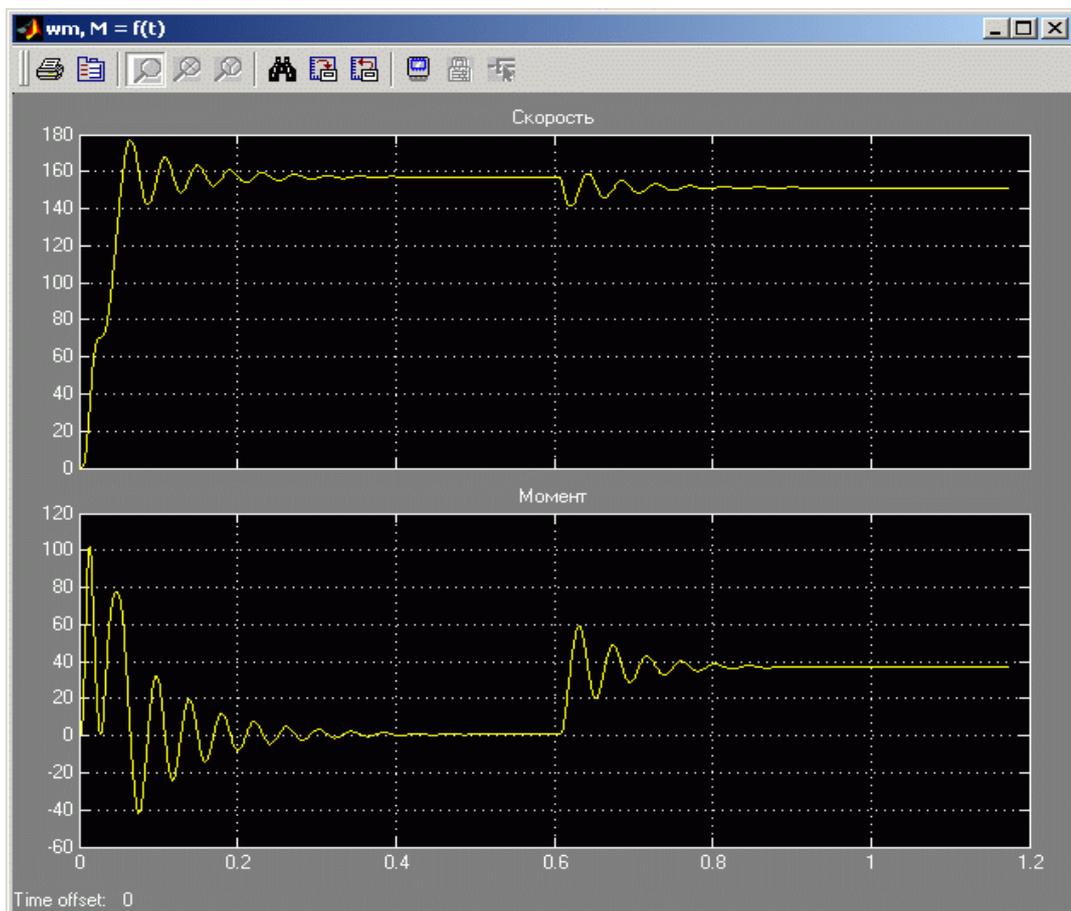


Рисунок 3.31 - Переходной процесс скорости и момента функции времени при пуске на холостом ходу и набросе нагрузки

Из рисунке 3.31 видно, что при прямом пуске вначале наблюдаются значительные колебания момента и скорости. При приложении момента нагрузки, аналогично наблюдаются колебания момента и скорости, но менее значительные, чем при пуске, также видно, что при приложении момента нагрузки наблюдается уменьшение скорости.

Получив механическую характеристику, можно увидеть, что при пуске она получается динамической и на ней также как и на рисунке 3.31 чётко виден колебательный процесс скорости и момента в виде концентрических окружностей с уменьшающимся радиусом по мере затухания колебаний скорости и момента. Аналогичная картина наблюдается при мгновенном набросе нагрузки. Данные характеристики представлены на рисунках 3.32 и 3.33.

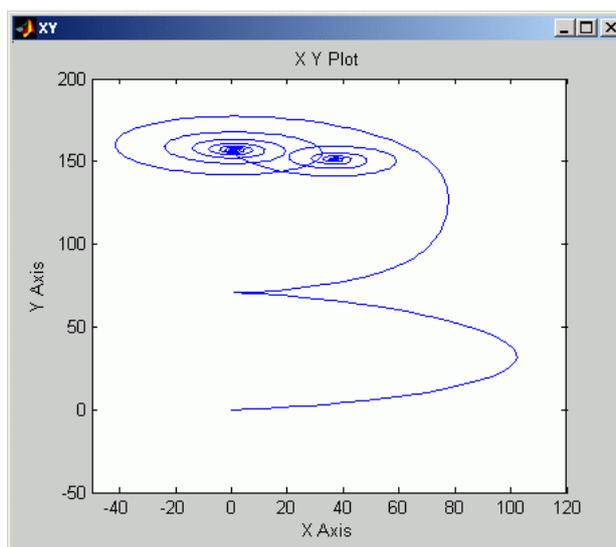


Рисунок 3.32 - Динамическая механическая характеристика при пуске на холостом ходу и набросе нагрузки, построенная блоком «XY»

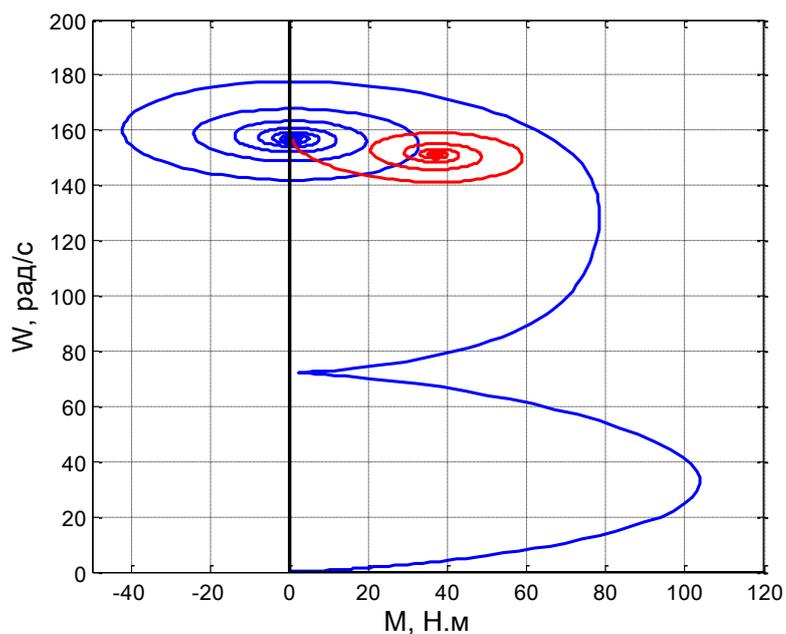


Рисунок 3.33 - Динамическая механическая характеристика при пуске на холостом ходу (синяя) и набросе нагрузки (красная), построенная блоком «Построение механической характеристики»

При нагружении двигателя с малой скоростью увеличения нагрузки получается характеристика, близкая к статической естественной механической характеристике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе были рассмотрены вопросы разработки виртуальных лабораторных работ по исследованию асинхронных двигателей серии 4А с короткозамкнутым и фазным ротором. Описаны устройство, принцип действия и способы регулирования скорости асинхронных двигателей.

Рассмотрено математическое описание обобщённой асинхронной машины и приведены уравнения для моделирования АД в неподвижной системе координат. По этим уравнениям составлена схема модели АД и проведён анализ переходных процессов в АД и сняты динамическая и статическая механические характеристики.

Поставленная задача реализована в наглядном и эффективном средстве визуального программирования моделей – пакете Simulink программы MATLAB.

Этот пакет также использовался при разработке методики выполнения виртуальных лабораторных работ по исследованию асинхронных двигателей серии 4А с короткозамкнутым и фазным ротором. По этой методике было проведено исследование переходных процессов, пусковых свойств, снятие естественных и искусственных механических характеристик при изменении питающего напряжения, частоты тока и вводе добавочного сопротивления в цепь фазного ротора, а также снятие рабочих характеристик.

Разработанные виртуальные лабораторные работы намного превосходят по техническим и экономическим возможностям реальную физическую лабораторную установку. В них имеется широчайший спектр возможностей по исследованию асинхронной машины в различных режимах работы, что в реальной лаборатории требует больших финансовых расходов из-за дороговизны необходимого оборудования. Но они не являются полной заменой реальной физической лаборатории, а только дополняют её, путём

подготовки студентов, так как студенты должны получить практические навыки работы в лаборатории.

Большим плюсом разработанных лабораторных работ является то, что виртуальную лабораторную можно использовать в дистанционном обучении студентов и в различных учебных заведениях, где нет возможности поработать в реальной лаборатории. Единственное, что необходимо для работы виртуальной лабораторной, это наличие персонального компьютера, который в наше время является общедоступным и имеется в каждом учебном заведении.

Рассмотрена техника безопасности, эксплуатация и влияние работы за компьютером на организм человека.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ