

М.С.Лурье, О.М.Лурье

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

Имитационное моделирование в лабораторном  
практикуме, курсовом и дипломном проектировании

Учебное пособие  
Часть 1

Красноярск  
2005

Федеральное агентство по образованию

**ГОУ ВПО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**Имитационное моделирование в лабораторном практикуме,  
курсовом и дипломном проектировании**

**Утверждено редакционно-издательским советом ГОУ ВПО «СибГТУ» в качестве  
учебного пособия для студентов всех форм обучения  
специальностей 1704, 1705, 2103, 2204, 2504, 2506, 2511, 2512, 2601, 2602, 2603, 2604,  
2605, 0305, 3207**

**I часть**

Красноярск  
2005

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Имитационное моделирование в лабораторном практикуме, курсовом и дипломном проектировании: Учебное пособие для студентов всех форм обучения специальностей 1704, 1705, 2103, 2204, 2504, 2506, 2511, 2512, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 0305, 3207. 1 часть/М.С.Лурье, О.М.Лурье - Красноярск: СибГТУ, 2005. – 103 с., рис. 92, табл. 2, библиограф. назв. 7.

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения неэлектротехнических специальностей. В данной части пособия рассмотрено применение программы Matlab и ее приложения Simulink для моделирования схем с электрическими машинами. Показана возможность создания на основе данной программной среды виртуальных лабораторных работ по темам: «Трансформаторы», «Асинхронные двигатели», «Машины постоянного тока». Приведены многочисленные примеры решения таких задач. Пособие будет полезно для студентов всех форм обучения при выполнении ими курсовых и дипломных работ.

ISBN 5-7931-0087-3

Рецензенты: М.С.Лурье, О.М.Лурье

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**Имитационное моделирование в лабораторном  
практикуме, курсовом и дипломном проектировании**

**Учебное пособие**

Красноярск  
2006

Федеральное агентство по образованию

**ГОУ ВПО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**Имитационное моделирование в лабораторном практикуме,  
курсовом и дипломном проектировании**

**Утверждено редакционно-издательским советом ГОУ ВПО «СибГТУ» в качестве  
учебного пособия для студентов всех форм обучения  
специальностей 1704, 1705, 2103, 2204, 2504, 2506, 2511, 2512, 2601, 2602, 2603, 2604,  
2605, 0305, 3207**

Красноярск  
2006

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Имитационное моделирование в лабораторном практикуме, курсовом и дипломном проектировании: Учебное пособие для студентов всех форм обучения специальностей 1704, 1705, 2103, 2204, 2504, 2506, 2511, 2512, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 0305, 3207. 2 часть/М.С.Лурье, О.М.Лурье - Красноярск: СибГТУ, 2006. – 103 с., рис. 92, табл. 2, библиограф. назв. 7.

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения неэлектротехнических специальностей. В нем рассмотрено применение программы **MATLAB** и ее приложения **Simulink** для моделирования схем с различными электротехническими устройствами. Все примеры и описания сделаны для новой версии программы **MATLAB 7 / Simulink 6**. Приведены многочисленные примеры решения таких задач. Пособие будет полезно для студентов всех форм обучения при выполнении ими курсовых и дипломных работ, а также аспирантам, занимающимся исследованиями работы динамических систем.

ISBN 5-7931-0087-3

Рецензенты: К.Т.Н., доц. Кожухов В.А. (КрасГАУ);  
доц. В.В. Силин (методический совет СибГТУ).

Редакционно-издательский отдел СибГТУ. 660049, Красноярск, пр. Мира, 82, тип. СибГТУ.

@ ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», 2006.

# Содержание

	Стр.
Содержание .....	7
Введение .....	9
1 Пакет для моделирования электротехнических систем SimPowerSystems. ....	12
1.1 Библиотека соединительных элементов Connectors .....	14
1.2 Библиотека источников электрической энергии Electrical Sources .....	15
1.2.1 Блок AC Current Source .....	15
1.2.2 Блок AC Voltage Source .....	16
1.2.3 Блок DC Voltage Source .....	16
1.2.4 Блок Controlled Current Source .....	17
1.2.5 Блок Controlled Voltage Source .....	18
1.3 Библиотека Elements — линейные и нелинейные компоненты электротехнических и электронных устройств .....	18
1.3.1 Блоки Series RLC Branch и Parallel RLC Branch .....	19
1.3.2 Блоки Series RLC Load и Parallel RLC Load .....	20
1.3.3 Блок Linear Transformer .....	21
1.3.4 Блок Saturable Transformer .....	23
1.3.5 Блок Mutual Inductance .....	25
1.3.6 Блок Breaker .....	26
1.3.7 Блоки PI Section Line и Distributed Parameters Line .....	27
1.4 Библиотека Machines — блоки моделирования электрических машин. ....	29
1.4.1 Блок DC Machine .....	30
1.4.2 Блок Asynchronous Machine SI Units и блок Machines Measurement Детих .....	33
1.4.3 Блок Synchronous Machine SI Fundamental .....	35
1.4.4 Блок Permanent Magnet Synchronous Machine .....	37
1.5 Библиотека Measurements – измерительные и контрольные устройства .....	39
1.6 Библиотека Power Electronics – устройства энергетической электроники .....	42
2 Построение блок-схем моделей в системе Simulink .....	44
2.1 Выделение объектов .....	44
2.2 Операции с блоками .....	45
2.2.1 Копирование и перестановка блоков .....	45
2.2.2 Установка параметров блока .....	45
2.2.3 Удаление блоков .....	46
2.2.4 Отсоединение блока .....	46
2.2.5 Изменение угловой ориентации блока .....	46
2.2.6 Изменение размеров и имени блока .....	46
2.2.7 Создание соединительных линий .....	47
2.2.8 Проставление меток сигналов и комментариев .....	48
2.2.9 Создание субмоделей .....	48
2.2.10 Запись и печать S-модели .....	49

3 Подготовка данных при создании моделей содержащих электрические машины .....	50
3.1 Подготовка данных для моделей машин постоянного тока .....	50
3.2 Подготовка данных при моделировании асинхронных двигателей.....	52
4 Модели для исследования характеристик машин постоянного тока .....	55
4.1 Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....	55
4.2 Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.....	59
4.3 Исследование характеристик генератора постоянного тока с независимым возбуждением .....	61
4.4 Исследование переходных процессов при пуске и реверсе двигателей постоянного тока.....	71
4.4.1 Моделирование процесса пуска двигателя постоянного тока с пусковым реостатом, переключаемым в функции времени .....	71
4.4.2 Моделирование процесса пуска двигателя постоянного тока с пусковым реостатом, переключаемым в функции скорости.....	75
4.4.3 Моделирование процессов реверса и торможения двигателя постоянного тока .....	77
5 Модели для исследования характеристик асинхронных двигателей .....	83
5.1 Исследование механических характеристик асинхронного двигателя..	83
6 Примеры сложных моделей с использованием электрических машин.....	89
6.1 Управление частотой вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением .....	89
6.2 Управление частотой вращения асинхронного двигателя.....	94
7 Практические советы по моделированию.....	98
7.1 Использование переменных для задания параметров блоков .....	98
7.2 Форматирование графиков в окне блока Scope.....	99
7.3 Отображение рисунка в окне модели .....	100
Приложение А .....	101
Перечень блоков библиотеки Dials & Gauges.....	101
(шкалы и управляющие элементы) .....	101
Список литературы .....	106



## Введение

При подготовке современных инженеров в области электротехники особое значение приобретают навыки работы с компьютером и знание ими новейших средств экспериментальных исследований.

До недавнего времени все лабораторные исследования и работы, проверка правильности выполнения электротехнических расчетов могли быть выполнены только при экспериментальном исследовании реальных схем и устройств. Данный способ имеет ряд существенных недостатков:

- для экспериментального исследования схемы необходимо располагать соответствующим измерительным оборудованием и натурными, работающими образцами электрических машин и аппаратов управления;
- погрешности реальных измерительных приборов могут быть достаточно велики;
- для исследования схем нужно собирать их макеты из реальных элементов, что приводит к существенным материальным и временным затратам.

Моделирование электрических схем на компьютерах лишено этих недостатков:

- не требуются измерительные приборы и макеты исследуемых схем;
- погрешность исследования схем путем моделирования на компьютере можно сделать достаточно малой;
- время, затрачиваемое на компьютерное моделирование, несравненно меньше времени, расходуемого на изготовление макета и выполнения его экспериментального исследования.

К недостаткам моделирования реальных электротехнических машин и схем на компьютерах можно отнести:

- трудности учета в моделях некоторых реально существующих паразитных параметров элементов схем: внутренние сопротивления и проводимость источников; собственные индуктивности и емкости реальных резисторов; потери в катушках индуктивности и обмотках электрических машин; нелинейности вызванные наличием ферромагнитных сердечников;
- иногда трудно оценить точность моделирования.

Тем не менее, можно сказать, что моделирование электрических и электронных схем на компьютерах – это существенный прогресс в технике экспериментальных исследований.

Следует учесть, что в настоящее время существует достаточно много компьютерных программ для моделирования электрических схем. Для разного круга задач следует использовать разные пакеты программ.

В данной части пособия рассмотрены вопросы моделирования схем с электрическими машинами и некоторых схем электропривода, для которых, на наш взгляд, наиболее применим пакет расширения **Simulink 5**, который входит в систему **MATLAB 6.5** и служит для имитационного моделирования моделей, состоящих из графических блоков с заданными свойствами (параметрами). В состав моделей могут включаться источники сигналов различно-

го вида, виртуальные регистрирующие приборы, графические средства анимации. Двойной щелчок мышью на блоке модели выводит окно со списком его параметров, которые пользователь может менять. Запуск имитации обеспечивает математическое моделирование построенной модели с наглядным визуальным представлением результатов. Пакет основан на построении блочных схем путем переноса блоков из библиотеки компонентов в окно редактирования создаваемой пользователем модели. Затем модель запускается на выполнение. При этом возможны различные варианты моделирования: во временной области, в частотной области, с событийным управлением, и т. д.

Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств **Simulink** имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем. Используя палитры компонентов (наборы), пользователь с помощью мыши переносит нужные блоки с палитр на рабочий стол пакета **Simulink** и соединяет линиями входы и выходы блоков. Таким образом, создается блок-схема системы или устройства, то есть S-модель. **Simulink** автоматизирует следующий, наиболее трудоемкий этап моделирования: он составляет и решает сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (S-модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль за поведением созданного пользователем виртуального устройства. Вам достаточно уточнить (если нужно) вид анализа и запустить **Simulink** в режиме симуляции (откуда и название пакета - **Simulink**) созданной модели системы или устройства. В дальнейшем мы будем использовать термин «моделирование».

Средства визуализации результатов моделирования в пакете **Simulink** настолько наглядны, что порой создается ощущение, что созданная в виде блок-схемы S-модель 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 сигналов с практически любыми временными зависимостями, масштабирующие, линейные и нелинейные.

Возможности **Simulink** охватывают задачи математического моделирования сложных динамических систем в физике, электро- и радиотехнике, в биологии и химии — словом, во всех областях науки и техники. Этим объясняется популярность данного пакета как в университетах и институтах, так и в научных лабораториях.

Таким образом, приложение **Simulink** является своего рода «виртуальной лабораторией» позволяющей собирать и исследовать работу многих видов электрических цепей и устройств.

Получившаяся в результате «виртуальная схема» позволит проводить все этапы исследования присущие экспериментальному или опытному образцу, а именно:

- проводить планирование модельных экспериментов;
- реализовать план эксперимента;
- производить анализ и интерпретация результатов моделирования.

Достоинствами моделирования являются:

- автоматический учет всех связей и соотношений между элементами схемы;
- получение результатов моделирования в форме аналогичной результатам при испытаниях реальных схем (в виде осциллограмм, временных процессов и т.д.), что упрощает анализ и привязку результатов моделирования к реальным электротехническим устройствам;
- возможность исследования работы отдельных элементов электрической машины или схемы, которые недоступны в реальной конструкции расходомера, например, возможно отслеживать величину электромагнитного момента машины и т.д.;
- возможность исследования поведения схемы в условиях труднодостижимых на экспериментальных стендах, например, при повышенных температурах или в аварийных режимах;
- возможность исследовать электротехнические устройства и схемы в динамике, например, исследуя реакцию электродвигателя на быстрые изменения нагрузки, что на реальных установках выполнить сложно;
- возможность исследования работы схем в условиях действия различных мешающих факторов, помех;
- возможность оптимизации элементов схем прибора с использованием встроенных в программу MATLAB средств [1, 2, 3].

В данной работе, сделана попытка, дать некоторые начальные сведения о моделировании в системе MATLAB+ Simulink.

Дополнительные сведения о работе в системе MATLAB можно получить в нашей монографии «Применение системы MATLAB при изучении курса электротехники» [4].

Рассмотрены вопросы моделирования электрических двигателей и генераторов постоянного и переменного тока, схем управления электроприводом.

Изложение каждого раздела предваряется краткими теоретическими сведениями и снабжено примерами расчетов. Все примеры содержат, как схему модели, так и полученные в ходе решения результаты в виде числовых или графических данных. Примеры снабжены комментариями и необходимыми пояснениями. Студент может использовать их для решения своих домашних заданий, вводя дополнения или изменяя базовую модель.

Данное пособие будет полезно при выполнении лабораторных, расчетно-графических, курсовых работ, а так же для дипломного проектирования студентам специальности 030500. Оно будет полезно и студентам других специальностей, изучающим электротехнические дисциплины.

# 1 Пакет для моделирования электротехнических систем SimPowerSystems

Для моделирования энергетических (силовых) систем и устройств в системе MATLAB служит пакет **SimPowerSystems**.

Этот пакет занимает особое положение, поскольку больше, чем другие пакеты, ориентирован на моделирование технических устройств и систем вполне конкретного назначения. Именно данный пакет мы использовали для моделирования электрических устройств, описанных в настоящем пособии.

Пакет **SimPowerSystems** в программе **Simulink 5** это новая, существенно переработанная версия пакета **Power Systems Blockset 2.0** который входил в состав программы **Simulink 4**.

Функционально полный набор библиотек и компонентов, превосходный графический интерфейс пользователя системы **Simulink**, обширные вычислительные возможности базовой матричной системы MATLAB, высокая степень достоверности имитации (моделирования) энергетических устройств и систем и превосходная степень визуализации результатов моделирования — все это сделало пакет **SimPowerSystems** одним из лучших среди пакетов такого рода, доступных для установки на персональных компьютерах с операционной системой Windows 95/98/2000/NT/XP.

Для работы с пакетом в окне браузера библиотек **Simulink** нужно выбрать библиотеку **SimPowerSystems**. Состав данного пакета представлен на рисунке 1.1

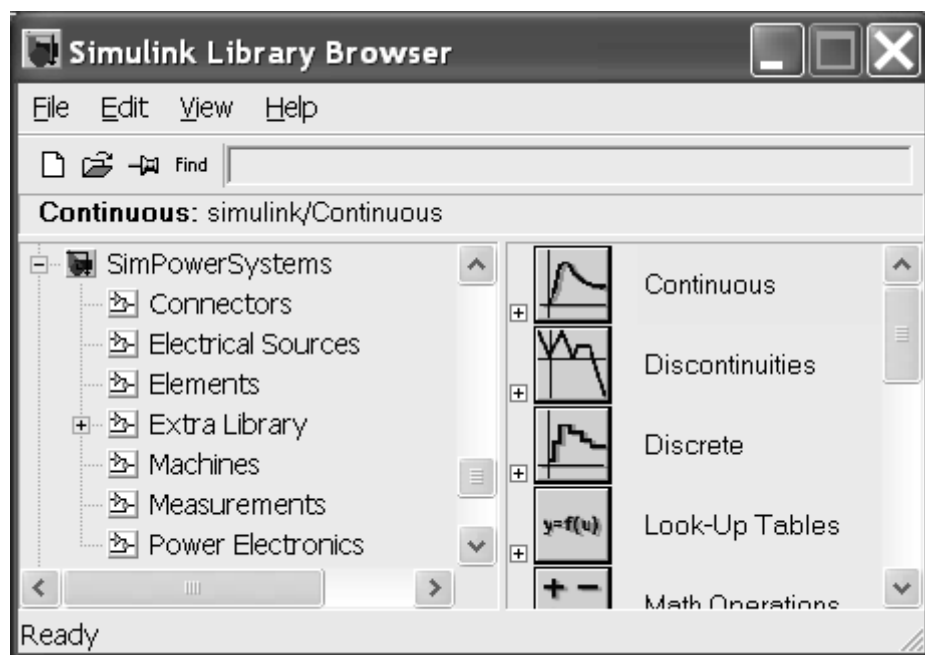


Рисунок 1.1 – Состав пакета **SimPowerSystems** (на левой панели)

В его состав входят библиотеки следующего назначения:

- **Connectors** – подключающие устройства;
- **Electrical Sources** – источники электрической энергии и сигналов;
- **Elements** – линейные и нелинейные компоненты электротехнических

и электронных устройств;

- **Extra Library** – дополнительные библиотеки специальных энергетических устройств с расширенными возможностями;
- **Machines** – электрические машины;
- **Measurements** – измерительные и контрольные устройства;
- **Power Electronics** – устройства энергетической электроники.

Их применение позволяет создавать модели самых разных энергетических устройств и выполнять их моделирование в режиме работы виртуальных устройств. Это дает наглядное представление о работе реальных устройств.

При указании параметров компонентов и единиц измерения при настройке блоков используются обозначения, приведенные в таблице 1 (в скобках даны обозначения, принятые в русскоязычной литературе):

Таблица 1.1 – Обозначение электротехнических параметров

Параметр	Обозначение	Единицы
Time (время)	second	s (с)
Length (длина)	meter	m (м)
Mass (масса)	kilogram	kg (кг)
Energy (энергия)	joule	J (Дж)
Current (ток)	ampere	A (А)
Voltage (напряжение)	volt	V(В)
Frequency (частота)	Hertz	Hz (Гц)
Active power (активная мощность)	watt	W (Вт)
Apparent power (полная мощность)	volt ampere	VA(ВА)
Reactive power (реактивная мощность)	var	var (ВАр)
Impedance (импеданс)	ohm	$\Omega$ (Ом)
Resistance (импеданс)	ohm	$\Omega$ (Ом)
Inductance (индуктивность)	henry	H (Гн)
Capacity (емкость)	farad	F(Ф)
Flux linkage (поток сцепления)	volt-second	V-S (В-с)
Rotation speed (угловая скорость)	radians per second	rad/s (рад/с)
	revolutions per minute	rpm (пер/мин)
Torque (вращающий момент)	newton-meter	N·m (Н·м)
Inertia (момент инерции)	kilogram·(meter) <sup>2</sup>	kg·m <sup>2</sup> (Кг·М <sup>2</sup> )
Friction factor (коэффициент трения)	newton-meter-second	N·m·s (Н·м·с)

В этой таблице приведены лишь основные параметры и единицы измерения. Некоторые из них будут рассмотрены по мере описания моделей.

Далее мы рассмотрим некоторые из блоков, общего назначения, использующиеся при построении любых электротехнических моделей. Другие блоки будут описаны по мере их использования в моделях.

## 1.1 Библиотека соединительных элементов Connectors

Состав библиотеки **Connectors** соединительных элементов представлен на рисунке 1.2.

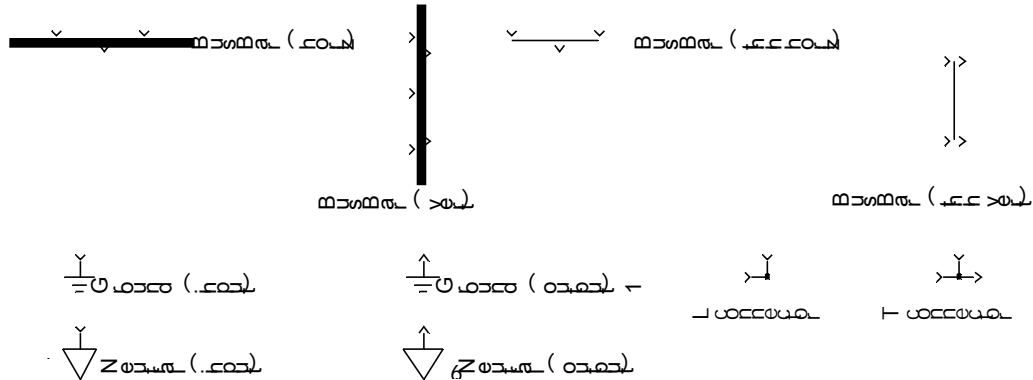


Рисунок 1.2 - Библиотека соединительных элементов

Большинство соединительных элементов имеют вполне очевидное назначение. Например, заземляющие элементы служат для подключения других элементов к общему проводу – земле (блок **Ground**). Эти элементы не имеют параметров. Более детально эти элементы рассматривать не имеет смысла ввиду очевидности их назначения.

Блок шин **Bus** является идеальным переходником от одиночной шины к ряду шин. Окно параметров этого блока (рисунок 1.3) имеет всего два параметра: число входных шин и число выходных шин.

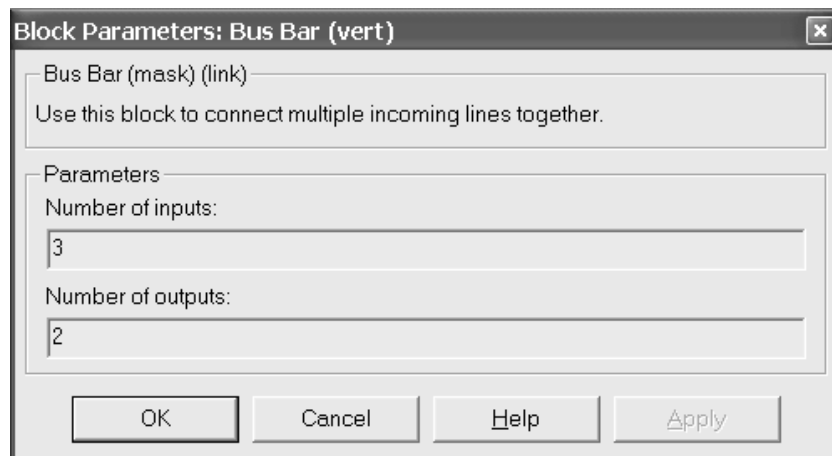


Рисунок 1.3 – Окно параметров блока **Bus**

Нейтраль (блок **Neutral**) – это общий для всех цепей провод. Относительно нейтрали отсчитываются потенциалы разных точек цепи. Ее не следует путать с землей. Земля (блок **Ground**) также может рассматриваться как нейтраль с номером узла 0. Обычно нейтраль на схеме электрической цепи не показывают и характеризуют ее номером узла. Таким образом, нейтраль имеет единственный параметр (номер узла). Он представляется на схеме как большой треугольник с вершиной, обращенной вниз, и номером узла рядом.

## 1.2 Библиотека источников электрической энергии *Electrical Sources*

В состав библиотеки **Electrical Sources** входят блоки, показанные на рисунке 1.4.

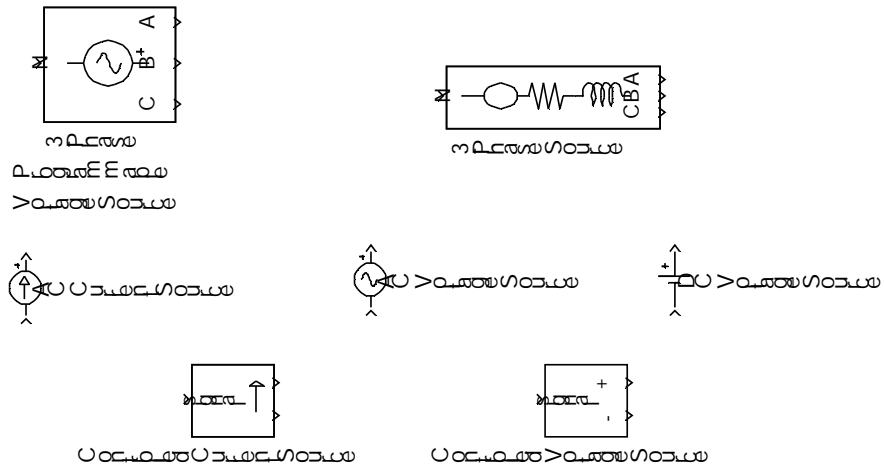


Рисунок 1.4 – Библиотека *Electrical Sources*

Источники электрической энергии являются первичными компонентами энергетических систем и устройств. Большинство электротехнических устройств является потребителями энергии, вырабатываемой этими источниками, либо ее преобразователями. В библиотеку включено семь типов источников электрической энергии:

- **3-Phase Programmable Voltage** – 3-х фазный программируемый источник напряжения;
- **3-Phase Source** – 3-х фазный источник напряжения;
- **AC Current Source** – источник переменного тока;
- **AC Voltage Source** – источник переменного напряжения;
- **Controlled Current Source** – регулируемый источник тока;
- **Controlled Voltage Source** – регулируемый источник напряжения;
- **DC Voltage Source** – источник постоянного напряжения.

Эти источники образуют функционально полный набор источников электрической энергии и минимальный набор источников сигналов (в других расширениях MATLAB кроме источников синусоидальных сигналов можно задавать великое множество источников сигналов самой разной формы). Этих наборов вполне достаточно для проектирования энергетических устройств. Трехфазные источники, входящие в данную библиотеку, применяются для моделирования мощных энергетических устройств, и здесь мы их рассматривать не будем.

### 1.2.1 Блок *AC Current Source*

**AC Current Source** является источником идеального (с бесконечно большим внутренним сопротивлением) переменного тока с заданной ампли-

тудой, частотой и фазой. **AC Current Source** задает ток, который меняется по синусоидальному закону и описывается выражением:

$$I = \text{Amplitude} \times \sin(2\pi \times \text{Frequency} \times t + \text{Phase} \times \pi/180). \quad (1)$$

Этот компонент имеет следующие параметры (рисунок 1.5):

- амплитуда тока (**Peak amplitude**) в амперах;
- частота в герцах (**Frequency**);
- фаза (**Phase**) в градусах (а не в радианах).

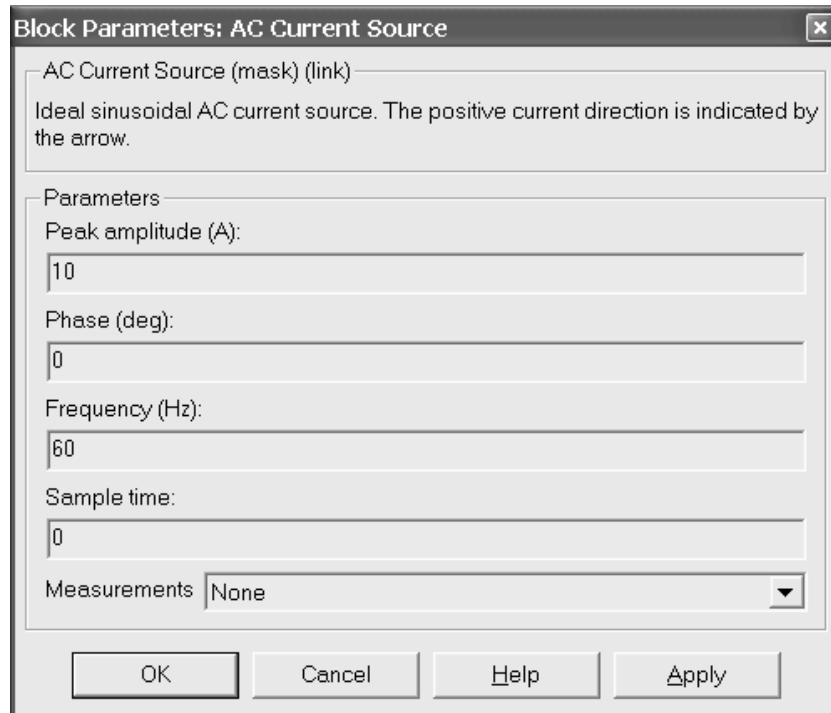


Рисунок 1.5 – Параметры блока **AC Current Source**,

### 1.2.2 Блок **AC Voltage Source**

Идеальный источник (с нулевым внутренним сопротивлением) напряжения переменного тока с заданной амплитудой, частотой и фазой **AC Voltage Source** задает напряжение, меняющееся по синусоидальному закону и описываемое выражением:

$$U = \text{Amplitude} \times \sin(2\pi \times \text{Frequency} \times t + \text{Phase} \times \pi/180). \quad (2)$$

Параметры источника задаются в окне, см. рисунок 1.5:

- амплитуда напряжения (**Peak amplitude**) задается в вольтах;
- частота в герцах (**Frequency**);
- фаза (**Phase**) в градусах (а не в радианах).

Окно параметров данного блока аналогично, показанному на рисунке 1.5, кроме первой строки, в которой задается амплитуда напряжения.

### 1.2.3 Блок **DC Voltage Source**

Источник напряжения постоянного тока **DC Voltage Source** задается



только одним параметром – выходным напряжением  $E$  (такой источник называется идеальным источником напряжения постоянного тока), рисунок 1.6.

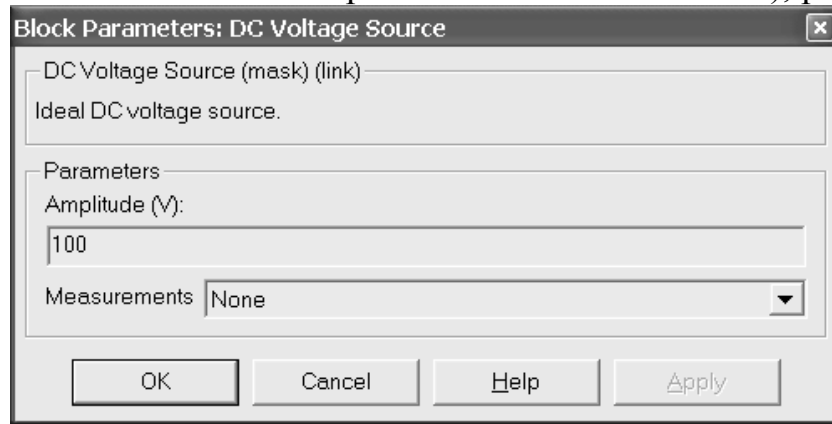


Рисунок 1.6 – Параметры блока *DC Voltage Source*

#### 1.2.4 Блок *Controlled Current Source*

В окне параметров этого источника (рисунок 1.7) задается только начальный ток (по умолчанию равный 0).

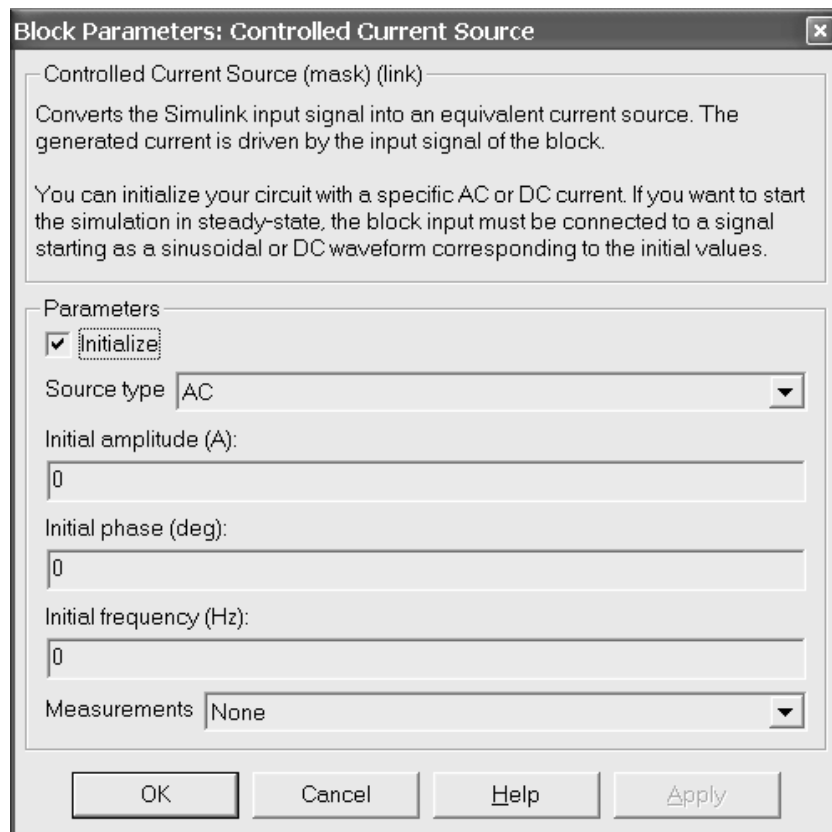


Рисунок 1.7 – Параметры блока управляемого источника тока *Controlled Current Source*

Управляемый источник тока **Controlled Current Source** задает во внешней цепи ток, который зависит от начального тока и величины управляющего тока. При этом временная зависимость выходного тока определяется временной зависимостью управляющего тока.

### 1.2.5 Блок *Controlled Voltage Source*

Управляемый источник напряжения **Controlled Voltage Source** задает на зажимах внешней цепи напряжение, которое зависит от начального напряжения и величины управляющего сигнала. В окне параметров этого источника задается только начальное напряжение, см. рисунок 1.8.

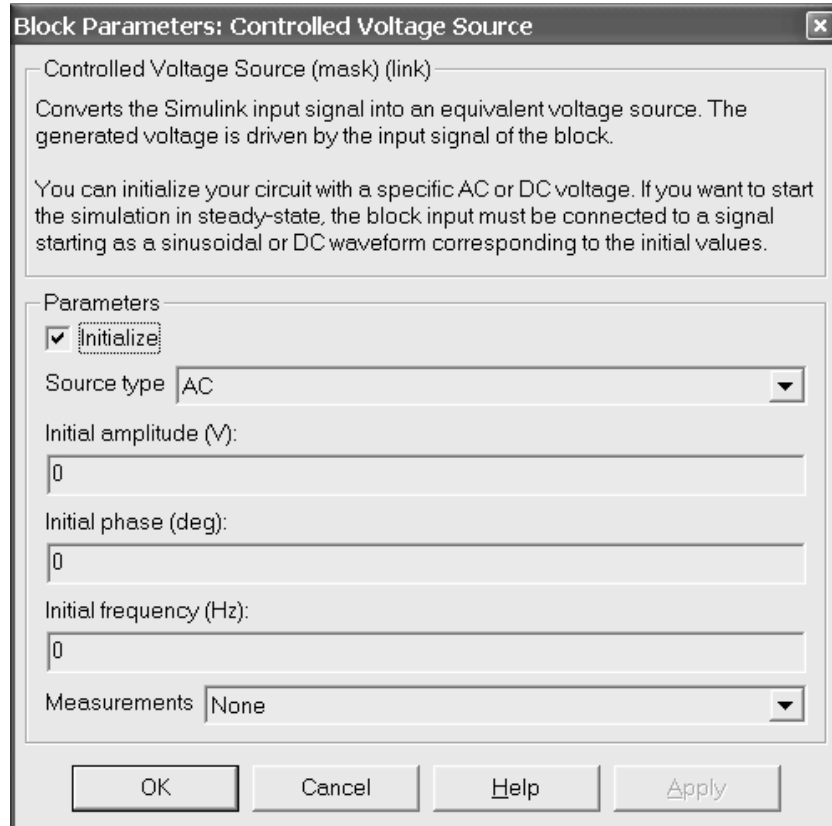


Рисунок 1.8 – Параметры блока управляемого источника тока *Controlled Voltage Source*

Для управления током или напряжением управляемых источников служат другие блоки библиотек **Simulink**, например, блоки из библиотек **Sources** или **Math Operations**. Таким образом, выходная величина источника может быть пропорциональна результату некоторой математической операции.

Управляемые источники напряжения и тока позволяют моделировать такой важный класс электрических цепей, как параметрические цепи (цепи, параметры которых зависят от времени).

### 1.3 Библиотека *Elements* — линейные и нелинейные компоненты электротехнических и электронных устройств

В состав библиотеки **Elements** входят 24 блока. Основные из них, являющиеся моделями элементов, имеющих достаточно универсальный характер, рассмотрены ниже (рисунок 1.9).

Кроме того, в библиотеке имеются ряд трехфазных элементов (нагрузок, трансформаторов, переключателей) позволяющих упростить моделирование трехфазных цепей. Их параметры аналогичны параметрам однофазных

ЭЛЕМЕНТОВ.

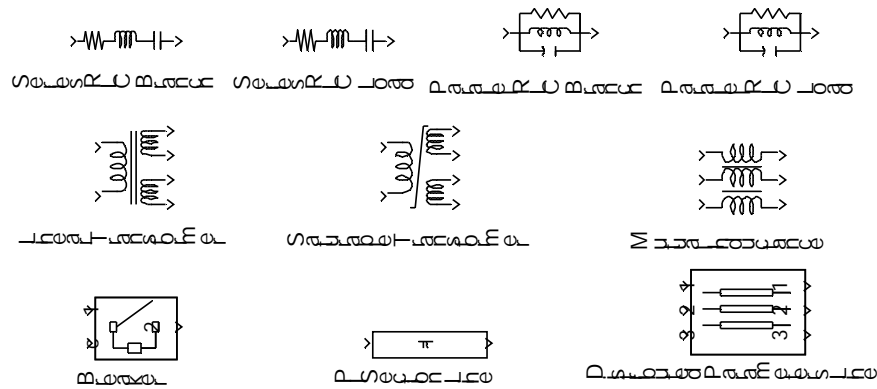


Рисунок 1.9 – Основные элементы библиотеки *Elements*

С помощью одной модели можно, как правило, создать модели нескольких компонентов.

- **Series RLC Branch** — последовательная RLC-цепь;
- **Series RLC Load** — последовательная RLC-цепь с нагрузкой;
- **Parallel RLC Branch** — параллельная RLC-цепь;
- **Parallel RLC Load** — параллельная RLC-цепь с нагрузкой;
- **Linear Transformer** — линейный трансформатор;
- **Saturable Transformer** — нелинейный трансформатор;
- **Mutual Inductance** — блок взаимной индуктивности;
- **Surge Arrester** — ограничитель пиковых напряжений;
- **Breaker** — выключатель управляемый;
- **PI Section Line** — линия с сосредоточенными параметрами;
- **Distributed Parameters Line** — линия с распределенными параметрами.

### 1.3.1 Блоки *Series RLC Branch* и *Parallel RLC Branch*

В состав библиотеки входят две последовательные и две параллельных *RLC* -цепи. Эти цепи (последовательная **Series RLC Branch** и параллельная **Parallel RLC Branch**) задаются тремя параметрами (см. рисунок 1.10): сопротивлением  $R$ ; индуктивностью  $L$ ; емкостью  $C$ .

Данные блоки позволяют задать и одиночный элемент:  $R$ ,  $L$  или  $C$ . Для ввода отдельных элементов можно использовать любую из *RLC* -цепей (резистора  $R$ , конденсатора  $C$  и индуктивности  $L$ ), задав параметрам значения, соответствующие отсутствию ненужных компонентов. Например, если с помощью последовательной *RLC*-цепи нужно задать только резистор  $R$ , то надо задать  $L = 0$  (индуктивность при этом исчезнет и будет заменена проводником) и  $C = \text{inf}$  ( $\text{inf}$  означает бесконечное значение емкости, что превращает ее также в проводник).

Это правило модификации распространяется и на другие сложные компоненты, например  $R_s C_s$  -цепи в моделях ключей (они будут описаны

ниже).

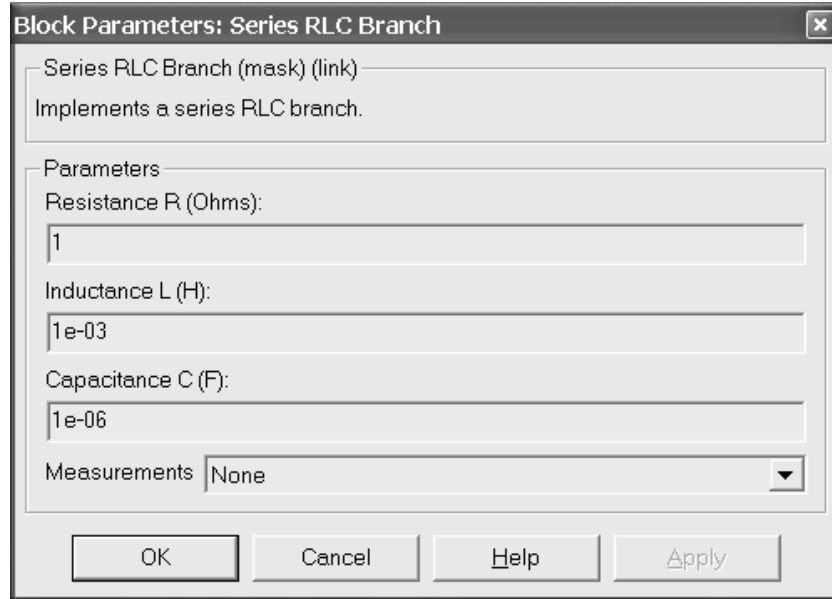


Рисунок 1.10 – Окно параметров блока **Series RLC Branch** (для блока **Parallel RLC Branch** оно аналогично)

Благодаря этому правилу число простых моделей в пакете **SimPower-System** сокращено. Кроме того, это правило позволяет быстро модернизировать отдельные цепи, например превращать резистор  $R$  в  $RL$ - или  $RLC$ -цепь, не вводя новые компоненты в уже составленную схему, а просто задав их в окне параметров RLC-цепей.

### 1.3.2 Блоки **Series RLC Load** и **Parallel RLC Load**

У так называемых нагрузочных цепей (последовательной **Series RLC Load** и параллельной **Parallel RLC Load**) дополнительно задаются допустимые мощности рассеяния: активная – для резистора (Вт) и реактивные для индуктивности и конденсатора (Var).

Такое задание параметров нагрузки в ряде случаев весьма удобно, например, при исследовании трехфазных электрических цепей.

Ввиду очевидности задания этих параметров ограничимся приведением окна параметров для последовательной нагрузочной RLC цепи – рисунок 1.11.

В нижней строчке окна параметров многих блоков данного пакета имеется строка: **Measurements** (измерения), в выпадающем меню, которой могут быть заданы значения:

- **None** (отсутствует);
- **Branch Voltage** (напряжение ветви);
- **Branch Current** (ток ветви);
- **Branch Voltage and Current** (напряжение и ток ветви).

Данные установки используются в процессе моделирования для измерения значений токов и напряжения соответствующего элемента цепи. При выборе того или иного значения параметра (кроме конечно **None**), соответст-

вующая ему величина появляется в окне виртуального прибора **Multimeter**, работа с которым будет рассмотрена далее.

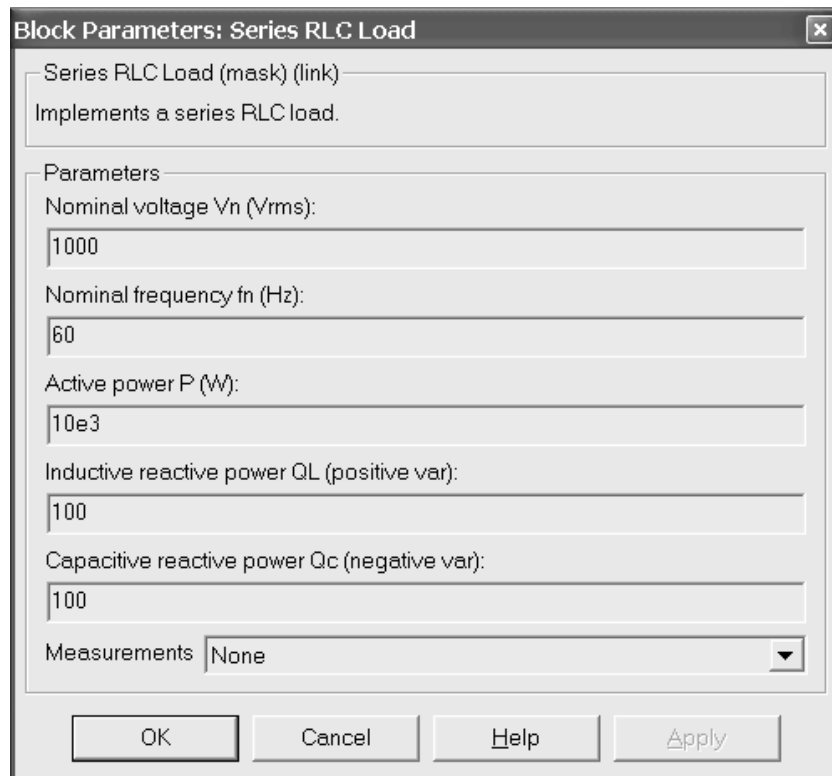


Рисунок 1.11 – Окно параметров нагрузочной последовательной RLC-цепи

### 1.3.3 Блок *Linear Transformer*

В пакете **SimPowerSystem** имеется модель линейного трансформатора **Linear Transformer**. Его схема замещения представлена на рисунке 12. Она задается индуктивностью  $L_m$  и сопротивлением потерь в сердечнике  $R_m$  первичной обмотки трансформатора, а также омическими сопротивлениями  $R_i$  и индуктивностями рассеяния  $L_i$ , всех обмоток трансформатора, где  $i=1,2,3$ .

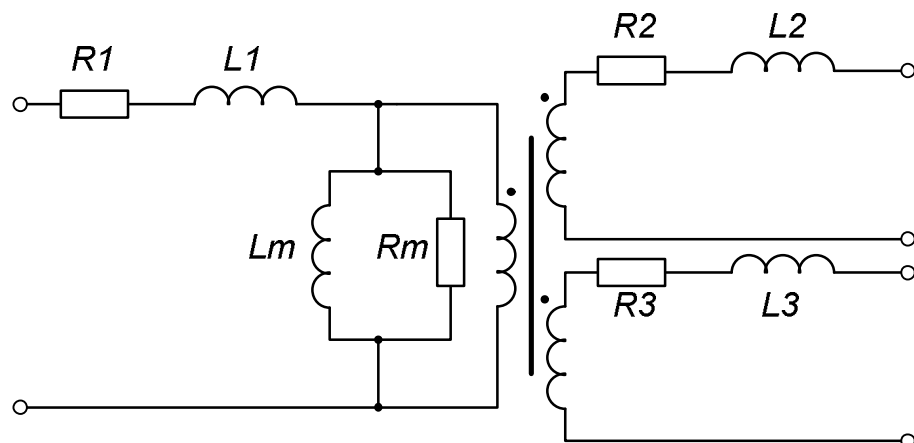


Рисунок 1.12 – Схема замещения модели линейного трансформатора

Окно параметров данного блока представлено на рисунке 1.13. Обратите внимание на то, что некоторые параметры трансформатора задаются списками, поскольку трансформатор может иметь несколько обмоток.

Рисунок 1.13 – Окно параметров блока линейного трансформатора

При описании параметров трансформатора используется дополнительная система параметров, принятая в европейской промышленности и называемая в описании пакета *pu*-системой. В ней электрические величины выражаются в долях от некоторых базовых параметров, представленных ниже, которые обозначаются *Rbase* и *Lbase*.

Запись обозначений здесь не вполне корректна, так как при формальном математическом подходе означает  $pu = Rbase = Lbase$ , что является грубой ошибкой. На самом деле в системе *pu*-единиц под  $1pu$  понимаются разные параметры.

$$\begin{aligned} Rbase = 1pu &= \frac{(Vn)^2}{Pn}, \\ Lbase = 1pu &= \frac{Rbase}{2\pi f_n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Например, рассчитаем реальные параметры первичной обмотки и сопротивление потерь в сердечнике для параметров трансформатора указанных на рисунке 1.13.

$$Rbase = 1pu = \frac{(424,35 \cdot 10^3)^2}{250 \cdot 10^6} = 720,3 \text{ Ом},$$

$$\begin{aligned}
 L_{base} &= 1 \text{ pu} = \frac{720,3}{2\pi 60} = 1,91 \text{ Гн}, \\
 R_1 &= 0,002 \text{ pu} \cdot 720,3 \text{ Ом} = 1,44 \text{ Ом}, \\
 L_1 &= 0,08 \text{ pu} \cdot 1,91 \text{ Гн} = 0,1528 \text{ Гн}, \\
 R_m &= 500 \text{ pu} \cdot 720,3 \text{ Ом} = 3,6 \cdot 10^5 \text{ Ом}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Аналогично, если известны параметры обмоток в  $\text{Ом}$  и  $\text{Гн}$ , можно пересчитать их в  $\text{pu}$ -параметры по формулам:

$$Ri[\text{pu}] = \frac{Ri[\text{Ом}]}{R_{base}[\text{Ом}]}; \quad Li[\text{pu}] = \frac{Li[\text{Гн}]}{L_{base}[\text{Гн}]}.
 \tag{5}$$

Ряд блоков пакета **SimPowerSystem** выполнены специально в варианте задания  $\text{pu}$ -параметров.

#### 1.3.4 Блок *Saturable Transformer*

Модель нелинейного трансформатора **Saturable Transformer** (рисунок 14) отличается от модели линейного трансформатора тем, что индуктивность первичной обмотки  $L_m$  заменена на нелинейную индуктивность  $L_{sat}$ . Для нелинейных трансформаторов также может использоваться  $\text{pu}$ -система параметров.

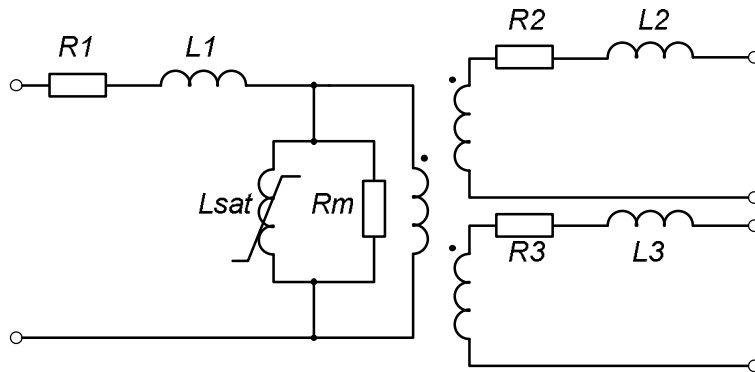


Рисунок 14 - Схема замещения модели нелинейного трансформатора

Модель трансформатора учитывает сопротивления обмоток ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ), индуктивности рассеяния ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ) так же как характеристику намагничивания магнитного сердечника, которая смоделирована параллельной ветвью с сопротивлением активных потерь  $R_m$  и насыщаемой индуктивностью  $L_{sat}$ . Характеристика намагниченности магнитопровода выражается кусочно-линейной зависимостью, которая задается пользователем в окне параметров трансформатора.

В первой строчке окна параметров нелинейного трансформатора вводят номинальную мощность (ВА) и частоту трансформатора (Гц).

В следующих трех строках вводятся параметры каждой обмотки (действующее значение номинального напряжения в (В), сопротивление и индуктивности рассеяния в  $\text{pu}$ ).

В пятой строчке определяется характеристика насыщения. Она задается парами значений напряженности поля и потока (измеренных в  $pu$ ), начинающихся с  $(0,0)$ , см. рисунок 1.16.

В последнюю строчку окна параметров вводится активная мощность потерь в сердечнике в  $pu$ . Здесь же можно определить начальный поток ( $\phi_0$  в  $pu$ ). Этот начальный поток становится особенно важным, когда сердечник трансформатора имеет остаточное намагничивание. Если  $\phi_0$  не определен, то, начальный поток будет автоматически установлен таким, чтобы моделирование было устойчивым.

Если галочка в окне **Three windings transformer** (Трех обмоточный трансформатор) не установлена, то программа будет рассматривать трансформатор как двух обмоточный и изображение его изменится, как показано на рисунке 1.15. То же относится и к линейному трансформатору.



Рисунок 1.15 – Нелинейный трансформатор (а), линейный - (б)

Нелинейность трансформатора учитывается зависимостями, представленными на рисунке 16. Допускаются два вида этой зависимости, отличающиеся числом опорных точек и поведением зависимости в области малых токов.

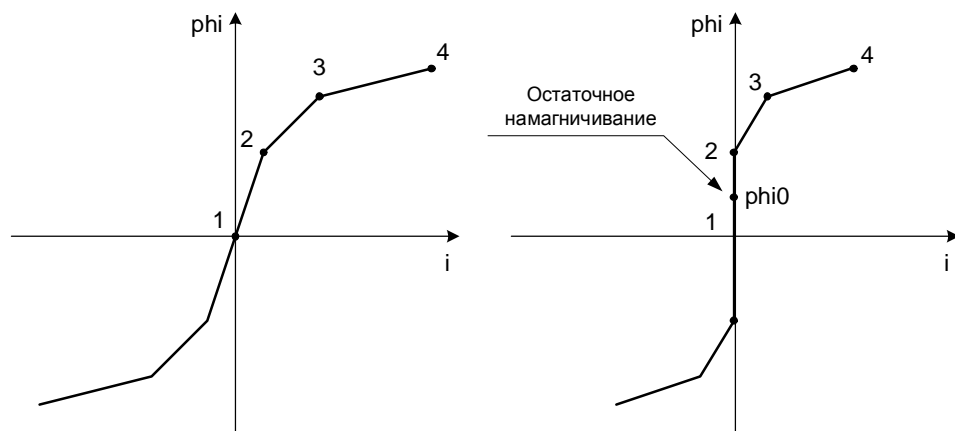


Рисунок 1.16 – Характеристика насыщения трансформатора, моделируемого блоком **Saturable Transformer**

К сожалению, модель нелинейного трансформатора не учитывает гистерезиса намагничивания сердечника и потому является лишь первым приближением к учету явлений, связанных с нелинейностью трансформатора. Но для учебных моделей силовых цепей данное ограничение не является важ-



ным. Однако пользователь может создать свою модель трансформатора, в том числе учитывающую явление гистерезиса.

Для моделирования трансформаторов и катушек с сердечниками обладающими гистерезисом можно использовать другие программы моделирования, например **PSpice**.

### 1.3.5 Блок *Mutual Inductance*

Катушки индуктивности и даже отдельные проводники, расположенные вблизи друг от друга, имеют перекрывающиеся магнитные поля, что создает эффект взаимной индуктивности. Для моделирования взаимной индуктивности в пакете **SimPowerSystem** служит блок взаимной индуктивности **Mutual Inductance** на основе идеального трансформатора, схема которого показана на рисунке 1.17.

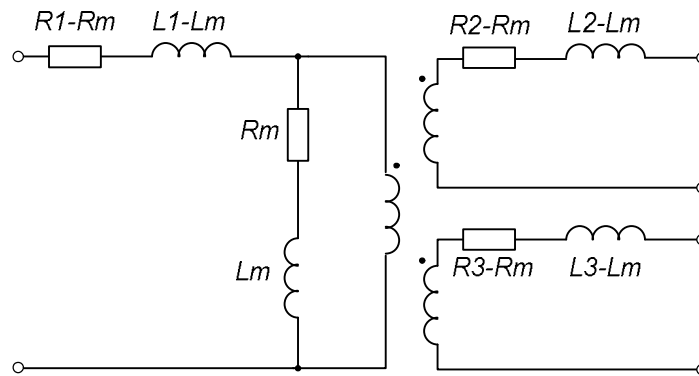


Рисунок 1.17 – Схема замещения блока взаимной индуктивности **Mutual Inductance**

Окно его параметров дано на рисунке 1.18.

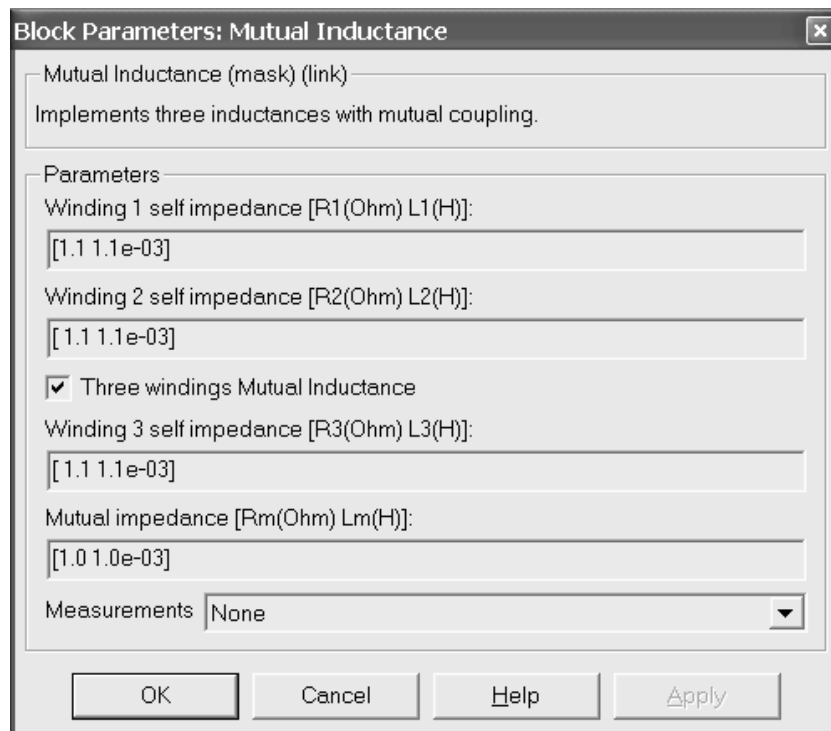


Рисунок 1.18 – Окно параметров блока **Mutual Inductance**

Блок соответствует теоретической модели взаимной индуктивности.

В него вводятся активные сопротивления и индуктивности всех обмоток, а также, величина полного взаимного сопротивления (в виде  $R_m$ , и  $L_m$ ).

### 1.3.6 Блок *Breaker*

Для имитации выключателей (рубильников) служит управляемый выключатель **Breaker**. Он обеспечивает включение или выключение в цепях переменного или постоянного тока. На рисунке 1.19 показано окно параметров этого блока.

Обратите внимание, что возможно задание паразитных сопротивления  $R_s$  и индуктивности выключателя  $L_s$ , что позволяет (при необходимости) моделировать эффекты, связанные с неидеальностью выключателя.

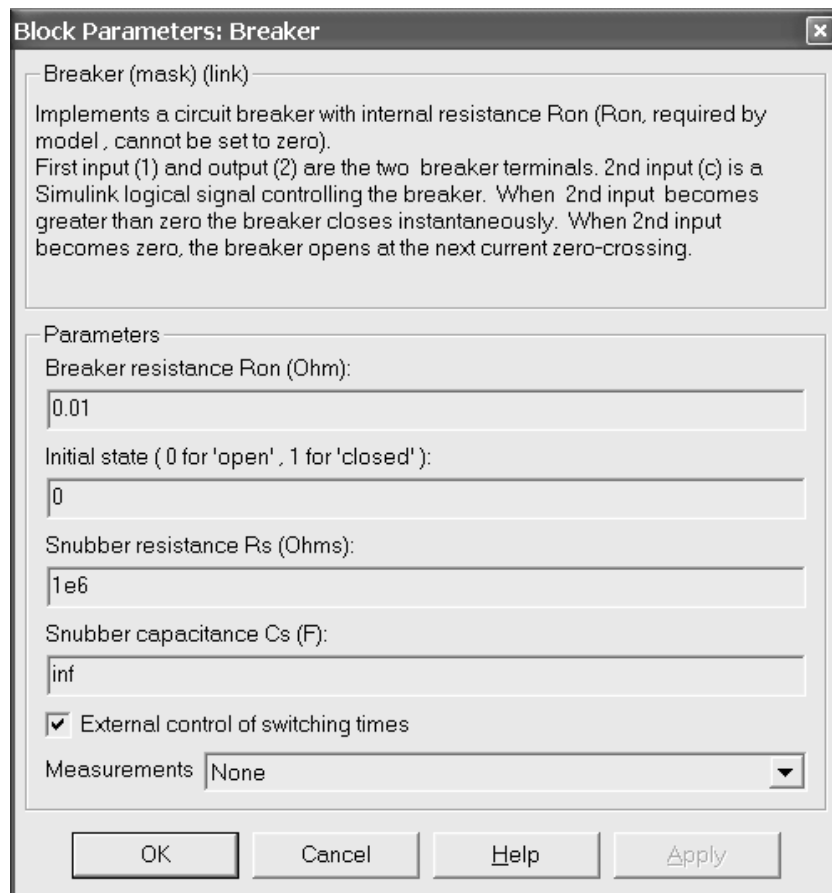


Рисунок 1.19 – Окно параметров блока **Breaker**

Управление блоком **Breaker** производится от внешнего сигнала величиной 1 подаваемого на вход **C** в нужный момент времени.

При снятии галочки в окошке **External control of switching times** (внешний контроль времени переключения), в окне параметров появляются дополнительные строки, в которых можно ввести список времен переключения. Часть окна с данными строками показана на рисунке 1.20.

Данные блоки в дальнейшем широко используются в приводимых моделях пуска и реверса электродвигателей постоянного и переменного тока. Возможность задания времени включения непосредственно в параметрах

блока значительно упрощает схему, ликвидирует лишние блоки и делает модель проще для понимания студентом.

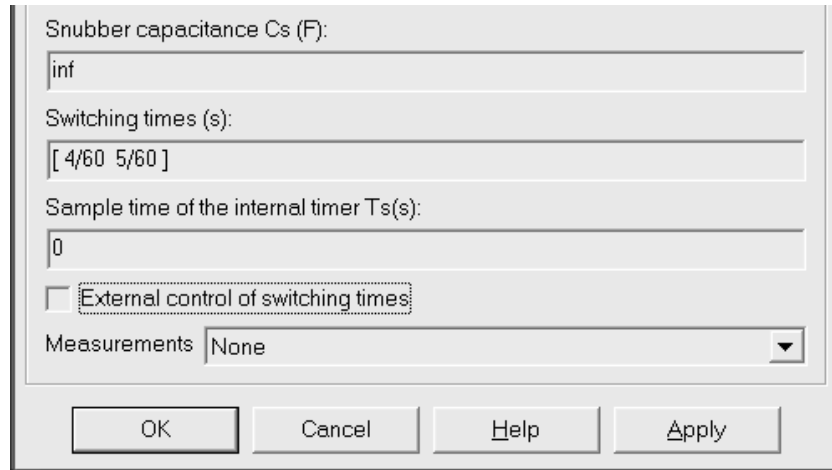


Рисунок 1.20 – Часть окна блока **Breaker** со строками определяющие время его срабатывания

### 1.3.7 Блоки **PI Section Line** и **Distributed Parameters Line**

Данные блоки являются моделями линий электропередачи. И хотя в моделях данного пособия мы не применяем данные блоки, следует кратко рассмотреть их. Это объясняется тем, что линия электропередачи является одним из трех главных составляющих электрической цепи и в курсовых и дипломных заданиях их применение вполне возможно.

В рассматриваемом пакете имеется возможность задания двух типов линий передачи. Первый тип – это линия с сосредоточенными параметрами **PI Section Line**, структура которых представлена на рисунке 1.21. Она может приближенно представлять и линию с распределенными параметрами. В последнем случае длина линий задается в километрах и параметрами линий являются распределенные индуктивности и емкости, измеряемые соответственно в Гн/км и Ф/км. Взаимная индуктивность у таких линий не учитывается.

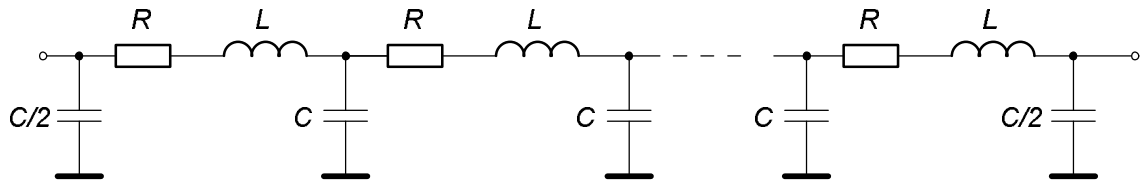


Рисунок 1.21 – Схема замещения линии типа **PI Section Line**

Максимальная частота переменного тока, который может протекать через линию данного типа, составляет

$$f_{\max} = \frac{N \cdot v}{8l} [\text{Гц}], \quad (6)$$

где  $N$  – число секций линии;

$v$  – скорость распространения волны в линии, км/с;

$l$  – длина линии, км.

Например, для линии с  $v = 300\,000$  км/с, максимальная частота составит всего 375 Гц при длине линии в 100 км и использовании одной секции.

Окно параметров данного блока представлено на рисунке 1.22,а.

**Block Parameters: PI Section Line**

Pi Section Line (mask) (link)  
Pi section transmission line.

Parameters

Frequency used for R L C specification  
60

Resistance per unit length (Ohms/km):  
0.2568

Inductance per unit length (H/km):  
2e-03

Capacitance per unit length (F/km):  
8.6e-09

Length (km):  
100

Number of pi sections:  
1

Measurements None

OK Cancel

**Block Parameters: Distributed Parameters Line**

Distributed Parameters Line (mask) (link)  
Implements a N-phases distributed parameter line model. The R,L, and C line parameters are specified by [NxN] matrices.

To model a two-, three-, or a six-phase symmetrical line you can either specify complete [NxN] matrices or simply enter sequence parameters: the positive and zero sequence parameters for a two-phase or three-phase transposed line, plus the mutual zero-sequence for a six-phase transposed line (2 coupled 3-phase lines).

Parameters

Number of phases N  
3

Frequency used for R L C specification (Hz)  
60

Resistance per unit length (Ohms/km) [N\*N matrix] or [R1 R0 R0m]  
[0.01273 0.3864]

Inductance per unit length (H/km) [N\*N matrix] or [L1 L0 L0m]  
[0.9337e-3 4.1264e-3]

Capacitance per unit length (F/km) [N\*N matrix] or [C1 C0 C0m]  
[12.74e-9 7.751e-9]

Line length (km)  
300

Measurements None

OK Cancel Help Apply

а

б

Рисунок 1.22 – Окно параметров блока **PI Section Line** (а), и **Distributed Parameters Line** (б)

В окне параметров устанавливаются следующие величины:

**Frequency used for R L C specification (Hz)** – частота переменного тока в линии (Гц);

**Resistance per unit length (Ohms/km)** – сопротивление на единицу длины (Ом/км);

**Inductance per unit length (H/km)** – индуктивность на единицу длины (Г/км);

**Capacitance per unit length (F/km)** – емкость на единицу длины (Ф/км);

**Length (km)** – длина (км);

**Number of pi sections** – число секций линии;

Другой тип линий – линия с распределенными параметрами **Distributed Parameters Line**.

Окно установки параметров распределенной линии представлено на рисунке 1.22,б. В нем задается:

**Number of phases N** – число фаз линии передачи, при изменении данного параметра вид изображения блока динамически изменяется;

**Frequency used for R L C specification (Hz)** – частота переменного тока в линии (Гц);

**Resistance per unit length (Ohms/km) [N·N matrix] or [R1 R0 R0m]** – сопротивление на единицу длины (Ом/км);

**Inductance per unit length (H/km) [N·N matrix] or [L1 L0 L0m]** – индуктивность на единицу длины (Г/км);

**Capacitance per unit length (F/km) [N·N matrix] or [C1 C0 C0m]** – емкость на единицу длины (Ф/км);

**Line length (km)** – длина (км).

Параметры линии вводятся в виде матрицы [N·N]. Для симметричных двух и трехфазных линий можно ввести только значения [R1 R0], [L1 L0] и [C1 C0], соответственно.

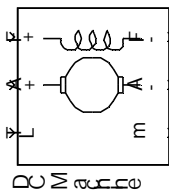
Данный тип линии используется для анализа либо достаточно высокочастотных систем, либо для линий передачи большой длины.

Кроме того, в окне **Measurements** (измерения) для линий обоих типов можно установить наименование величины (тока, напряжения или обеих величин одновременно), которые будут передаваться в блок **Multimeter**.

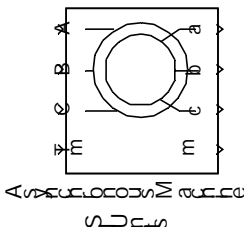
## 1.4 Библиотека *Machines* — блоки моделирования электрических машин

В состав библиотеки входят 16 блоков, некоторые из них кратко описаны ниже. Более подробные пояснения по блокам, используемым в рассматриваемых далее моделях, будут даны по ходу изложения.

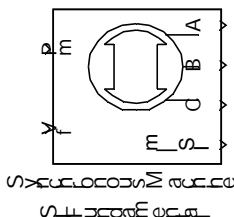
К основным блокам данной библиотеки относятся:



Блок **DC Machine** представляет собой модель машины постоянного тока. Этот блок предназначен для моделирования двигателя постоянного тока с параллельной или последовательной обмоткой возбуждения. Для моделирования генераторов постоянного тока блок неудобен.

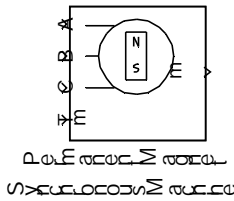


Блок **Asynchronous Machine SI Units** является моделью трехфазного асинхронного двигателя. Обмотки статора и ротора соединены в звезду. Можно моделировать двигателя, как с короткозамкнутыми, так и с фазными роторами. Параметры задаются в системе СИ или в *pu*-параметрах (блок **Asynchronous Machine pu Units**).

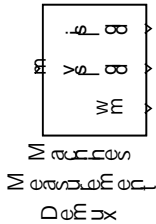


Блок **Synchronous Machine SI Fundamental** является моделью трехфазной синхронной машины. Обмотки статора и ротора соединены в звезду. Параметры задаются в системе

СИ или в *pu* - параметрах (блок **Synchronous Machine pu Fundamental**).



Блок **Permanent Magnet Synchronous Machine** является моделью трехфазной синхронной машины с ротором в виде постоянного магнита с синусоидальным распределением потока. Обмотки статора соединены в звезду. Параметры задаются в системе СИ.



Блок **Machines Measurement Demux** – измерительный распределитель сигналов. Он распределяет на выход вектор электрических величин сформированных в модели асинхронной или синхронной машины. Его вид зависит от выбранного типа машины.

Рассмотрим подробнее некоторые из данных блоков.

#### 1.4.1 Блок DC Machine

Блок имеет пять входов (F+, F–, A+, A–, TL) и один шинный выход (m). Входы A+, A– - являются концами обмотки якоря (плюсовым и минусовым соответственно). Входы F+, F– – концы обмотки возбуждения. Вход TL, является входом, к которому приложена величина нагрузочного момента. Нагрузочный момент, то есть момент сил сопротивления вращению вала двигателя, определяется, как функция частоты вращения вала и должен быть задан в модели.

При моделировании двигателя значение момента  $TL > 0$  а при моделировании генератора  $TL < 0$ .

На выходе m модели формируется четырехэлементный вектор, состоящий из:  $\omega$  – угловой частоты вращения вала двигателя;  $I_a$  – тока якоря;  $I_f$  – тока обмотки возбуждения;  $T_e$  – электромагнитного момента на валу.

Блок является субмоделью, работа ее соответствует принципу работы машины и ясна из рисунка 1.23. Окно настроек двигателя приведено на рисунке 1.24.

В отечественной практике ЭДС якоря и электромагнитный момент в принятых выше обозначениях определяются так

$$E = \frac{1}{60} \cdot \frac{pN}{a} \cdot \Phi \cdot n = C_E \cdot \Phi \cdot n,$$

$$T_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{pN}{a} \cdot \Phi \cdot I_a = C_M \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (7)$$

где  $p$  - число пар полюсов;

$N$  - Число проводников на якоре;

$a$  - число пар параллельных ветвей якоря;

$C_E, C_M$  - коэффициенты ЭДС и момента, соответственно.

При этом,

$$\frac{C_E}{C_M} = \frac{2\pi}{60} = 0,105. \quad (8)$$

Но, если в выражении для ЭДС (7) скорость вращения выразить в угловых единицах, то, считая, что

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi}$$

получим

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{60} \cdot \frac{pN}{a} \cdot \Phi \cdot n = \\ &= \frac{1}{60} \cdot \frac{pN}{a} \cdot \Phi \cdot \frac{60 \cdot \omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{pN}{a} \cdot \Phi \cdot \omega = C'_E \cdot \Phi \cdot \omega. \end{aligned} \quad (9)$$

При этом,

$$\frac{C'_E}{C_M} = 1. \quad (10)$$

Поэтому в модели, где скорость вращения вала машины определяется угловой скоростью, коэффициенты приняты  $C'_E = C_M = 1$ .

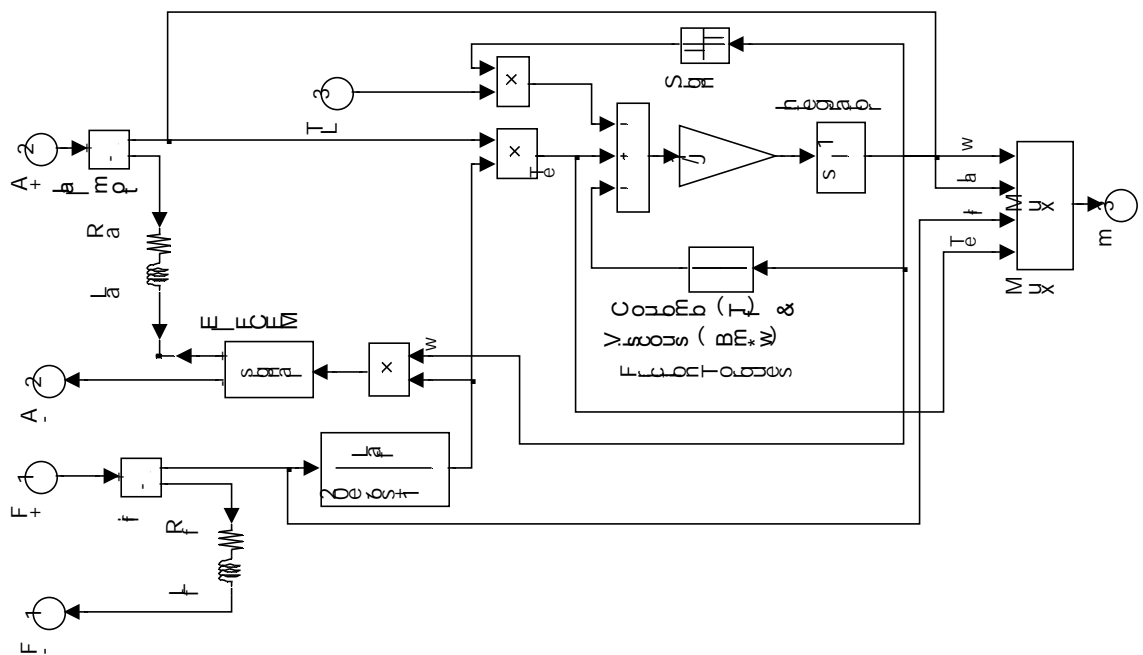


Рисунок 1.23 – Внутренняя схема блока **DC Machine**

В соответствие со схемой линейной модели, магнитный поток машины  $\Phi$  формируется по выражению

$$\Phi = L_{af} \cdot I_f, \quad (11)$$

где  $L_{af}$  - некоторая индуктивность, Г.

ЭДС якоря машины  $E$  определяется так

$$E = \Psi \cdot \omega = L_{af} \cdot I_f \cdot \omega. \quad (12)$$

Электромагнитный момент на валу машины, согласно рисунку 1.23 равен

$$T_e = \Psi \cdot I_a = L_{af} \cdot I_f \cdot I_a. \quad (13)$$

**Block Parameters: DC Machine**

DC machine (mask)

This block implements a separately excited DC machine. Access is provided to the field connections so that the machine can be used as a shunt-connected or a series-connected DC machine.

Input 1 and output 1 : positive and negative armature terminals  
 Input 2 and output 2 : positive and negative field terminals  
 Input 3 : Load torque  
 Output 3 : Simulink measurement output [  $\omega$   $I_a$   $I_f$   $T_e$  ]

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

OK Cancel Help Apply

Рисунок 1.24 – Окно параметров блока *DC Machine*

В окне дается краткое описание блока с указанием назначения выводов.

В поле **Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)]** вводятся в виде вектора сопротивление якоря в Ом и индуктивность в Гн.

В поле **Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)]** вводят сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения, соответственно.

В поле **Field- Armature mutual inductance Laf (H)** вводят коэффициент взаимоиндукции между обмотками возбуждения и якоря, в Гн.

В поле **Total inertia J (kg.m<sup>2</sup>)** вводят приведенный к якорю полный момент инерции в кг·м<sup>2</sup>.



В поле **Viscous friction coefficient Bm (N.m.s.)** вводят коэффициент вязкого трения в Н·м·с.

В поле **Coulomb friction torque Tf (N.m)** вводят момент сухого трения в Н·м.

В поле **Initial speed (rad/s)** вводят начальную скорость вращения вала, она необходима для начала вычислений и может быть весьма низкой. По умолчанию 1 рад/с.

Подготовка исходных данных для моделирования по каталожным сведениям рассмотрена далее отдельно.

#### 1.4.2 Блок *Asynchronous Machine SI Units* и блок *Machines Measurement Demux*

Блок **Asynchronous Machine SI Units** имеет три вывода обмотки статора (A, B, C) для подключения источника трехфазного напряжения. Выводы обмотки ротора (a, b, c) видны на схеме в случае использования блока для моделирования двигателя с фазным ротором.

В соответствующем окне параметров **Rotor type** (тип ротора) может быть установлен тип двигателя: **Wound** (фазный) или **Squirrel-cage** (с короткозамкнутой обмоткой).

Если установлен короткозамкнутый ротор, то данные выводы скрываются на изображении блока, как показано на рисунке 1.25.



Рисунок 1.25 – Вид блока типа *Squirrel-cage* (а) и типа *Wound* (б)

На вход  $T_m$  подается величина равная моменту сил сопротивления нагрузки. С вывода  $m$  – снимается вектор измеренных величин. Рядом с блоком можно ввести его параметры, например, мощность, напряжение и т.д.

Окно настройки блока содержит величины характеризующие машину, которые легко могут быть вычислены по паспортным данным, как показано далее на конкретном примере. Окно настройки показано на рисунке 1.26 и (кроме рассмотренного ранее поля **Rotor type**) содержит семь полей.

**Reference frame** – вид регулировки:

- **Rotor** – по ротору (реостатное);
- **Stationary** – нерегулируемый;
- **Synchronous** - частотное.

**Nom. Power, L-L volt and freq. [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]** – номинальная полная мощность потребляемая двигателем в ВА, номинальное линейное напряжение в В и частота в Гц.

**Stator [Rs(ohm) Lls(H)]** – сопротивление фазы обмотки статора в Ом и ее индуктивность в Гн.

**Rotor [Rr'(ohm) Llr'(H)]** – приведенное сопротивление фазы обмотки ротора в Ом и ее приведенная индуктивность в Гн.

**Mutual inductance Lm(H)** – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора в Гн. В отечественной практике данная величина называется индуктивностью намагничивающей цепи схемы замещения двигателя.

**Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m<sup>2</sup>) F(N.m.s) p()]** - приведенный момент инерции ротора в кг·м<sup>2</sup>, коэффициент сопротивления в Н·м·с и число пар полюсов.

**Initial conditions (read the details in the description above)** – начальные условия (обычно принимаются по умолчанию).

**Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units**

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

You can specify initial values for stator and rotor currents. In the Initial conditions parameter you have the possibility to specify the stator current only :

[ s() th(deg) isa, isb, isc(p.u.) pha, phb, phc(deg) ]:

Or you can choose to enter the stator and the rotor initial currents:

[ s() th(deg) isa, isb, isc(p.u.) pha, phb, phc(deg) ira, irb, irc(pu) pha, phb, phc ]:

Parameters

Rotor type:

Reference frame:

Nom. power, L-L volt. and freq. [ Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz) ]:

Stator [ Rs(ohm) Lls(H) ]:

Rotor [ Rr'(ohm) Llr'(H) ]:

Mutual inductance Lm (H):

Inertia, friction factor and pairs of poles [ J(kg.m<sup>2</sup>) F(N.m.s) p() ]:

Initial conditions (read the details in the description above)

OK Cancel Help Apply

Рисунок 1.26 – Окно параметров блока *Asynchronous Machine SI Units*

Важным элементом модели является блок измерений - **Machines Measurement Demux**, он также выбирается из библиотеки **Machines**. Его назначение – осуществлять связь между М-файлом модели двигателя и внешними измерительными устройствами. В процессе моделирования вычисляется большое количество электрических параметров машины, но далеко не все требуется вывести в качестве результата. Поэтому в измерительном блоке предусмотрена возможность, отмечать галочками те величины, которые необходимы исследователю. В качестве примера, покажем четыре: ток ротора; ток статора; частота вращения ротора и электромагнитный момент машины. Окно параметров этого блока показано на рисунке 1.27.

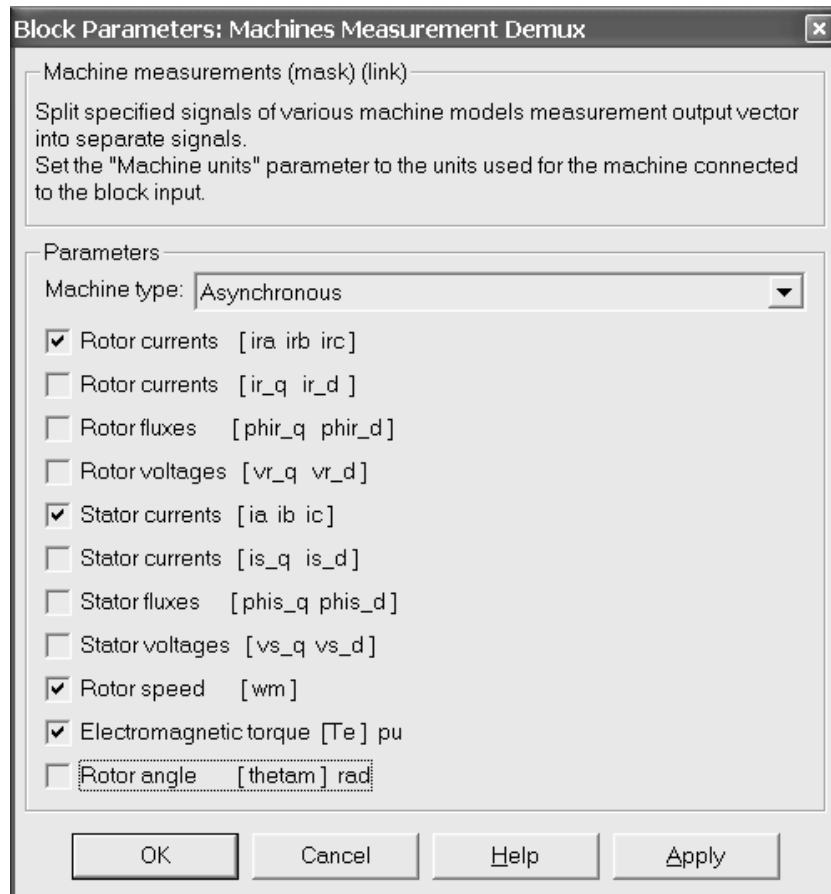


Рисунок 1.27 – Окно параметров блока **Machines Measurement Demux** для асинхронной машины

### 1.4.3 Блок **Synchronous Machine SI Fundamental**

Блок моделирования синхронной машины (как и предыдущий) выполнен с использованием S-функций. Это специальные подпрограммы, которые могут быть написаны на языках С, АДА, Фортран и других. Они применяются, для тех задач, которые трудно или громоздко решаются с помощью обычных средств **Simulink**. По этой причине внутренняя структура блока невидна.

Он основан на применении классической Т-образной схемы замещения синхронной машины.

Окно параметров блока показано на рисунке 1.28.

В первом выпадающем списке окна **Rotor type** (тип ротора) можно ус-

тановить два значения:

**Salient-pole** (явновыраженные полюса);

**Round** (круговое поле).

**Nom. power, volt., freq. and field cur. [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ifn(A)]** – номинальная мощность, [ВА], действующее напряжение, [В], частота [Гц] и намагничивающая сила [А];

**Stator [Rs(ohm) Ll, Lmd, Lmq(H)]** – сопротивление статорной обмотки [Ом], индуктивность рассеяния [Гн], индуктивность цепи намагничивания схемы замещения для режима двигателя и генератора [Гн], соответственно.

**Block Parameters: Synchronous Machine SI Fundamental**

Synchronous Machine (mask)  
Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

Parameters

Rotor type: **Salient-pole**

Nom. power, volt., freq. and field cur. [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ifn(A) ]:  
[ 187E6 13800 60 1087 ]

Stator [ Rs(ohm) Ll, Lmd, Lmq(H) ]:  
[ 2.9069E-03 3.0892E-04 3.2164E-03 9.7153E-04 ]

Field [ Rf'(ohm) Lld'(H) ]:  
[ 5.9013E-04 3.0712E-04 ]

Dampers [ Rkd', Lldk' Rkq1', Llkq1' ] (R=ohm, L=H):  
[ 1.1900E-02 4.9076E-04 2.0081E-02 1.0365E-03 ]

Inertia, friction factor and pole pairs [ J(kg.m<sup>2</sup>) F(N.m.s) p() ]:  
[ 3.895e6 0 20 ]

Init. cond. [ dw(%) th(deg) ia, ib, ic(A) pha, phb, phc(deg) Vf(V) ]:  
[ 0 0 0 0 0 0 0 0 70.3192 ]

☐ Simulate saturation

☐ Display Vfd which produces nominal Vt

OK Cancel Help Apply

Рисунок 1.28 – Окно параметров блока *Synchronous Machine SI Fundamental*

**Field [Rf'(ohm) Lld'(H)]** – приведенные параметры обмотки ротора (возбуждения) сопротивление [Ом] и индуктивность рассеяния [Гн], соответственно;

**Dampers [Rkd', Lldk' Rkq1', Llkq1' Rkq2', Llkq2'] (R=ohm, L=H)** – приведенные параметры демпферных обмоток: сопротивления [Ом] и индуктивность рассеяния [Гн];

**Inertia, friction factor and pole pairs [J(kg.m<sup>2</sup>) F(N.m.s) p()]** – момент инерции J, в кг.м<sup>2</sup>, коэффициент вязкого трения F, в Н·м·с.; число пар полюсов p;

**Init. cond.** [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(A) pha, phb, phc(deg) Vf(V)] – величина отклонения скорости, в процентах номинальной скорости вращения dw [%], электрический угол ротора th в градусах; пиковые линейные токи ia, ib, ic, [A], углы сдвига фаз A, B и C - pha, phb, phc, в градусах, соответственно; начальная величина напряжения обмотки возбуждения, [B];

**Saturation parameters** [ifd1,ifd2,... (A) ; vt1,vt2,... (VLL rms)] – параметры кривой намагничивания. Вы можете произвольно определить параметры кривой намагничивания для сердечника статора и ротора синхронной машины. Кривая насыщения вводится в виде матрицы размерностью [2·n], где n – число точек на кривой. Первый ряд матрицы должен состоять из значений магнитного потока, а, второй ряд должен состоять из значений соответствующих напряженностей поля.

Если моделировать кривую намагниченности нет необходимости, то в данном поле задают просто пустые скобки "[ ]".

Выходом модели является вектор **m**, который содержит все величины рассчитываемые в модели. Для развертывания данного вектора следует использовать блок **Machines Measurement Demux**.

#### 1.4.4 Блок *Permanent Magnet Synchronous Machine*

Блок является моделью трехфазной синхронной машины с ротором в виде постоянного магнита. Он применяется для моделирования синхронного генератора и двигателя данного типа. Электрическая и механическая части машины описываются в модели системами второго порядка. Предполагается, что магнитный поток, возбужденный в статоре и электродвижущие силы синусоидальны.

Обмотки статора соединены в звезду с внутренней нейтральной точкой.

Входами модели являются выводы обмотки статора **A, B, C**, на который подаются линейные напряжения источника.

Четвертый вход модели **Tm** – сигнал соответствующий механическому крутящему моменту на валу [Н·м]. Он положителен при работе машины в двигательном режиме, и отрицателен в генераторном режиме.

Окно параметров машины приведено на рисунке 1.29.

В первое поле **Resistance R(ohm)** вводят значение сопротивления обмотки фазы статора, [Ом].

Во второе поле **Inductances [Ld(H) Lq(H)]** вписывают величину индуктивности обмотки фазы статора [Гн] в двигательном или генераторном режимах соответственно.

В третьем поле **Flux induced by magnets (Wb)** вводится величину магнитного потока создаваемого постоянным магнитом, [Вб].

Последнее поле окна **Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m<sup>2</sup>) F(N.m.s) p()]** предназначено для ввода момента инерции J, в кг.м<sup>2</sup>, коэффициент вязкого трения F, в Н·м·с. и числа пар полюсов p.

Выходом модели является вектор **m** размерностью [10·1]. Вид окна блока **Machines Measurement Demux** для синхронной машины с ротором в

виде постоянного магнита дан на рисунке 1.30.

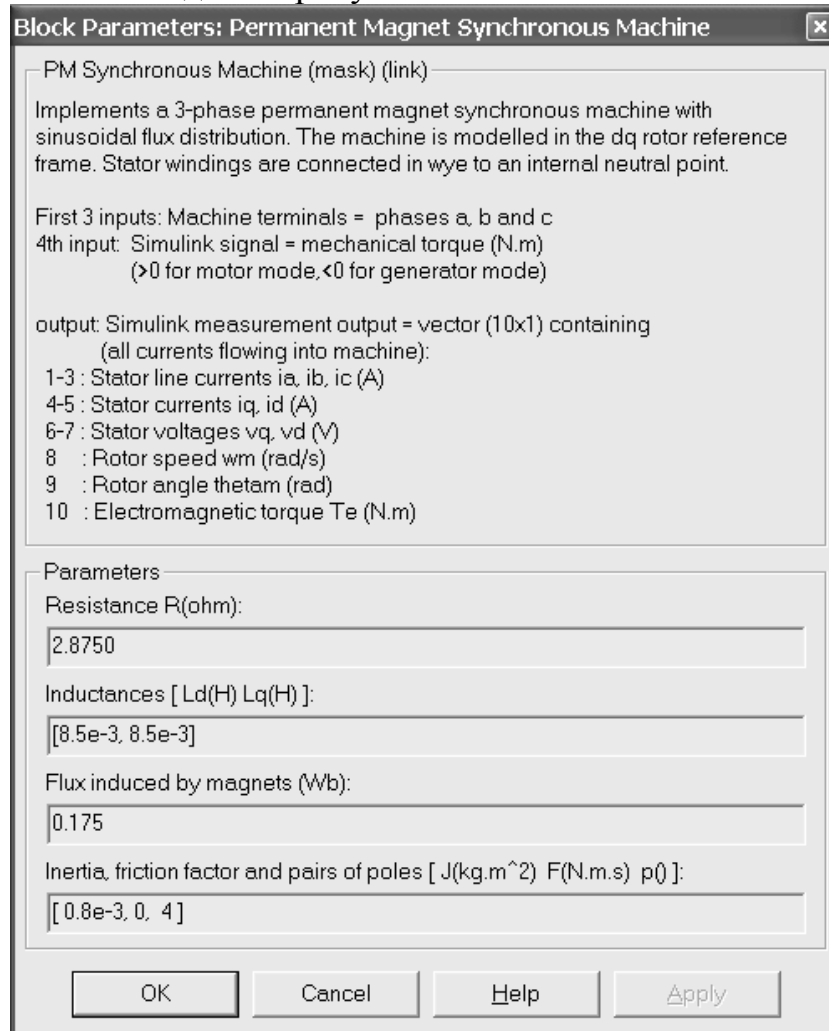


Рисунок 1.29 – Параметры блока *Permanent Magnet Synchronous Machine*

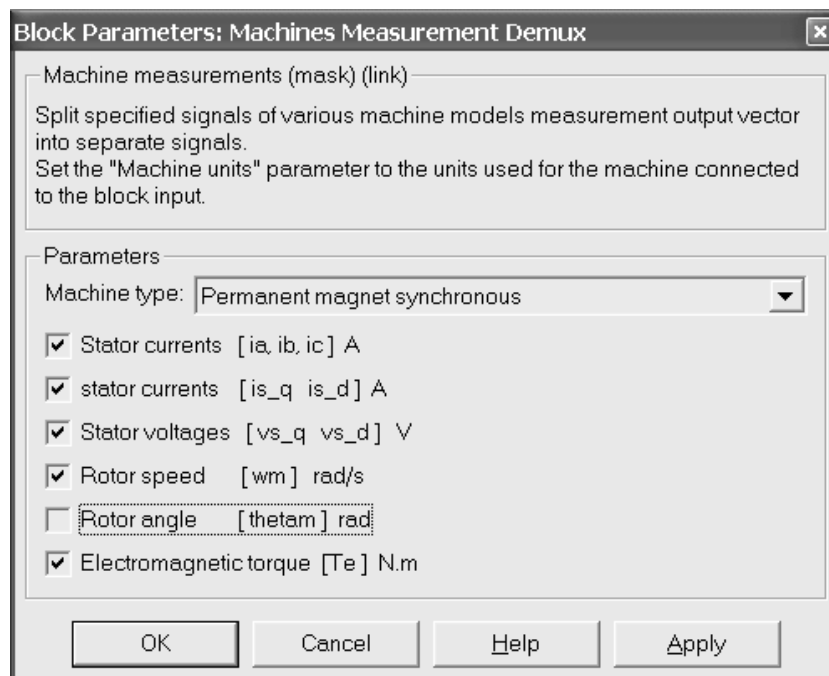


Рисунок 1.30 – Окно *Machines Measurement Demux* для *Permanent Magnet Synchronous Machine*

Применение данного блока является обязательным при создании модели синхронной или асинхронной машины.

### 1.5 Библиотека *Measurements* – измерительные и контрольные устройства

В состав данной библиотеки входят 5 блоков, см. рисунок 1.31.

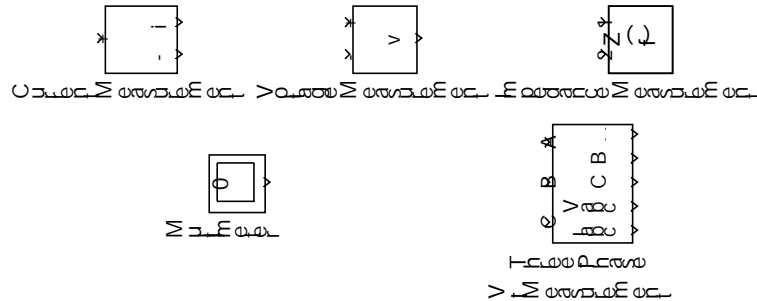


Рисунок 1.31 – Состав библиотеки *Measurements*

Блоки **Current Measurement** и **Voltage Measurement** предназначены для соединения блоков пакета **SimPowerSystems** с измерительными блоками **Simukink**. Благодаря ним, к моделям можно подключать дисплеи, осциллографы, графопостроитель и другие блоки.

Блок **Impedance Measurement** позволяет измерить частотную зависимость полного сопротивления между точками подключения исследуемой схемы.

Этот блок используется, чтобы измерять напряжения и токи в трехфазной цепи.

При моделировании можно обойтись без включения в модель многочисленных приборов. Для сложных схем они засоряют схему и затрудняют ее чтение. В пакете **SimPowerSystems** предусмотрен прибор **Multimeter** к нему можно подключать дисплеи или осциллографы из библиотеки **Sinks Simukink**. В окне блока **Multimeter**, устанавливаются величины, подлежащие измерению, которые в том же порядке (сверху вниз) отражаются на дисплеях. Предварительно, в окнах настройки элементов схемы (поле **Measurement**) устанавливаются те параметры, которые нуждаются в измерении. Пример применения данных блоков приведен на рисунке 1.32. На нем изображена несложная цепь постоянного тока с тремя ветвями (рисунок 1.32,а.)

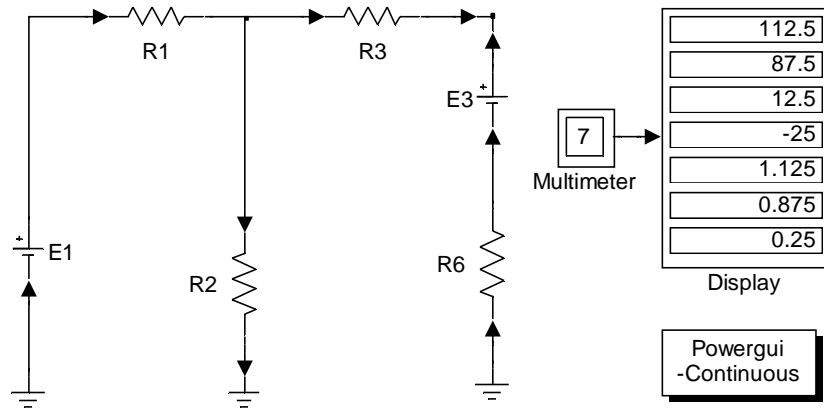
Окно блока **Multimeter** показано на рисунке 1.32,б.

Вместо дисплеев для визуализации измеренных величин подключить блок **Powergui** из корневого каталога библиотеки **SimPowerSystems**.

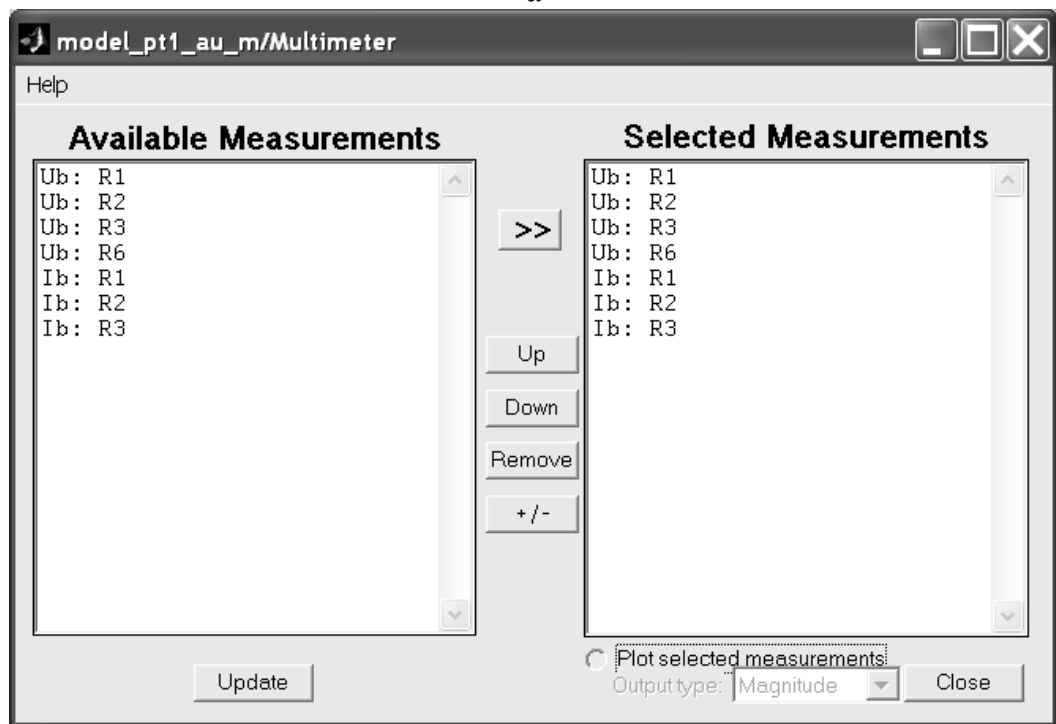
После выбора величин подлежащих измерению в окне блока **Multimeter**, следует раскрыть блок **Powergui**, его окно показано на рисунке 1.33,а. Выбор пункта меню **Steady-State Voltages and Currents** открывает окно с измеренными параметрами модели, рисунок 1.33,б.

Следует отметить, что использование блоков **Multimeter** и **Powergui** упрощая схему, в то же время, делает ее более «виртуальной». Введение из-

мерительных блоков **Voltage Measurement** и **Current Measurement** с дисплеями, позволяет приблизить вид исследуемого устройства к реальному лабораторному стенду с вольтметрами и амперметрами. Поэтому в относительно простых схемах, использование измерительных блоков в моделях на наш взгляд, более методически оправдано.



a



б

Рисунок 1.32 – Применение блоков **Multimeter** с дисплеями

В сложных схемах, трудно представить ее графическое изображение так, чтобы оно не выходило за пределы экрана монитора. Здесь весьма полезными оказываются блоки **Goto** и **From**. Они позволяют организовать невидимые связи для передачи сигналов между блоками и, в частности, к измерительным приборам. Блок **Goto** (перейти) подключают к источнику сигнала, а блок **From** (от) на вход приемника. Параметрами блоков являются: **Tag** – имя передаваемого сигнала и **Tag visibility** – область видимости передаваемых данных. Последние могут иметь значения:

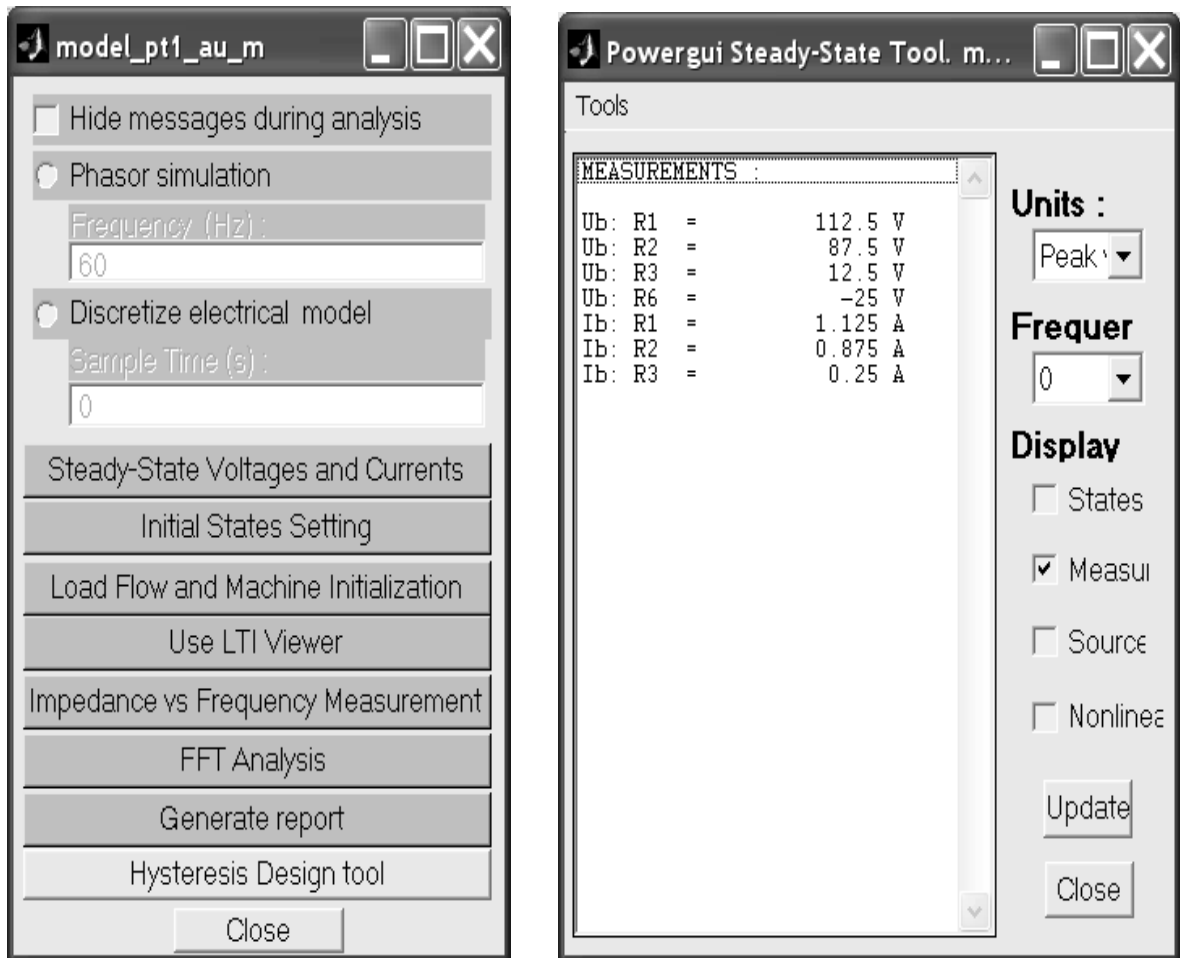


**local** – локальные данные, доступные только той подсистеме, где имеется блок **Goto**;

**scoped** – данные распространяются на все подсистемы более низкого уровня;

**global** – данные доступны всем подсистемам и основной системе.

Пример применения блоков **Goto** и **From** показаны на рисунке 1.34.



а

б

Рисунок 1.33 – Окна блока **Powergui**

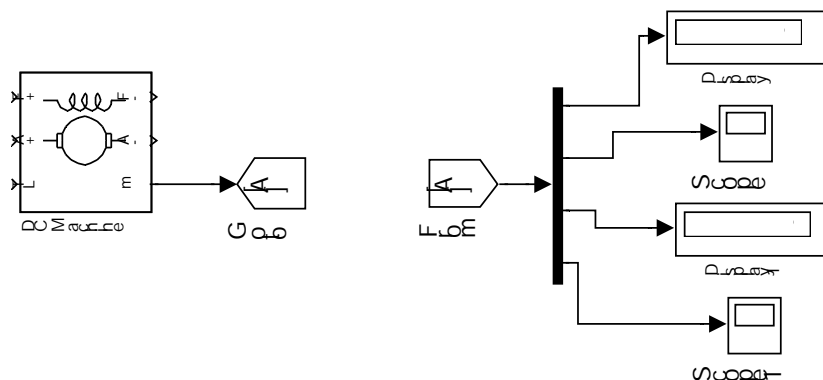


Рисунок 1.34 - Пример применения блоков **Goto** и **From**

## 1.6 Библиотека *Power Electronics* – устройства энергетической электроники

Современная силовая электроника основана на импульсном способе преобразования электрической энергии, обеспечивающем высокий коэффициент полезного действия преобразовательных устройств.

Поэтому в библиотеку рассматриваемого пакета включен достаточно представительный набор блоков коммутирующих устройств. Активизация пиктограммы **Power Electronics** открывает окно с пиктограммами моделей управляемых ключей. На рисунке 1.35 приведены все входящие в данную библиотеку элементы.

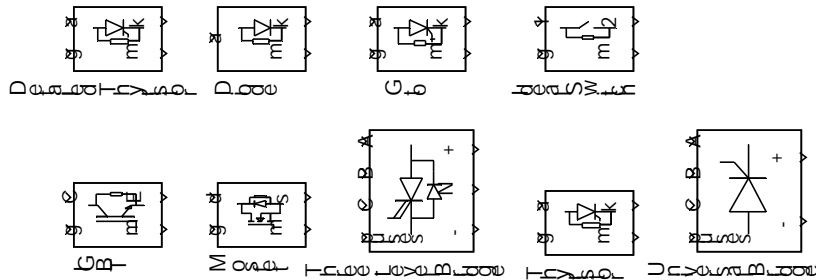


Рисунок 1.35 - Состав библиотеки компонентов *Power Electronics*

В библиотеку входят:

- **Detailed thyristor** – уточненная модель тиристора;
- **Diode** – полупроводниковый диод;
- **Gto** – запираемый тиристор (Gate turn off);
- **Ideal Swith** – идеальный управляемый ключ;
- **IGBT** – силовой биполярно-полевой модуль типа JGBT;
- **Mosfet** – полевой транзистор с изолированным затвором;
- **Three-level Bridge** – универсальный мост;
- **Thyristor** – упрощенная модель тиристора;
- **Universal Bridge** – универсальный модуль моста.

Три последних блока появились в версии **Simulink 5**.

В пакете отсутствует модель транзистора, тем самым подчеркивается назначение пакета – моделирование силовых схем электроники, где биполярные транзисторы практически не применяются, и где не требуется учитывать мелкие особенности того или иного типа электронного компонента.

Конечно, пользователь может (в случае необходимости) составить подсистему биполярного транзистора, например на основе модели идеального ключа, но для моделирования транзисторных схем существуют специальные программные продукты. Производителями электронных компонентов к ним разработаны подробнейшие библиотеки моделей, куда входят десятки тысяч моделей, весьма точно отражающие особенности конкретной марки диода, транзистора или иного элемента.

Все модели коммутирующих элементов библиотеки **Power Electronics** содержат гасящую выбросы напряжения последовательную RsCs-цепь, которая подключается к силовым выводам моделей. Задание бесконечного значения Cs и нулевого Rs закорачивает модель (пиктограмма устройства при этом заменяется пиктограммой проводника). Модели имеют также выход m для подключения измерительных приборов. На этом выходе формируется список значений тока, протекающего через устройство, и напряжения на нем в процессе моделирования, что позволяет строить системы, управляемые этими параметрами.

Подробное рассмотрение некоторых из данных блоков.

Диоды моделируются блоком **Diode**. В их параметры входят:

- сопротивление **Ron** и индуктивность **Lon** при прямом включении;
- напряжение, при котором начинается протекание тока через диод **Vf**;
- сопротивление **Rs** и емкость **Cs**;
- начальное значение тока через диод **Ic** (обычно принимается по умолчанию – 0).

Следует отметить, что модель диода весьма приближенная. Так при нулевом токе через диод на диоде напряжение оказывается ненулевым. У реального диода это напряжение равно нулю. Экспоненциальная вольтамперная характеристика заменена в модели прямой линией. Не полностью учитываются и инерционные свойства прибора. Тем не менее принятые допущения вполне соответствуют тем, что применяются в практике проектирования силовых устройств промышленной электроники.

Тиристоры имеют две модели упрощенную **Thyristor** и уточненную **Detailed thyristor**.

Обе модели построены на основе идеального переключателя с элементами, имитирующими остаточные параметры включенного тиристора. Это сопротивление во включенном состоянии **Ron**, индуктивность **Lon** и падение напряжения в прямом направлении **Vf**. В выключенном состоянии сопротивление тиристора (как и диода) считается равным бесконечности. Тиристор выключается, если управляющий сигнал равен нулю, а также тогда, когда прямой ток тиристора спадает до нуля или напряжение на приборе принимает отрицательное значение.

Уточненная модель тиристора позволяет несколько более точно исследовать переходные процессы. Он имеет два дополнительных параметра: ток выключения **I** и время выключения **Tq**, которое характеризует задержку выключения.

Силовой модуль **IGBT** – новый перспективный элемент электроники. Он создан на основе комбинации биполярных транзисторов с полевыми. Статическая вольтамперная характеристика модуля может быть представлена в виде двух отрезков прямых (рисунок 1.36,а). Горизонтальный участок – выключенное состояние модуля, наклонный – включенное. Наклон последнего задается сопротивлением устройства во включенном состоянии. Остаточное напряжение на малых токах учитывается параметром **Vf** (как у диода). Внут-

ренняя структура модуля показана на рисунке 1.36,б. Он представляет собой ключ, имеющий некоторое сопротивление и индуктивность (они вводятся в окне параметров блока) и управляющий элемент, который по сигналу, пришедшему извне открывает или закрывает ключ.

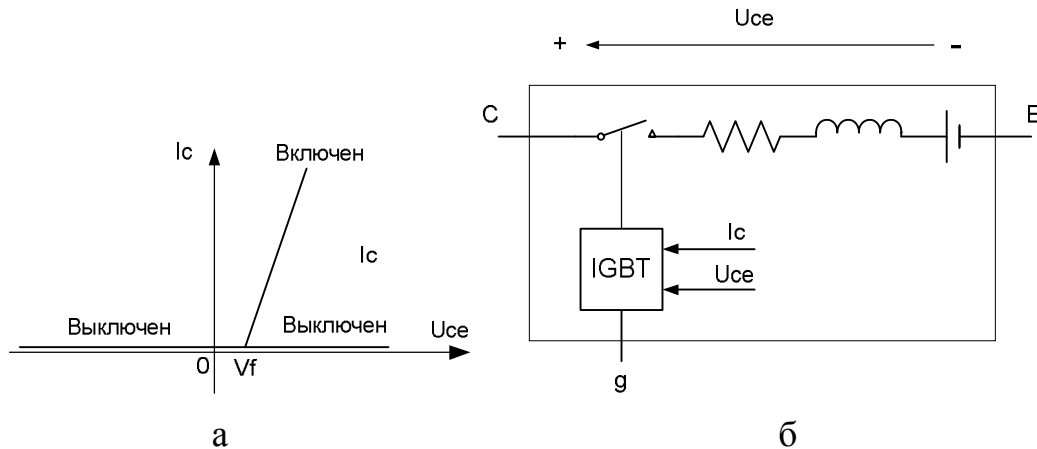


Рисунок 1.36 – Вольтамперная характеристика и внутренняя структура модуля **IGBT**

Блоки **Three-level Bridge** и **Universal Bridge** позволяют упростить моделирование мостовых схем содержащие несколько коммутационных приборов.

В окнах их параметров задают число фаз моста и тип коммутационного прибора.

## 2 Построение блок-схем моделей в системе Simulink

Рассмотрим, какие операции выполняют в процессе построения блок-схем сложных динамических систем.

### 2.1 Выделение объектов

При создании и редактировании S-модели нужно выполнять такие операции, как копирование или удаление блоков и линий. Для этого предварительно необходимо выделить один или несколько блоков и линий (объектов).

Чтобы выделить отдельный объект, нужно щелкнуть на нем мышью один раз. В результате по углам выделенного блока или в начале и конце линии появятся маленькие черные метки. При этом все другие ранее выделенные объекты станут невыделенными. Если щелкнуть на объекте второй раз, он станет невыделенным.

Выделение нескольких объектов по одному осуществляется следующим образом. Необходимо нажать клавишу **[Shift]** и, удерживая ее нажатой, выполнить щелчки на каждом выделяемом объекте. Затем клавишу **[Shift]** отпустить.

Группу объектов можно выделить также с помощью рамки. Делается это так. Необходимо установить курсор мыши в точку, которая будет являться начальной точкой рамки, нажать левую кнопку мыши и, не отпуская ее, переместить мышь в направлении диагонали прямоугольника. В результате

на экране появится прямоугольная рамка и, когда вы отпустите кнопку мыши, все объекты и линии, охваченные рамкой, будут выделены.

Если требуется выделить всю S-модель, т.е. все объекты в активном окне блок-схемы, то для этого следует воспользоваться командой **Select All** (Выбрать все) из меню **Edit** (Правка) или комбинацией клавиш [**Ctrl+A**].

## 2.2 Операции с блоками

### 2.2.1 Копирование и перестановка блоков

Можно копировать блоки из библиотеки или другой модели в текущую S-модель. Для этого достаточно открыть нужную библиотеку или окно модели-прототипа и перетащить мышью нужный блок в окно создаваемой (редактируемой) модели.

Блоки можно копировать и при помощи команд меню. Последовательность действий при этом такова:

- в окне библиотеки или модели выделите блок/блоки, подлежащие копированию.
- выберите в меню **Edit** (Правка) активного окна команду **Copy** (Копировать).
- сделайте активным окно, в которое нужно скопировать блок, и выберите в нем команду **Paste** (Вставить) из меню **Edit** (Правка).

Каждому скопированному блоку **Simulink** присваивает имя.

Первый скопированный блок будет иметь то же имя, что и блок в библиотеке. Каждый следующий блок того же типа будет иметь такое же имя с добавлением порядкового номера. Пользователь может переименовать блок. При копировании блок получает те же значения настраиваемых параметров, что и блок-оригинал.

Перестановка блока внутри модели осуществляется путем перетаскивания его мышью. При этом **Simulink** автоматически перерисовывает линии, связывающие этот блок с другими блоками.

Чтобы переставить несколько блоков вместе с соединительными линиями и с сохранением относительных расстояний, необходимо их выделить и перетащить мышью один из блоков. Все другие выделенные блоки также займут новые места.

Копирование блоков одной модели можно выполнить двумя способами:

- перетащить блок в нужное положение, удерживая клавишу [**Ctrl**].
- перетащить блок, удерживая нажатой правую кнопку мыши.

### 2.2.2 Установка параметров блока

Функции, которые выполняет блок, зависят от значений параметров блока. Установка этих значений осуществляется в окне настройки блока, которое вызывается после двойного щелчка на изображении блока в блок-

схеме. Окна настройки параметров для некоторых блоков показаны выше. Далее, при рассмотрении конкретных примеров моделирования электрических схем, мы, если это необходимо, будем приводить вид этих окон.

### 2.2.3 Удаление блоков

Для удаления ненужных блоков из блок-схемы достаточно выделить эти блоки так, как было указано ранее, и нажать клавишу **[Del]** или **[Backspace]**. Можно также вызвать команду **Clear** (Очистить) или **Cut** (Вырезать) из меню **Edit** (Правка) окна блок-схемы. Если использована команда **Cut**, то в дальнейшем удаленные блоки можно скопировать в S-модель при помощи команды **Paste** (Вставить) того же меню.

### 2.2.4 Отсоединение блока

Чтобы отсоединить блок от линий, достаточно нажать клавишу **[Shift]** и, не отпуская ее, перетащить блок в другое место.

### 2.2.5 Изменение угловой ориентации блока

В начальном состоянии сигнал проходит через блок слева направо (по левую сторону располагаются входы блока, а по правую сторону - выходы). Чтобы изменить угловую ориентацию блока следует:

- выделить блок, который нужно повернуть.
- выбрать в меню **Format** (Формат) окна блок-схемы одну из следующих команд – **Flip Block** (Поворот блока на 180 градусов) или **Rotate Block** (Поворот блока по часовой стрелке на 90 градусов). Меню **Format** можно вызвать, выделив блок и нажав правую кнопку мыши.

### 2.2.6 Изменение размеров и имени блока

Изменение размеров блока выполняется следующим образом. Выделите блок и установите указатель мыши на одну из угловых меток блока. Форма указателя при этом изменится – он примет вид двунаправленной стрелки. "Захватите" мышью эту метку и перетяните ее в новое положение.

Все имена блоков в модели должны быть уникальными и состоять хотя бы из одного символа. Чтобы изменить имя блока, нужно выполнить щелчок на имени, а затем, используя обычные приемы редактирования, внести необходимые изменения.

Для изменения шрифта следует выделить блок, вызвать команду **Font** (Шрифт) из меню **Format** (Формат) окна модели и затем выбрать шрифт в открывшемся диалоговом окне.

По умолчанию имя блока располагается следующим образом. Если блок ориентирован слева направо, то имя находится под блоком, если справа налево – над блоком, если же сверху вниз или снизу вверх – по правой стороне блока. Изменить местоположение имени выделенного блока можно двумя способами:

- перетащить имя мышью на противоположную сторону блока;
- воспользоваться командой **Flip Name** из меню **Format** окна модели – она также переносит имя на противоположную сторону блока.

Скрыть имя блока можно, используя команду **Hide Name** (Скрыть имя) меню **Format** (Формат) окна модели. Чтобы восстановить отображение имени, следует воспользоваться командой **Show Name** (Показать имя) того же меню.

### 2.2.7 Создание соединительных линий

Сигналы в модели передаются по линиям. Каждая линия может передавать или скалярный, или векторный сигнал. Линия соединяет выходной порт одного блока с входным портом другого блока. Линия может также разветвляться и соединять выходной порт одного блока с входными портами нескольких блоков.

Чтобы соединить выходной порт одного блока с входным портом другого, нужно выполнить следующие действия:

- установить указатель мыши на выходной порт первого блока (при этом курсор должен принять форму перекрестия).
- нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее в этом положении, передвинуть указатель к входному порту второго блока;
- отпустить кнопку мыши.

**Simulink** заменит символы портов соединительной линией с указанием направления передачи сигнала. Линии можно рисовать как от входного порта к выходному, так и наоборот.

Разветвленная линия, эта такая, которая ответвляется. Она начинается от существующей линии и передает ее сигнал к входному порту другого блока. Как существующая, так и ответвленная линии передают один сигнал. Разветвленная линия дает возможность передать один и тот же сигнал к нескольким блокам.

Чтобы образовать ответвление от существующей линии, необходимо выполнить следующие действия:

- установить курсор в точку ответвления;
- нажать клавишу **[Ctrl]** и левую кнопку мыши и удерживать их нажатыми;
- провести линию к входному порту нужного блока;
- отпустить клавишу **[Ctrl]** и левую кнопку мыши.

Блоки можно соединять ломаными линиями, состоящими из нескольких сегментов. Для создания следующего сегмента необходимо установить курсор в конец предыдущего сегмента и нарисовать (удерживая левую клавишу мыши) следующий сегмент.

Чтобы переместить отдельный сегмент линии, необходимо выполнить следующие действия:

- установить указатель на перемещаемом сегменте.

- нажать и удерживать левую кнопку мыши. Курсор при этом должен принять форму креста.
- переместить указатель в новое положение сегмента и отпустить кнопку мыши.

### 2.2.8 Проставление меток сигналов и комментариев

Для наглядности и удобства блок-схемы линии можно снабдить метками, указывающими, какие сигналы по ним проходят. Метки размещают под или над горизонтальной линией, по левую или по правую сторону от вертикальной линии. Метка может быть расположена в начале, в конце или посередине линии.

Чтобы создать метку сигнала, нужно дважды щелкнуть на сегменте линии и затем ввести текст. Причем двойной щелчок следует выполнять точно на линии, так как в противном случае будет создан комментарий к модели.

Перемещение метки осуществляется путем перетаскивания ее мышью на новое место. Если при этом удерживать нажатой клавишу **[Ctrl]**, то метка будет скопирована в новое место. Скопировать метку можно также, выполнив двойной щелчок на другом сегменте линии.

Чтобы отредактировать метку, следует щелкнуть на ней и затем внести соответствующие изменения в ее текст.

Чтобы удалить метку, выделите ее, удерживая клавишу **[Shift]**, и нажмите клавишу **[Del]** или **[Backspace]**. При этом будут удалены все метки этой линии.

Комментарии дают возможность сопровождать блок-схемы текстовой информацией о модели и отдельных ее составляющих. Комментарии можно проставлять в любом свободном месте блок-схемы.

После двойного щелчка в любом свободном месте блок-схемы появляется прямоугольная рамка, в которую можно ввести текст комментария.

Перемещение комментария осуществляется путем перетаскивания его с помощью мыши.

Если при этом удерживать нажатой клавишу **[Ctrl]**, комментарий будет скопирован в новое место.

Созданный комментарий можно отредактировать. Для этого нужно выполнить на нем щелчок, а потом внести соответствующие изменения.

Чтобы изменить при этом параметры шрифта комментария, необходимо выделить текст комментария и выбрать команду **Font** (Шрифт) из меню **Format** (Формат) окна блок-схемы. После этого появится диалоговое окно, в котором следует выбрать название шрифта, его размер, атрибуты и стиль и нажать кнопку **OK**.

Комментарий можно удалить. Для этого выделите комментарий, удерживая клавишу **[Shift]**, и нажмите клавишу **[Del]** или **[Backspace]**.

### 2.2.9 Создание субмоделей

Если блок-схемы модели слишком сложная и имеет большие размеры,



ее можно упростить, группируя блоки в субмодель. Использование субмоделей дает следующие преимущества:

- сокращается количество блоков, которые выводятся в окне модели;
- появляется возможность объединить в одну группу (подсистему) функционально связанные блоки;
- появляется возможность создания иерархических блок-схем.

Подсистему можно создать двумя способами:

- добавить блок **Subsystem** в S-модель, потом войти в этот блок и создать субмодель в появившемся окне субмодели;
- выделить часть блок-схемы модели и объединить ее в субмодель.

Для создание субмодели путем добавления блока **Subsystem**, следует поступать так:

- скопировать блок **Subsystem** в окно модели, перетянув его из раздела **Connections**;
- открыть окно блока **Subsystem**, дважды щелкнув на изображении блока в блок-схеме;
- в пустом окне модели создать субмодель, используя блоки **In** и **Out** для создания входов и выходов субмодели.

Создание субмодели путем группировки существующих блоков производится тогда, когда блок-схема уже содержит блоки, которые нужно объединить в субмодель. Порядок действий здесь такой:

- выделить при помощи рамки блоки и соединяющие их линии, которые нужно включить в состав подсистемы;
- выбрать команду **Create Subsystem** (Создать подсистему) из меню **Edit** (Правка). В результате **Simulink** заменит выделенные блоки одним блоком **Subsystem**.

Чтобы увидеть блок-схему созданной субмодели, следует дважды щелкнуть на блоке **Subsystem**.

### 2.2.10 Запись и печать S-модели

Для записи модели (блок-схемы) на диск нужно вызвать команду **Save** (Сохранить) или **Save As** (Сохранить как) из меню **File** (Файл) окна модели. При этом **Simulink** записывает в указанную вами папку файл с заданным (введенным с клавиатуры) именем, присваивая ему расширение **.mdl**.

Чтобы распечатать S-модель (блок-схему), следует воспользоваться командой **Print** (Печать) из меню **File** (Файл) окна модели.

Блок-схему можно вставить в документ любого текстового редактора, например **Word**. Для этого следует сначала вызвать команду **Copy Model** (Копировать S-модель) из меню **Edit** (Правка) окна модели, а затем перейти в окно текстового редактора и нажать комбинацию клавиш **[Shift+Ins]**. Таким способом были получены приведенные в данном пособии схемы моделей.

### 3 Подготовка данных при создании моделей содержащих электрические машины

#### 3.1 Подготовка данных для моделей машин постоянного тока

В разделе 1.4.1 описан блок машины постоянного тока **DC Machine**. Для применения этого блока в модели необходимо ввести в него параметры, соответствующие конкретному экземпляру двигателя и генератора. Обычно, при выборе электрической машины ее параметры берут из каталога. Но, данные, содержащиеся в каталогах, не в полной мере соответствуют тем, которые необходимо ввести в окно параметров блока. Рассмотрим на числовом примере, как, используя каталожные данные конкретной машины постоянного тока получить требуемые величины настроек блока.

##### Исходные данные:

Пусть задана машина постоянного тока параллельного возбуждения типа ПН-45 со следующими каталожными данными:

номинальное напряжение  $U_H = 220$  В;

номинальная мощность -  $P_H = 6,5$  кВт;

номинальный ток якоря -  $I_{\text{я}} = 35$  А;

номинальная скорость вращения –  $n_H = 2200$  об/мин;

сопротивления рабочей температуре:

обмотки якоря при -  $R_{\text{я}} = 0,2305$  Ом;

обмотки возбуждения -  $R_{\text{ОВ}} = 298$  Ом;

момент инерции -  $J = 0,28$  кг·м<sup>2</sup>;

электромагнитная постоянная обмотки возбуждения -  $T_E = 0,2$  с.

Если в исходных данных к расчету не содержится значение электромагнитной постоянной времени обмотки возбуждения, то ее можно определить по графику на рисунке 3.1.

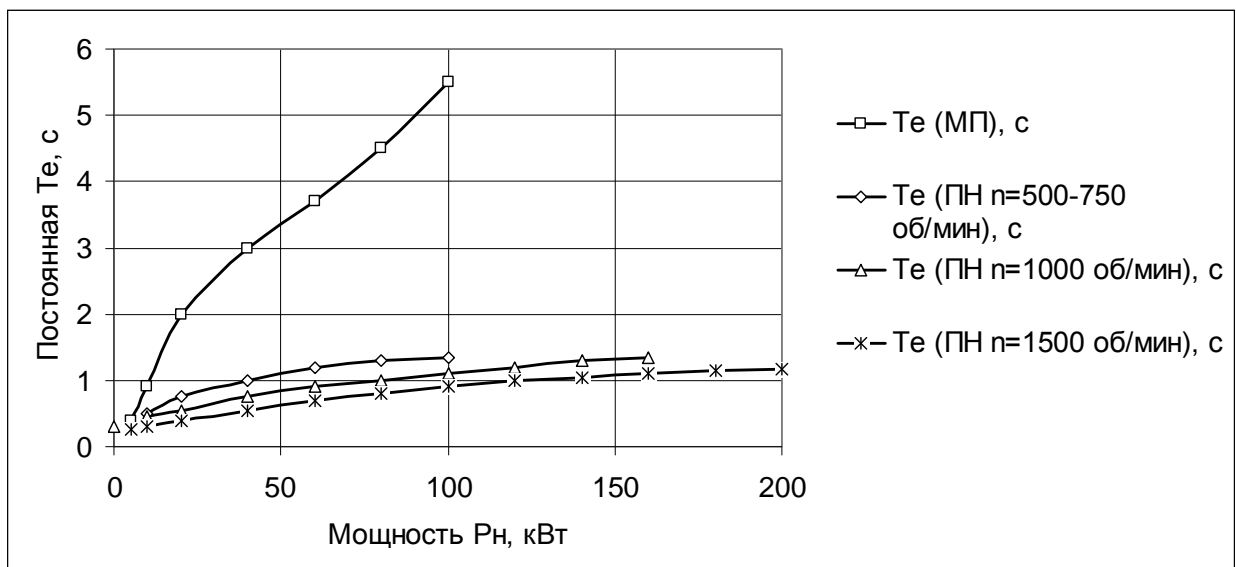


Рисунок 3.1 – Постоянная времени параллельной обмотки возбуждения для машин типа МП и общего применения типа ПН.

Порядок расчета параметров модели DC Machine

1. Определяем индуктивность обмотки возбуждения  $L_{OB}$ .

$$L_{OB} = T_E \cdot R_B = 0,2 \cdot 298 = 59,6 \text{ Гн.} \quad (14)$$

2. Определяем индуктивность обмотки якоря  $L_J$ .

Известно [5], что постоянную времени обмотки якоря в машинах постоянного тока можно ориентировочно определить по соотношению:

$$T_J = 0,05 \cdot T_{OB}. \quad (15)$$

Тогда,

$$L_J = 0,05 \cdot T_E \cdot R_J = 0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,2305 = 0,023 \text{ Гн.} \quad (16)$$

3. Находим номинальное значение ЭДС якоря машины

$$E_H = U_H - I_J \cdot R_J = 220 - 35 \cdot 0,2305 = 211,93 \text{ В.} \quad (17)$$

4. Номинальный ток обмотки возбуждения

$$I_{BH} = \frac{U_H}{R_{OB}} = \frac{220}{298} = 0,738 \text{ А.} \quad (18)$$

5. Определяем индуктивность  $L_f$  - один из параметров модели

$$L_f = \frac{E}{I_{BH} \cdot \omega_H} = \frac{211,93 \cdot 60}{0,738 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 2200} = 1,247 \text{ Гн,} \quad (19)$$

где  $\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60}$  - номинальная угловая скорость вращения вала машины.

6. Определяем номинальный момент на валу машины

$$M_H = 9,565 \frac{P_H}{n_H} = 9,565 \frac{6500}{2200} = 28,26 \text{ Н·м.} \quad (20)$$

7. Определяем электромагнитный момент на валу машины

$$M_E = 9,548 \frac{I_J \cdot E_H}{n_H} = 9,548 \frac{35 \cdot 211,93}{2200} = 32,192 \text{ Н·м.} \quad (21)$$

8. Находим потери момента  $\Delta M$

$$\Delta M = M_H - M_E = 32,192 - 28,26 = 3,932 \text{ Н·м.} \quad (22)$$

Согласно модели (рисунок 1.23) потери момента определяются постоянной составляющей сухого трения  $T_f$  и потерями на вязкое трение  $B_m \cdot \omega$ .

То есть потери крутящего момента можно представить в виде

$$\Delta M = T_f + B_m \cdot \omega. \quad (23)$$

Составляющая  $T_f$ , обусловлена в машинах постоянного тока в основном трением щеток о коллектор. Она равна

$$T_f = \mu \cdot S_{\text{щ}} \cdot P_{\text{щ}} = \mu \frac{I_{\text{я}}}{\sigma} P_{\text{щ}} = 0,25 \frac{35}{10 \cdot 10^4} 2 \cdot 10^4 = 1,75 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (24)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения щеток о коллектор ( $\mu = 0,2 - 0,2$ );

$S_{\text{щ}}$  - площадь щеток,  $\text{м}^2$ ;

$P_{\text{щ}}$  - давление щеток на коллектор  $P_{\text{щ}} = (1,5 - 2,5) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ ;

$\sigma$  - номинальная плотность тока щеток  $\sigma$ , принимаемая из таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Номинальная плотность тока щеток электрических машин

Тип щеток	Угольно-графитовые	Графитные	Электрографитированные	Медно-графитные	Бронзо-графитные
Ном. плотность тока, $\text{А/см}^2$	6 - 8	7 - 11	9 - 12	15 - 20	20

9. Находим коэффициент  $B_f$

$$B_m = \frac{\Delta M - T_f}{2\pi \cdot n_H} = \frac{3,932 - 1,75}{2 \cdot 3,142 \cdot 2200} = 1,58 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}. \quad (25)$$

Таким образом, мы сформировали все необходимые данные для моделирования данной машины:

**Ra (ohms)** =  $R_{\text{я}} = 0,2305$  и **La (H)** = 0,023;

**Rf (ohms)** =  $R_{\text{об}} = 298$  Ом и **Lf (H)** = 59,6;

**Laf (H)** = 1,247;

**J (kg.m<sup>2</sup>)** = 0,28;

**Viscous friction coefficient Bm (N.m.s.)** =  $1,58 \cdot 10^{-4}$ ;

**Coulomb friction torque Tf (N.m)** = 1,75

**Initial speed (rad/s)** = 1 (По умолчанию)

Введя полученные данные в окно параметров блока **DC Machine**, мы будем иметь модель машины постоянного тока типа ПН-45 мощностью 6,5 кВт.

В дальнейшем, данную машину мы будем использовать в рассматриваемых примерах.

### 3.2 Подготовка данных при моделировании асинхронных двигателей

Как следует из описания блока **Asynchronous Machine SI Units**, модель асинхронной машины не учитывает потерь энергии в статоре, поскольку в параметрах машины отсутствует величина  $R_m$  - сопротивление потерь в магнитопроводе.

Поэтому, для моделирования достаточно данных приведенных в каталоге. Рассмотрим пример подготовки данных к моделированию асинхронного электродвигателя с фазным ротором типа 4AK160S4У3.

Исходные данные:

номинальное напряжение обмотки  $U_H = 220 \text{ В}$ ;

номинальная мощность двигателя -  $P_H = 11,0$  кВт;

номинальная частота тока в обмотке статора  $f_H = 50$  Гц;

номинальный коэффициент мощности  $\cos \varphi_n = 0.86$ ;

активное сопротивление фазы обмотки статора, отн. ед.  $R1 = 0,038$ ;

индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора, отн. ед.,  $X1 = 0,068$ ;

приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора, отн. ед.,  $R2' = 0,051$ ;

приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора, отн. ед.,  $X2' = 0,086$ ;

индуктивное сопротивление цепи намагничивания, отн. ед.,  $X\mu = 2,8$ ;

момент инерции ротора  $J = 0,1$  кг·м<sup>2</sup>;

коэффициент сопротивления (принимается равным нулю);

число пар полюсов  $p() = 4$ .

Если, исходные данные машины заданы в относительных единицах, то для моделирования можно использовать блок **Asynchronous Machine pu Units**. Тогда пересчет параметров машины из относительных единиц в абсолютные значения не нужен. Величины индуктивностей рассеяния фазы статора, ротора и цепи намагничивания, в относительных единицах равны значениям их индуктивных сопротивлений.

В отечественных справочниках параметры асинхронных двигателей обычно заданы в относительных единицах, поэтому сразу имеем:

- номинальная полная мощность потребляемая двигателем в ВА, номинальное линейное напряжение в В и частота в Гц равны  **$P_n(VA) = 3 \cdot 3667$ ,  $V_n(V_{rms}) = 220$ ,  $f_n(Hz) = 50$** ;

- сопротивление фазы обмотки статора и ее индуктивность рассеяния в *pu* будут  **$R_s = 0,038$ ,  $L_{ls} = 0,068$** ;

- приведенные сопротивления фазы обмотки ротора и индуктивность рассеяния в *pu* составят  **$R_r' = 0,051$ ,  $L_{lr}' = 0,086$** ;

- взаимная индуктивность обмоток статора и ротора в *pu*  **$L_m = 2,8$** ;

- приведенный момент инерции ротора в кг·м<sup>2</sup>, коэффициент сопротивления в Н·м·с и число пар полюсов -  **$J(kg \cdot m^2) = 0,1$ ,  $F(N \cdot m \cdot s) = 0$ ,  $p() = 4$** ;

**Initial conditions (read the details in the description above)** – начальные условия (обычно принимаются по умолчанию [1,0 0,0,0 0,0,0]).

Но, для создания моделей виртуальных лабораторных стендов предпочтительней использования единиц системы СИ. В данном случае, работа моделей выглядит более «реальной» и нет необходимости включать в схему стенда блоки для пересчета относительных единиц в реальные. В состав библиотеки **Machines** входит блок **Asynchronous Machine SI Units**, описанный выше, который позволяет использовать в модели параметры двигателя, выраженные в системе СИ. Для пересчета относительных параметров выраженных в *pu*, воспользуемся вышеприведенными соотношениями (3) – (5).

Базовое значение сопротивления определим таким образом:

$$R_{base} = 1 pu = \frac{U_{1\phi}}{I_{ном.\phi}} = \frac{220}{19,38} = 11,352 \text{ Ом}, \quad (26)$$

где  $I_{ном.\phi} = \frac{P_{ном}}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_n} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,86} = 19,38 \text{ А}$  – номинальный ток фазы

статора;

$U_{1.\phi} = 220 \text{ В}$  – номинальное напряжение обмотки статора.

Тогда:

- активное сопротивление обмотки статора составит

$$R_s(Ohm) = R_s(pu) \cdot R_{base} = 0,038 \cdot 11,352 = 0,431 \text{ Ом}; \quad (27)$$

- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_{1s}(Ohm) = X_{1s}(pu) \cdot R_{base} = 0,068 \cdot 11,352 = 0,772 \text{ Ом}; \quad (28)$$

- индуктивность рассеяния обмотки статора

$$L_{1s}(H) = \frac{X_{1s}}{2\pi f} = \frac{0,772}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,46 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \quad (29)$$

- приведенное активное сопротивление обмотки ротора будет

$$R_{r'}(Ohm) = R_{r'}(pu) \cdot R_{base} = 0,051 \cdot 11,352 = 0,579 \text{ Ом}; \quad (30)$$

- приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$X_{1r'}(Ohm) = X_{1r'}(pu) \cdot R_{base} = 0,086 \cdot 11,352 = 0,976 \text{ Ом}; \quad (31)$$

- приведенная индуктивность рассеяния обмотки ротора

$$L_{1r'}(H) = \frac{X_{1r'}}{2\pi f} = \frac{0,976}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \quad (32)$$

- индуктивное сопротивление цепи намагничивания

$$X_m(Ohm) = X_m(pu) \cdot R_{base} = 2,8 \cdot 11,352 = 31,786 \text{ Ом}; \quad (33)$$

- индуктивность цепи намагничивания (взаимная индуктивность обмоток статора и ротора)

$$L_m(H) = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{31,786}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,101 \text{ Гн}. \quad (34)$$

Таким образом, параметры блока **Asynchronous Machine SI Units** будут таковы:

**$P_n(VA)=3*3667$ ,  $V_n(V_{rms})=220$ ,  $f_n(Hz)=50$ ;**

**$R_s(Ohm)=0,431$ ,  $L_{1s}(H)=2,46 \cdot 10^{-3}$ ;**

**$R_{r'}(Ohm)=0,579$ ,  $L_{1r'}(H)=3,15 \cdot 10^{-3}$ ;**

**$L_m(H)=0,101$ ;**

**$J(kg.m^2)=0,1$ ,  $F(N.m.s)=0$ ,  $p()=4$ ;**

**Initial conditions (read the details in the description above)** – начальные условия (принимаются по умолчанию).

В дальнейших моделях мы будем использовать данный двигатель как в варианте с фазным ротором, так и с короткозамкнутым ротором.

Синхронная скорость данного двигателя равна 1500 об/мин, но для некоторых моделей мы увеличим ее до 3000 об/мин, установив параметр  **$p()=2$** .

## 4 Модели для исследования характеристик машин постоянного тока

### 4.1 Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Механическая характеристика – это зависимость скорости вращения вала двигателя от момента сил сопротивления  $n = f(M_H)$

Модель для исследования механических характеристик двигателя постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения выполнена на основе данных машины ПН-45, параметры которой подготовлены нами к моделированию ранее. Общий вид модели показан на рисунке 4.1.

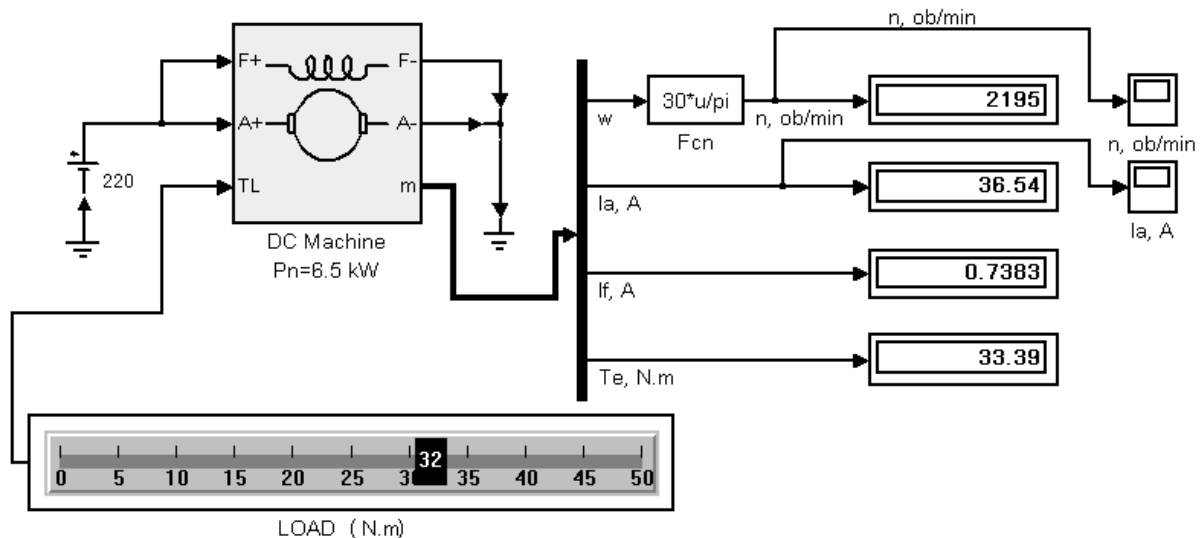


Рисунок 4.1 – Модель для исследования механических характеристик двигателя постоянного тока

В состав модели входят:

Блок **DC Machine**. Объект исследования;

Блок источника постоянного тока **DC Voltage Source** (его имя скрыто). Напряжение источника показано рядом с изображением блока;

Блок **Horizontal Slider** из библиотеки **Dials & Gauges/Sliders**. Блок предназначен для задания величины момента нагрузки;

Блок **Demux** из библиотеки **Simulink/Signal Routing**. Блок распределяет вектор сформированных в модели машины электрических величин на отдельные линии;

Блок **Fcn** из библиотеки **Simulink/User-Defined Functions** осуществляющий пересчет угловой скорости вращения вала машины в скорость вращения, измеряемую в об/мин;

Четыре блока **Display** из библиотеки **Simulink/Sinks**. Это цифровые шкалы, они предназначены для индикации выходных величин модели;

Два блока **Scope** из библиотеки **Simulink/Sinks**. Это блоки осциллографов. Они включены, чтобы показать вид переходного процесса при включении машины.

Поскольку момент инерции машины невелик и пуск осуществляется прямым включением, то переходный процесс оказывается коротким. Ток при пуске достигает весьма больших значений ( $I_{\text{я max}} = 954,5 \text{ A}$ ). Одним из преимуществ модели, перед реальным двигателем является возможность исследовать его в режимах не допустимых или не достижимых в реальных условиях. Безусловно, реальная машина при таком пуске может выйти из строя, да и источник питания должен быть рассчитан на пусковой ток. Но «виртуальная машина» остается целой, и наглядно может продемонстрировать студенту, что может быть, если не принять мер по снижению пускового тока.

Осциллограммы переходного процесса разгона двигателя и тока якоря показаны на рисунке 4.2,а и 4.2,б, соответственно.

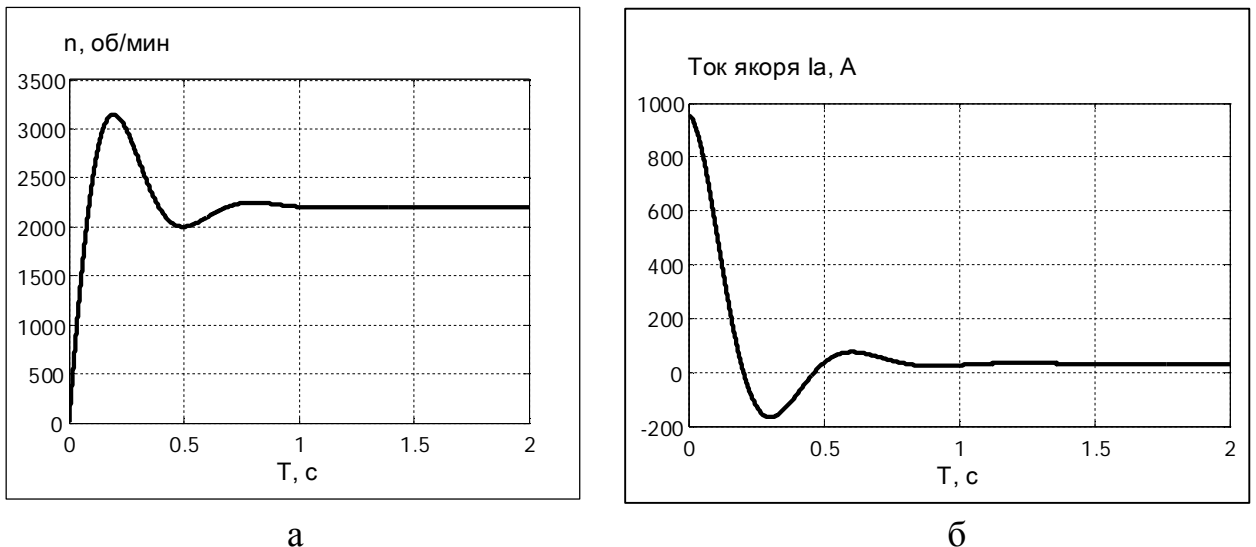


Рисунок 4.2 – Переходный процесс разгона двигателя ПН-45 (а), ток якоря при прямом включении (б)

При длительном моделировании во избежания переполнения памяти компьютера рекомендуется отключать осциллографы. Для отключения их можно не удалять из модели, а, войдя в меню **Parameters** блока **Scope** установить галочку в окошке **floating scope** (см. рисунок 4.3).

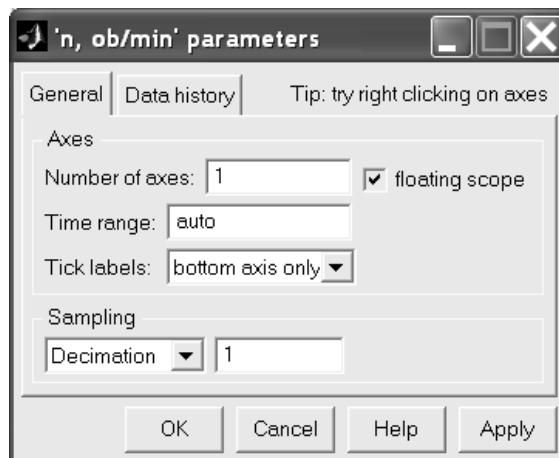


Рисунок 4.3 – Отключение блоков *Scope*

В результате блоки будут отключены, но в любой момент их можно



включить снова, сняв упомянутую галочку.

Вид модели показан на рисунке 4.4.

В рассматриваемой модели, задание момента нагрузки для наглядности осуществляется с помощью линейного ползункового регулятора (LOAD). Это позволяет визуально приблизить модель к лабораторному стенду. Для дальнейшего «приближения» модели к реальному стенду вместо блоков дисплеев можно ввести стрелочные приборы, как показано на рисунке 4.5.

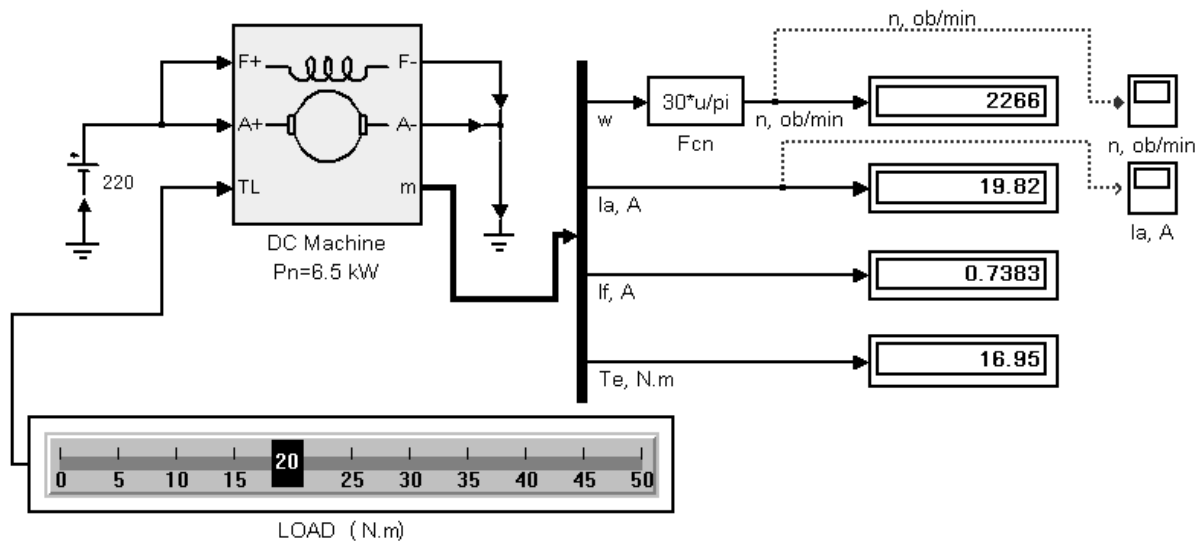


Рисунок 4.4 – Модель с отключенными осциллографами

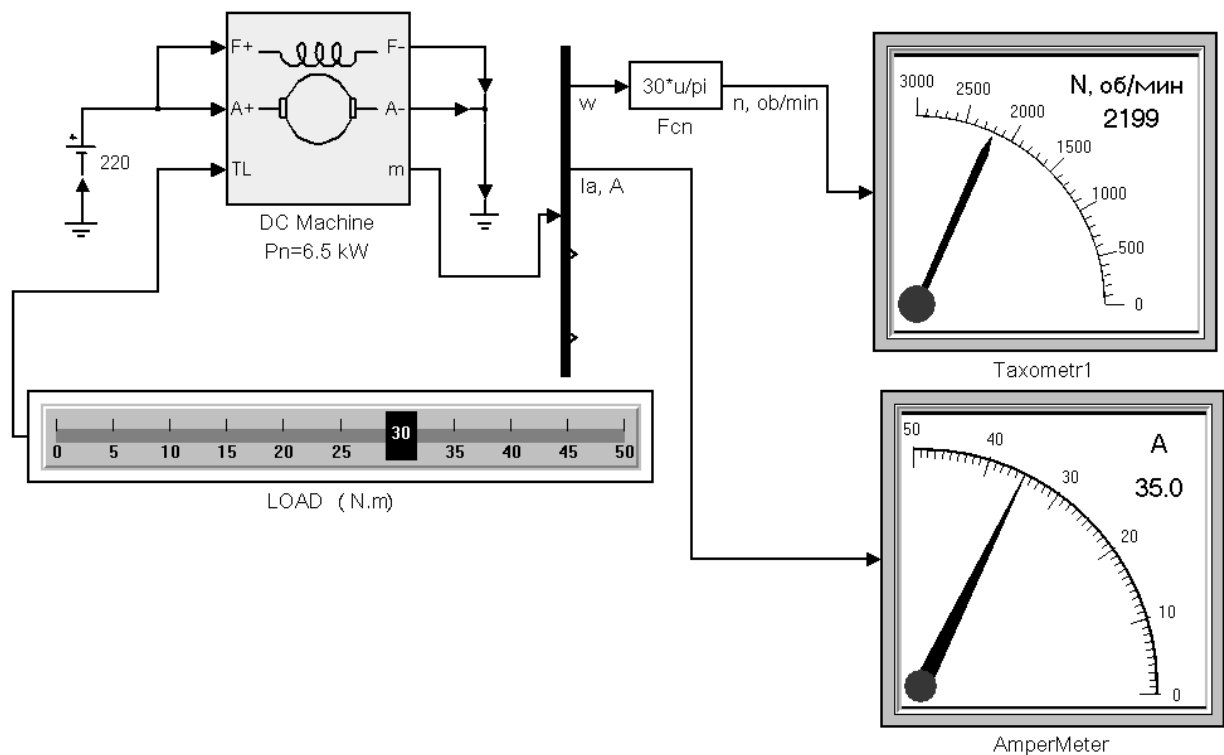


Рисунок 4.5 – Модель с виртуальными стрелочными приборами

Для наглядности в модель можно вводить различные кнопки, переключатели, световые и звуковые индикаторы, цифровые и линейные шкалы, и многие другие органы управления. Для разработки технических интерфейсов

в составе пакета **Simulink** имеются обширные возможности представленные специальным пакетом расширения (библиотекой) **Dials & Gauges**. Состав данной библиотеки дан в Приложении А.

Разработка таких виртуальных лабораторных стендов, не требующих от студентов знаний программирования, но, тем не менее, имеющие вид максимально приближенный к реальным лабораторным установкам может являться интересной темой для курсовых и дипломных работ.

Результаты исследования механической характеристики двигателя и тока якоря показаны на рисунках 4.6 и 4.7.

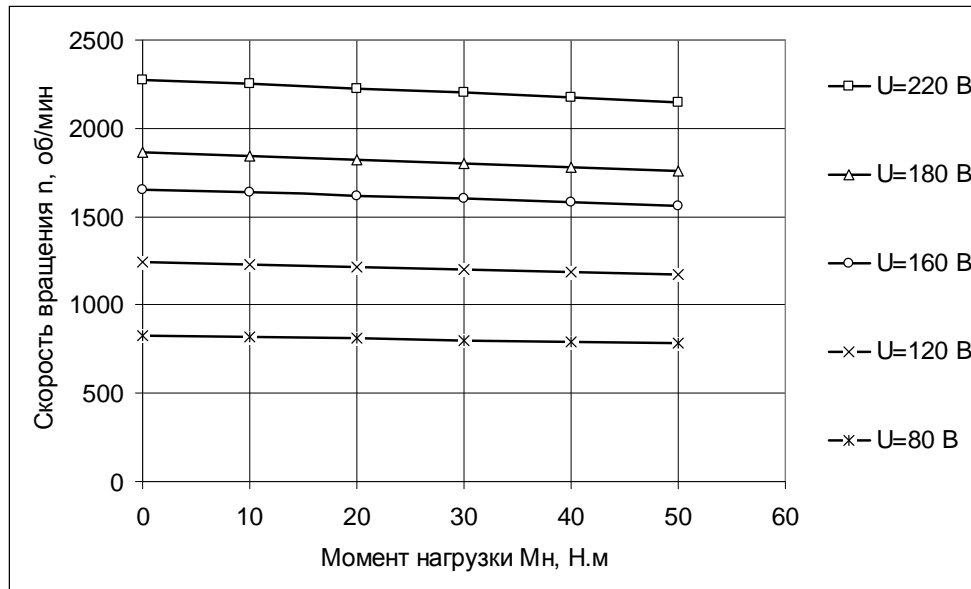


Рисунок 4.6 – Механическая характеристика двигателя ПН-45 при различных напряжениях питания

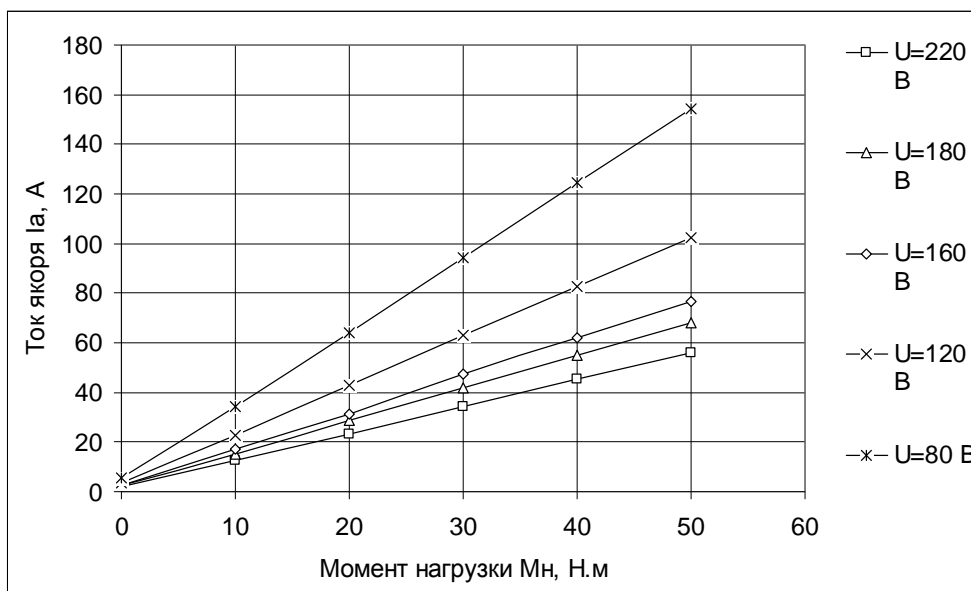


Рисунок 4.7 – Зависимость тока якоря от нагрузки двигателя ПН-45 при различных напряжениях питания

## 4.2 Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

В качестве объекта исследования выберем двигатель постоянного тока типа МП-32 с последовательной обмоткой возбуждения. Его параметры таковы:

номинальное напряжение  $U_H = 220$  В;

номинальная мощность двигателя -  $P_H = 9,0$  кВт;

номинальный ток якоря -  $I_A = 52$  А;

номинальная скорость вращения –  $n_H = 750$  об/мин; ( $n_{MAX} = 2600$  об/мин);

сопротивления рабочей температуре:

обмотки якоря при -  $R_A = 0,348$  Ом;

обмотки возбуждения -  $R_{OB} = 0,143$  Ом;

момент инерции -  $J = 1,22$  кг·м<sup>2</sup>;

электромагнитная постоянная обмотки возбуждения -  $T_E = 1$  с.

Подготовив данные к моделированию, в соответствии с выражениями (14) – (24), имеем параметры модели:

**Ra (ohms) =  $R_A = 0,348$  и La (H) = 0,0174;**

**Rf (ohms) =  $R_{OB} = 0,143$  Ом и Lf (H) = 0,143;**

**Laf (H) = 0,0174;**

**J (kg.m<sup>2</sup>) = 1,22;**

**Viscous friction coefficient Bm (N.m.s.) = 0,14;**

**Coulomb friction torque Tf (N.m) = 2,7**

**Initial speed (rad/s) = 1** (По умолчанию)

Схема модели показана на рисунке 4.8.

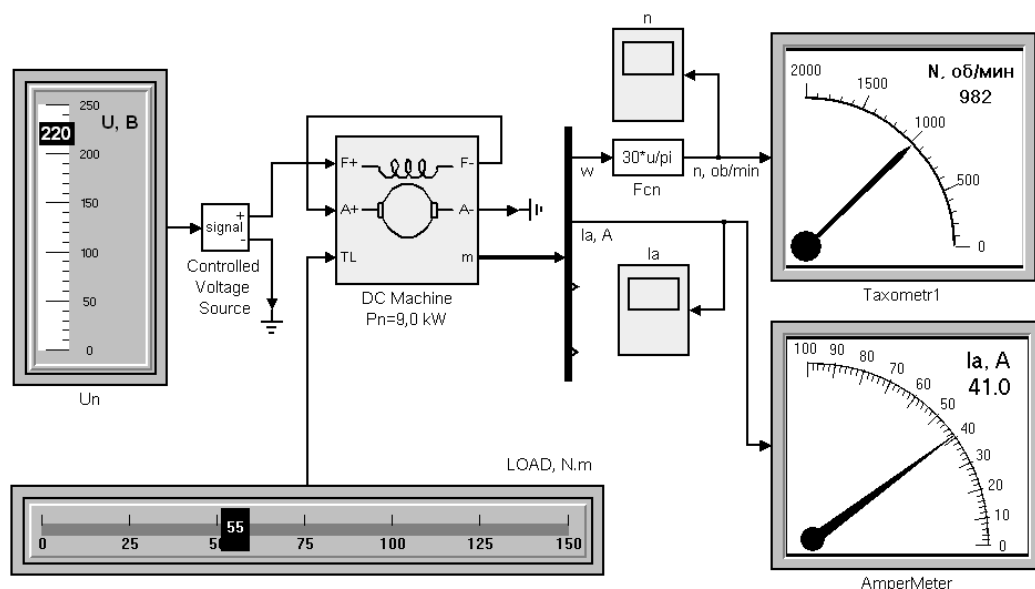


Рисунок 4.8 – Модель для исследования механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Введя полученные данные в окно параметров блока **DC Machine**, мы будем иметь модель машины постоянного тока типа МП-32 последовательного возбуждения мощностью 9,0 кВт. Осциллограммы характеризующие пуск двигателя приведены на рисунке 4.9.

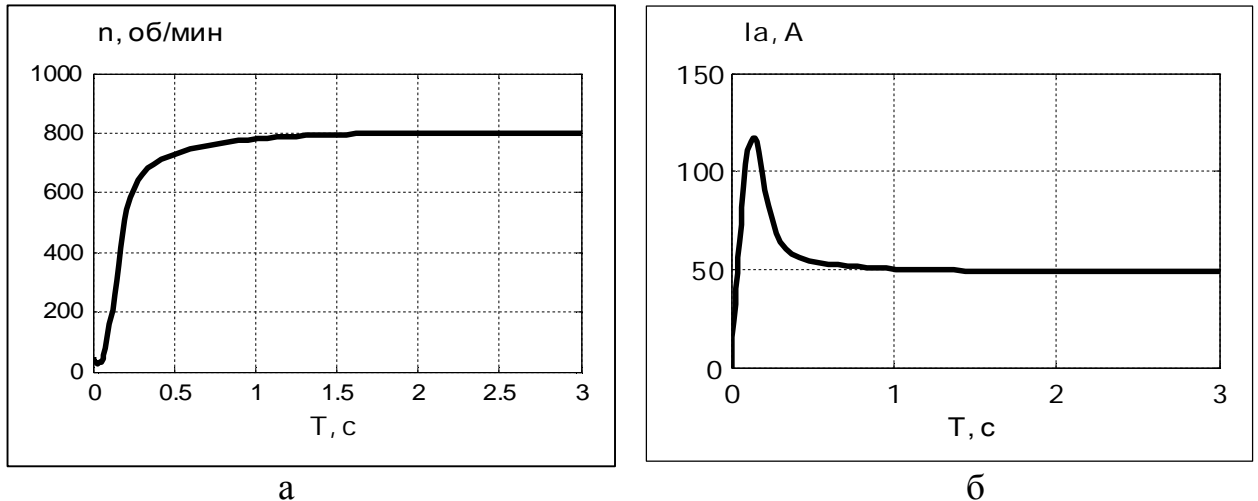


Рисунок 4.9 – Осциллограммы разгона (а) и тока якоря (б) двигателя последовательного возбуждения типа МП-32

Видно, что данный тип двигателя имеет значительно меньший относительный бросок пускового тока, чем двигатель параллельного возбуждения.

Модель позволяет изменять как напряжение питания, так и нагрузочный момент на валу двигателя. Ниже, на рисунке 4.10, приведены снятые на данном виртуальном лабораторном стенде механические характеристики машины при различных напряжениях питания якорной цепи.

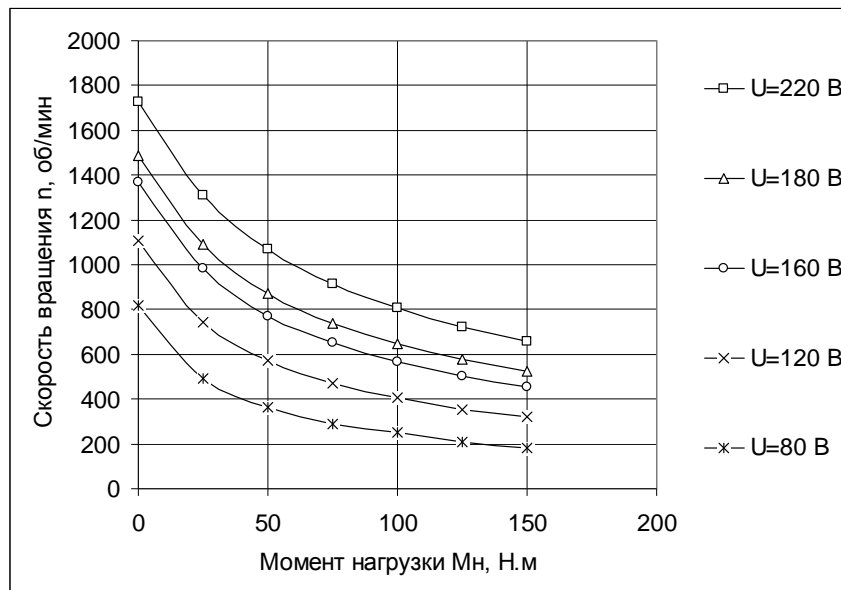


Рисунок 4.10 – Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения типа МП-32

Приведенная на рисунке 4.11 зависимость тока якоря двигателя от нагрузки при различных напряжениях питания позволяет наглядно видеть пре-

имущества двигателя последовательного возбуждения над машиной параллельного возбуждения в части тяговых свойств.

Как видим, даже двигатель большей мощности (МП-32) при одинаковом напряжении и нагрузке потребляет меньший ток, чем двигатель параллельного возбуждения.



Рисунок 4.11 – Зависимость тока якоря от нагрузки двигателя МП-32 при различных напряжениях питания

#### 4.3 Исследование характеристик генератора постоянного тока с независимым возбуждением

Блок машины постоянного тока рассмотренный ранее неудобен для моделирования генератора постоянного тока. В модели генератора входными величинами должны быть: скорость вращения вала генератора и величина тока возбуждения. В стандартном блоке **DC Machine** входной величиной может быть только вращающий момент, приложенный к валу генератора, который должен в модели уравниваться электромагнитным тормозным моментом, возникающим в генераторе, вследствие протекания тока якоря. Это вынуждает вводить в модель кроме непосредственно самого генератора и его первичный привод, что неоправданно усложняет схему.

Для того, чтобы решить указанную проблему изменим внутреннюю схему блока **DC Machine**. Выведем линию связи  $w$  наружу, и будем считать скорость вращения вала заданной извне.

Большим достоинством системы MATLAB является ее открытость. Данный пример показывает, что практически любой блок пользователь системы может изменить, приспособив его для своих нужд наилучшим образом. Блоки, выполненные в виде субмоделей, каковым является рассматриваемый блок, наиболее легко подвергаются трансформации. Для этого необходимо лишь навести курсор на изображение блока, и нажать правую клавишу мыши. В появившемся контекстном меню (рисунок 4.12) следует выбрать пункт **Look under mask** (просмотр маскированного объекта). Появившаяся внут-

ренняя схема блока может быть изменена, как и любая модель. В нее можно вносить дополнительные блоки, входы, выходы, добавлять или убирать соединительные линии.

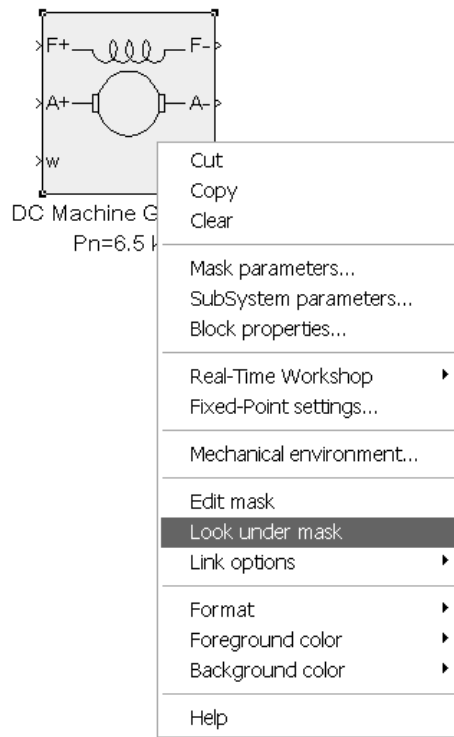


Рисунок 4.12 – Контекстное меню блока

Внесем необходимые изменения. Новый блок назовем **DC Machine\_G**. Результат, изображен на рисунке 4.13.

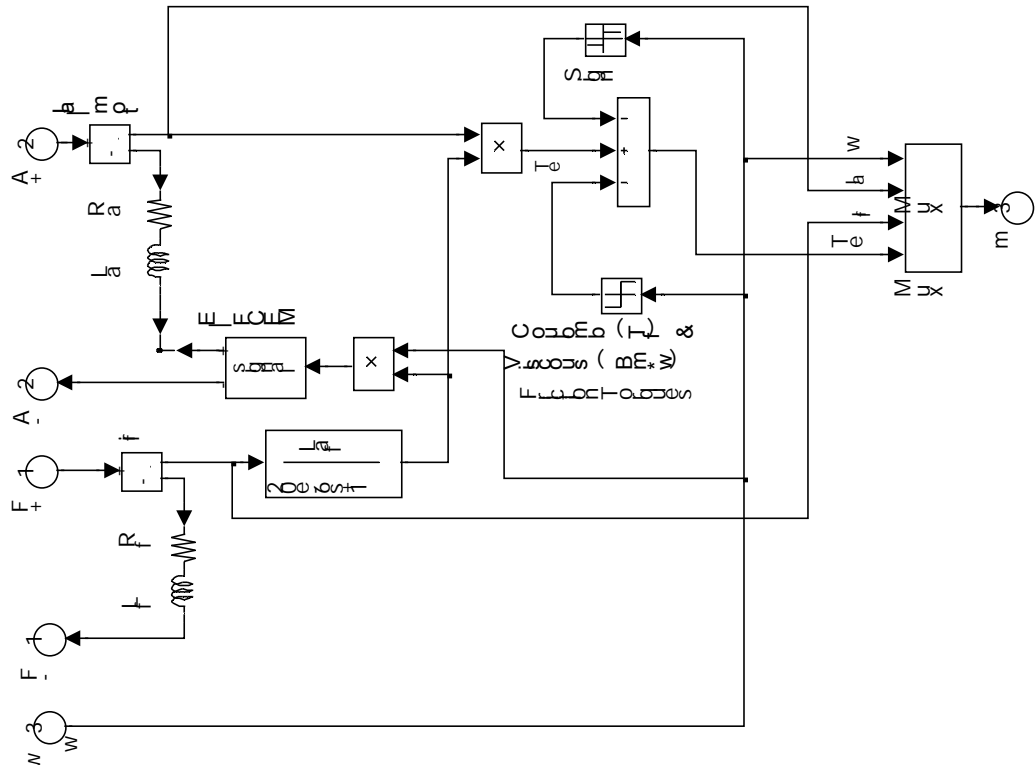


Рисунок 4.13 – Внутренняя схема блока **DC Machine\_G**

В созданном блоке, та его часть, которая моделирует электромеханическую постоянную времени машины, отсутствует. Поэтому динамика разгона генератора, при его включении в данной модели, не может быть исследована. Но, остается возможность изучать влияние электрических постоянных времени обмоток якоря и возбуждения на переходные процессы в машине, например при резком возрастании нагрузки или скачке тока возбуждения.

Для моделирования работы генератора в динамике, с учетом инерционности его якоря необходимо рассматривать его совместно с первичным двигателем, учитывая при этом их суммарный момент инерции.

Величина момента инерции **J** указанная в окне настроек блока не влияет на процесс моделирования, и может быть любой или отсутствовать. Но для упорядочения модели это поле окна настроек блока можно удалить. Для этого необходимо в контекстном меню блока (рисунок 4.12) выбрать пункт **Edit mask** (редактировать маскированный объект). В появившемся окне (рисунок 4.14) следует выбрать закладку **Parameters** (параметры).

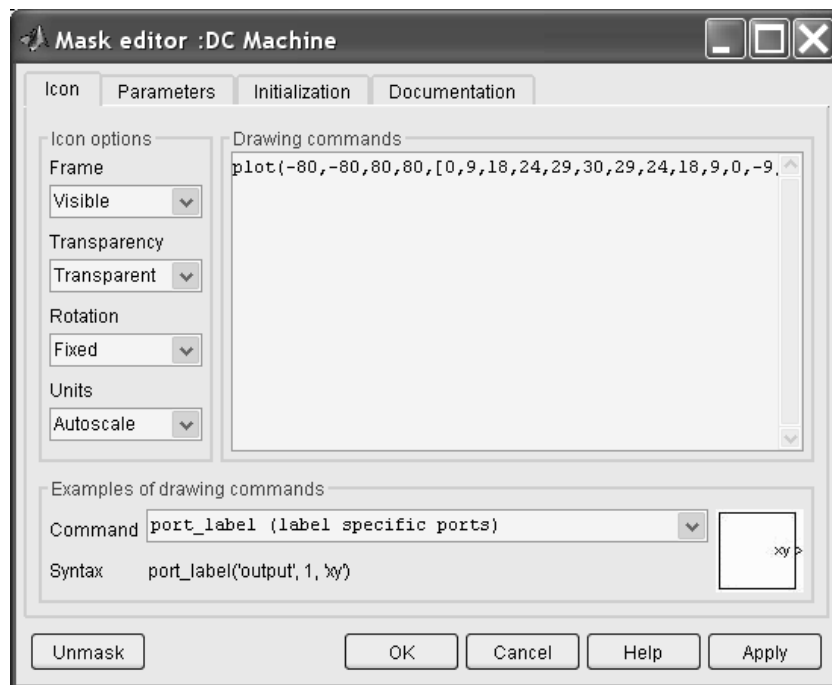


Рисунок 4.14 – Окно **Icon/Mask editor** (редактор маскированных объектов) блока **DC Machine G**

Выделить пункт меню **Total inertia (kg.m<sup>2</sup>)**, см. рисунок 4.15, и нажав на кнопку **Delete** удалить пункт. В результате, окно настроек блока **DC Machine\_G** станет таким, какое показано на рисунке 4.16. В нем будет отсутствовать поле **Total inertia (kg.m<sup>2</sup>)**.

Схема модели представлена на рисунке 4.17. Она позволяет исследовать зависимости выходного напряжения генератора в функции тока нагрузки и тока возбуждения при различных скоростях вращения его вала.

Скорость вращения вала генератора задается в модели движковым регулятором **n**, а, напряжение возбуждения – регулятором **Uf**. Блок **Fcn1** преобразует скорость вращения вала в соответствующее значение угловой частоты, которая подается на вход блока модели генератора.

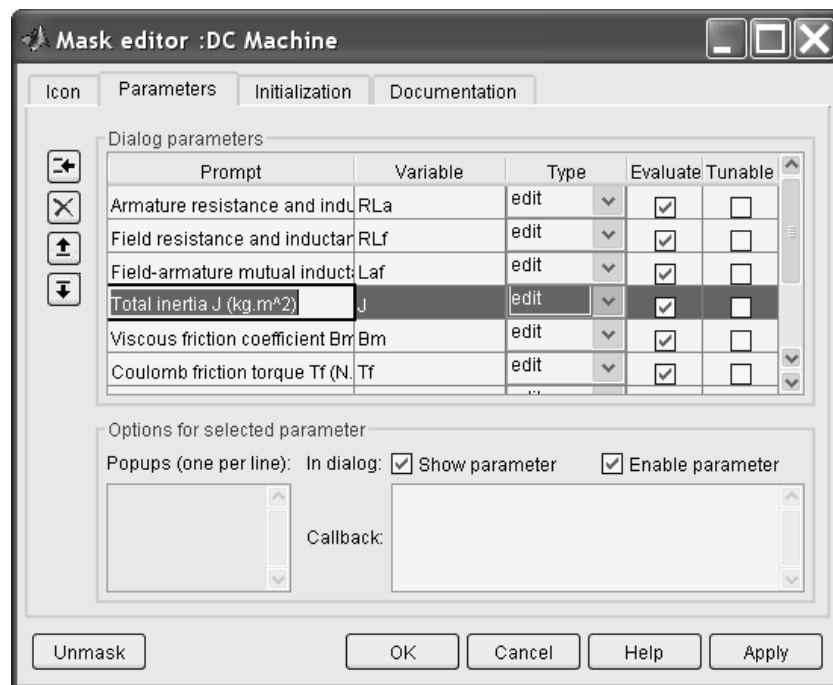


Рисунок 4.15 - Окно **Parameters/Mask editor** (редактор маскированных объектов) блока **DC Machine\_G**

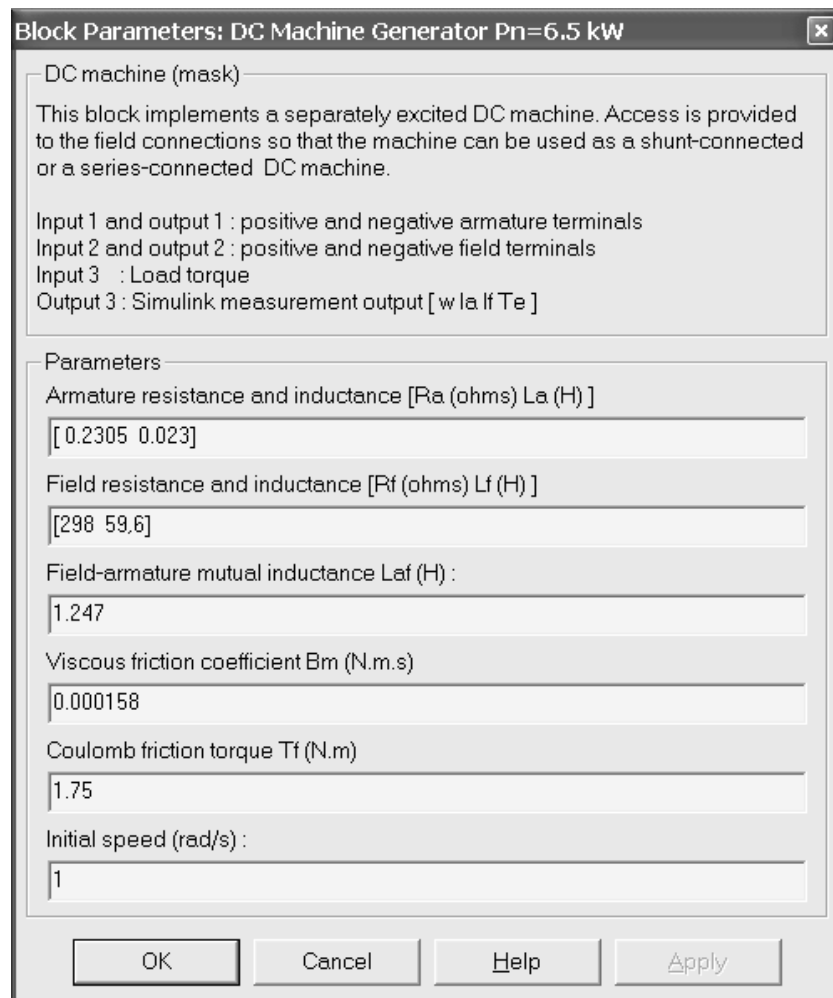


Рисунок 4.16 – Окно настроек блока **DC Machine\_G**



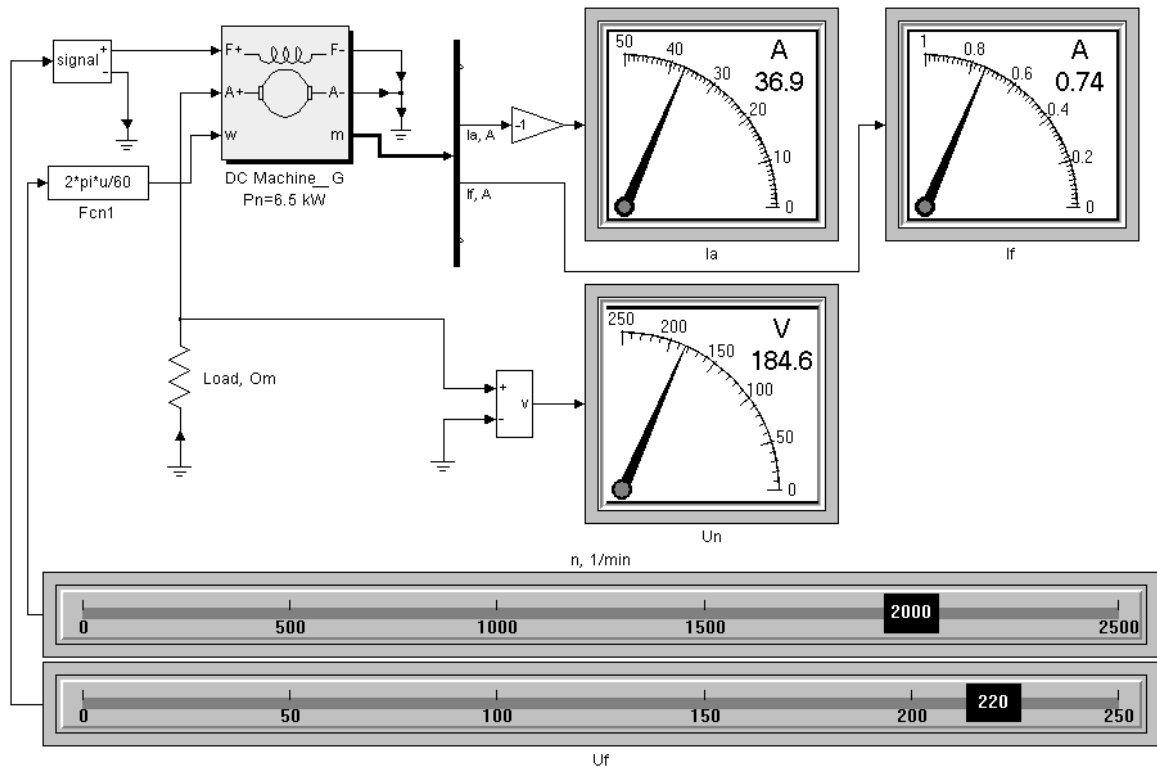


Рисунок 4.17 – Схема для исследования статических характеристик генератора постоянного тока независимого возбуждения

Поскольку ток якоря генератора при положительном значении скорости вращения отрицателен, то для его индикации перед амперметром  $I_a$ , включен инвертор.

Характеристики генератора на основе машины постоянного тока ПН-45, снятые на рассматриваемом лабораторном стенде, показаны на рисунках 4.18 и 4.19.

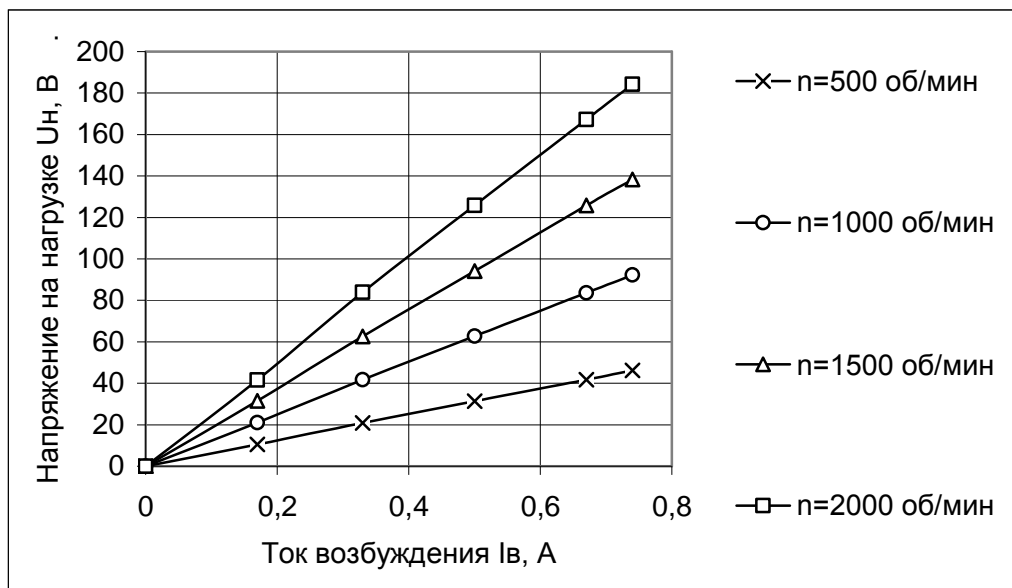


Рисунок 4.18 – Зависимость  $U_n = f(I_b)$  при  $n = \text{const}$  для модели генератора без учета кривой намагничивания

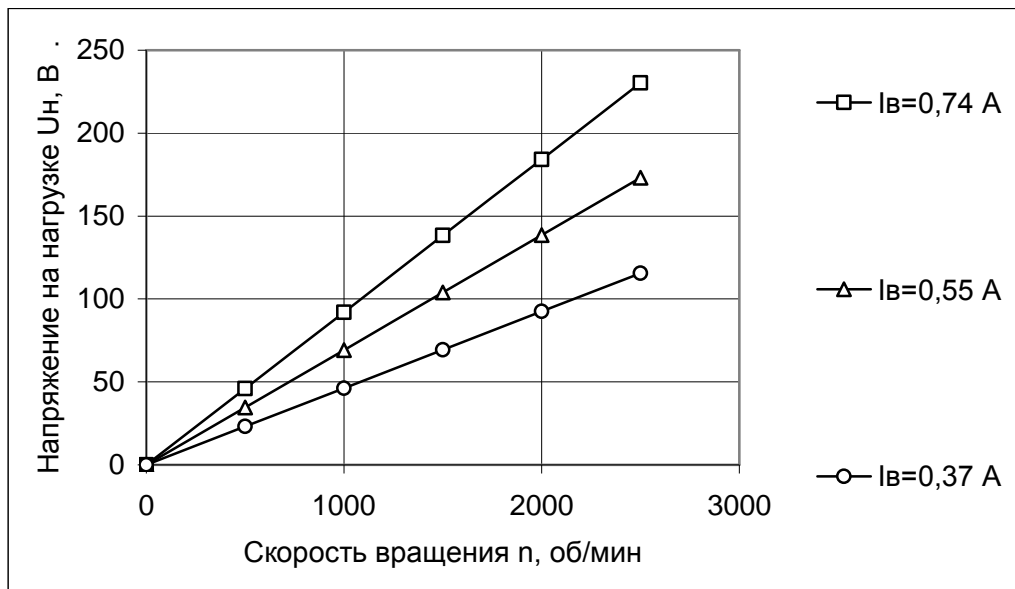


Рисунок 4.19 – Зависимость  $U_n = f(n)$  при  $I_b = \text{const}$  для модели генератора без учета кривой намагничивания

Первая зависимость – выходного напряжения генератора от тока возбуждения, снятая для нескольких фиксированных скоростей вращения якоря.

Вторая – зависимость выходного напряжения генератора от скорости вращения якоря при нескольких фиксированных токах возбуждения. Все полученные зависимости – линейные.

В реальных машинах наблюдается некоторая нелинейность данных характеристик при больших токах возбуждения, которая объясняется началом насыщения магнитной системы машины. В данной модели насыщение машины не моделируется, но его можно учесть, введя в модель, таблицу кривой намагничивания стали.

Таблицу насыщения стали удобно вводить в нормированном виде. Для каждого типа машин в каталогах существует универсальная кривая намагничивания. Она приводится в относительных единицах. За базовые значения берутся номинальное значение тока возбуждения и магнитного потока. По горизонтали откладывается относительные значения тока возбуждения, а по вертикальной оси – магнитный поток машины в относительных единицах.

Для машин типа ПН и МП параллельного возбуждения такая кривая приведена на рисунке 4.20, а для машин типа МП последовательного возбуждения на рисунке 4.21.

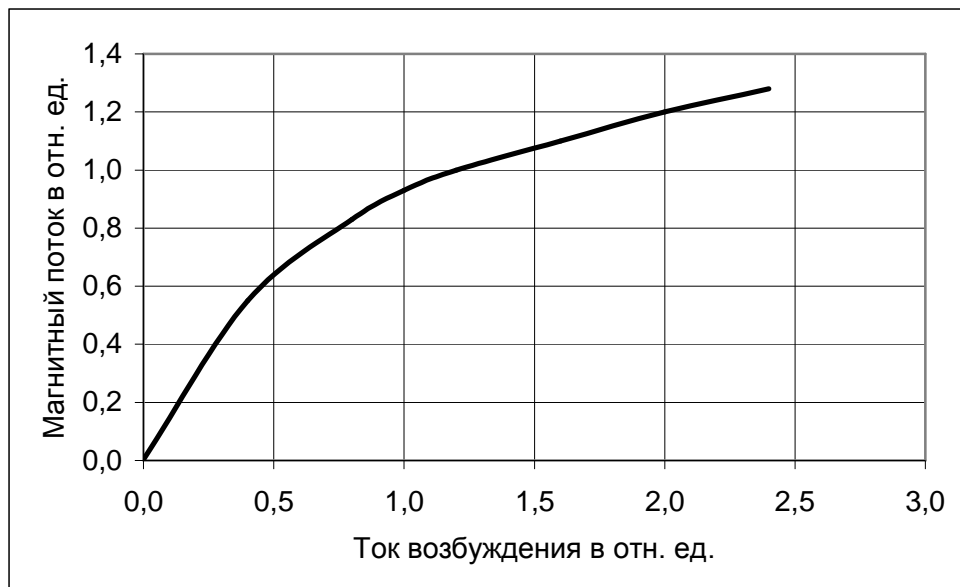
Модель генератора постоянного тока, в которой учтена кривая намагничивания, назовем **DC Machine\_G\_N**.

Для введения в модель нелинейной кривой намагничивания используем блок **Look-up Table** (рисунок 4.22). Он выполняет линейную интерполяцию входного сигнала в соответствии с задаваемой табличной функцией. Входом блока является вектор значений входного сигнала, а выходом — вектор соответствующих значений выходного сигнала. Необходимо обратить внимание на то, что блок обеспечивает линейную интерполяцию и экстраполяцию для входных сигналов, уровни которых имеют промежуточные значе-

ния (находятся между узловыми точками таблицы) или даже выходят за пределы заданного интервала изменения аргумента.



*Рисунок 4.20 – Универсальная кривая намагничивания для машин типа ПН и МП параллельного возбуждения*



*Рисунок 4.21 – Универсальная кривая намагничивания для машин типа МП последовательного возбуждения*

Предварительно, на входе блока формируется относительное значение тока возбуждения (блок **Product 1**). Номинальное значение тока возбуждения задается в блоке **Constant**. Для удобства работы с моделью в параметры блока введено не численное значение данного тока, а переменная с именем **Ifn**. Чтобы значение данной переменной можно было присваивать из окна настроек модели **DC Machine\_G\_N**, следует в окне **Parameters/Mask editor** блока **DC Machine\_G\_N** (рисунок 4.23) подключить соответствующую переменную.

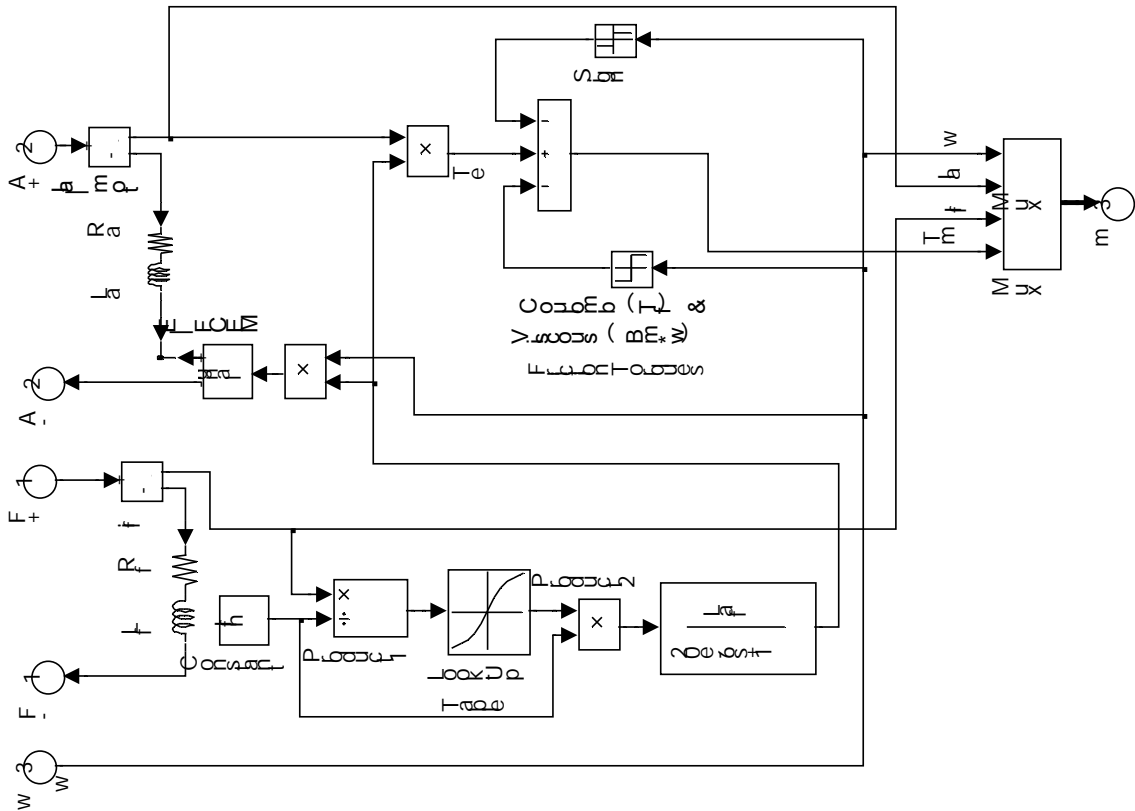


Рисунок 4.22 – Модель генератора постоянного тока с независимым возбуждением **DC Machine\_G\_N**, в которой учтена нелинейность кривой намагничивания

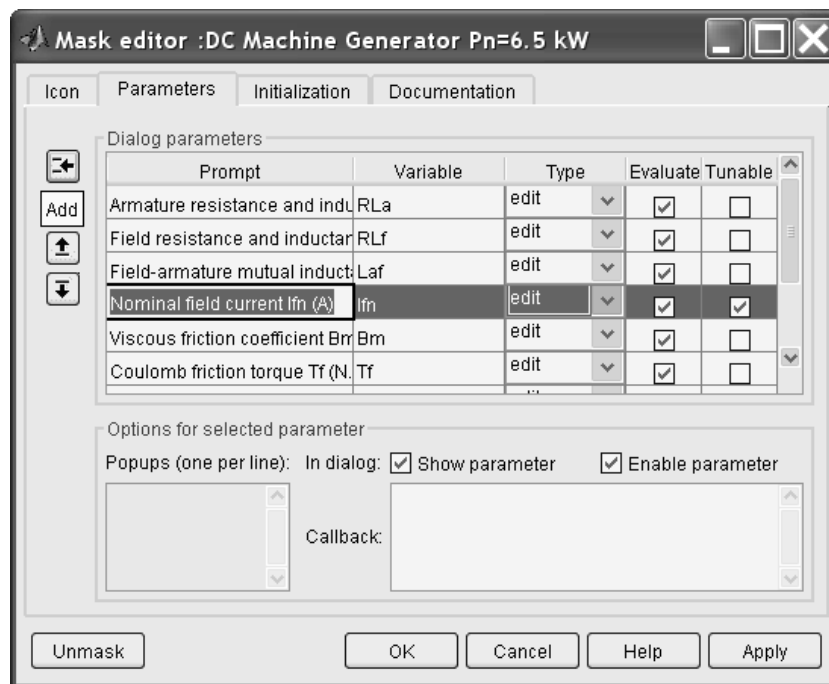


Рисунок 4.23 – **Parameters/Mask editor** блока **DC Machine\_G\_N**

Нажав кнопку **Add**, в конце списка переменных модели **Dialog parameters**, создадим новую пустую строку. Впишем в нее наименование переменной **Nominal field current Ifn (A)**. Переместим ее (нажимая кнопку со стрелками  $\updownarrow$ ) вверх в нужное по логике ввода данных место (после значения **Lf**).

В графу **Variable** впишем наименование переменной в модели **Ifn**. Сохраним полученную модель.

На рисунке 4.24 показано полученное окно настроек блока с новой строкой **Nominal field current Ifn (A)**.

Аналогично, учет кривой намагничивания можно осуществить и в модели двигателя постоянного тока.

**Block Parameters: DC Machine Generator Pn=6.5 kW**

DC machine (mask)

This block implements a separately excited DC machine. Access is provided to the field connections so that the machine can be used as a shunt-connected or a series-connected DC machine.

Input 1 and output 1 : positive and negative armature terminals  
 Input 2 and output 2 : positive and negative field terminals  
 Input 3 : w  
 Output 3 : Simulink measurement output [ w la lf Te ]

Parameters

Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H) ]  
 [ 0.2305 0.023 ]

Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H) ]  
 [ 298 59.6 ]

Field-armature mutual inductance Laf (H) :  
 1.247

Nominal field current Ifn (A)  
 0.74

Viscous friction coefficient Bm (N.m.s)  
 0.000158

Coulomb friction torque Tf (N.m)  
 1.75

Initial speed (rad/s) :  
 1

OK Cancel Help Apply

Рисунок 4.24 – Окно настроек блока **DC Machine\_G\_N**

В целом, схема для испытания генератора постоянного тока остается аналогичной изображенной на рисунке 4.17.

Характеристики генератора на основе данной модели показаны на рисунке 4.25 и 4.26.

Первая зависимость – выходного напряжения генератора от тока возбуждения, снятая для нескольких фиксированных скоростей вращения якоря. Она получилась нелинейная, что вполне объяснимо влиянием насыщения кривой намагничивания на магнитный поток.

Вторая – зависимость выходного напряжения генератора от скорости вращения якоря при нескольких фиксированных токах возбуждения осталась линейной.

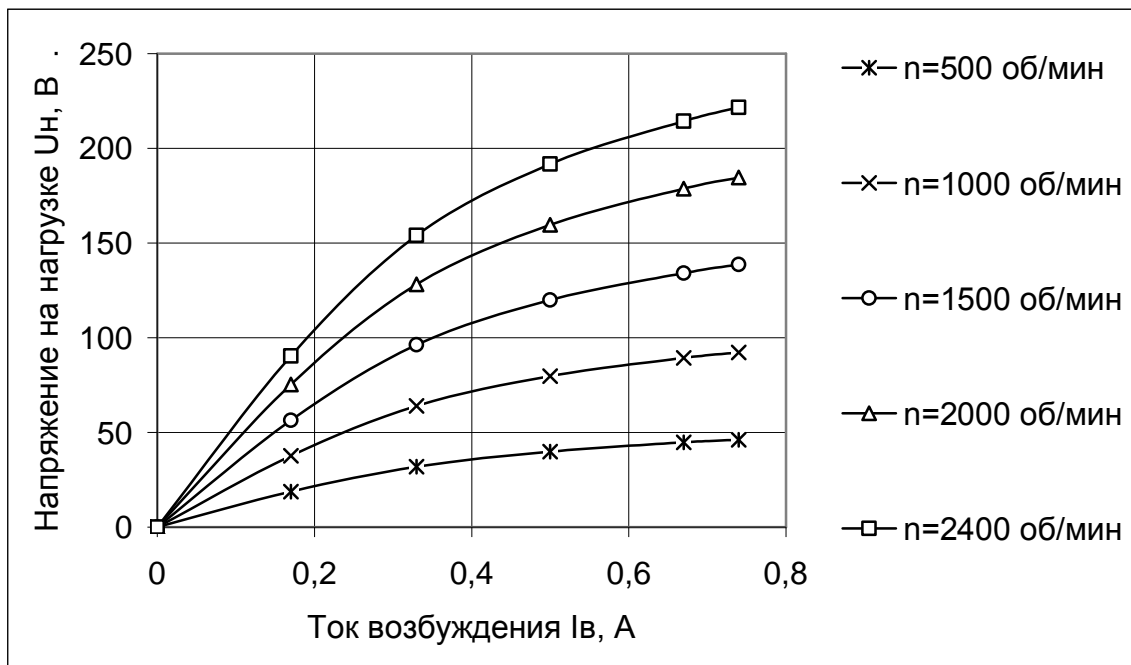


Рисунок 4.25 – Зависимость  $U_n = f(I_f)$  при  $n = \text{const}$  для модели генератора с учетом кривой намагничивания

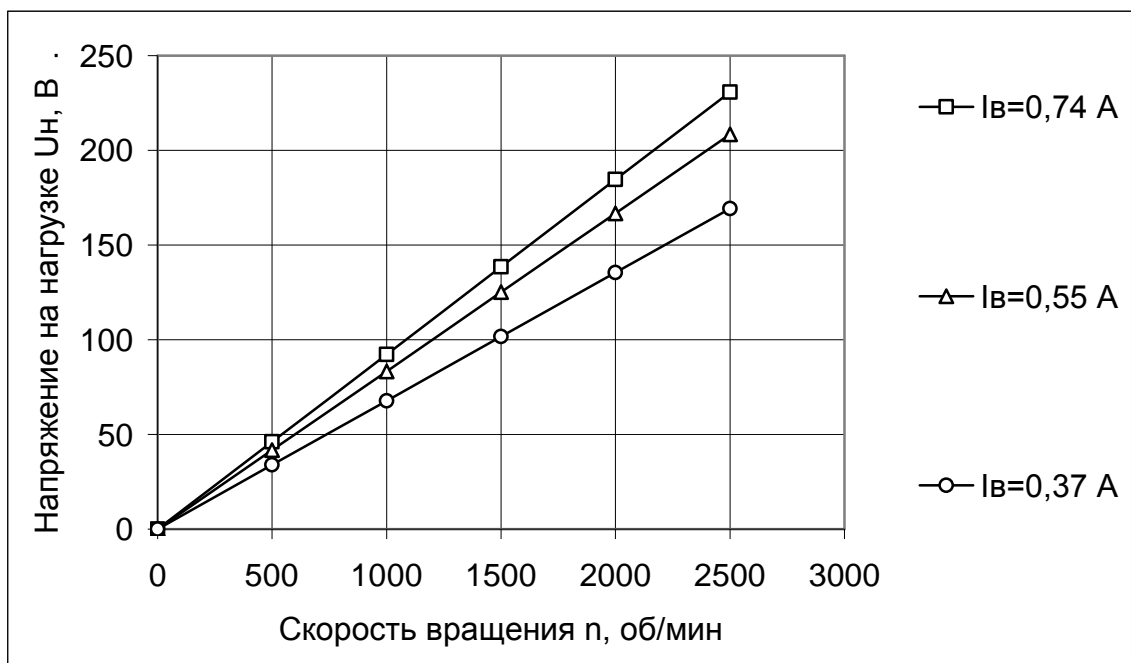


Рисунок 4.26 – Зависимость  $U_n = f(n)$  при  $I_f = \text{const}$  для модели генератора с учетом кривой намагничивания

На основе рассмотренных моделей машин постоянного тока можно строить и другие схемы по изучению работы двигателей и генераторов постоянного тока.

#### **4.4 Исследование переходных процессов при пуске и реверсе двигателей постоянного тока**

Исследование процессов пуска, реверса, различных видов торможения двигателей постоянного и переменного тока весьма важная тема для изучения. Для таких работ следует создавать специальные модели, рассмотрению которых посвящен данный раздел работы.

##### **4.4.1 Моделирование процесса пуска двигателя постоянного тока с пусковым реостатом, переключаемым в функции времени**

Рассмотрим модель для исследования пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Пусть пусковой реостат имеет три ступени. Пусковой реостат будем переключать в функции времени. Расчет ступеней пускового реостата выполним по известной методике [5].

Если задано количество ступеней пускового реостата, то соотношение моментов переключения определяется выражением

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{R_D^\partial \cdot M_1^\partial}} = \frac{M_1}{M_2}, \quad (35)$$

где  $M_1 > M_2$  - моменты на валу машины, при которых переключаются ступени пускового реостата;

$R_D^\partial = \frac{R_J}{R_H}$ ,  $M_D^\partial = \frac{M_1}{M_H}$  - относительные величины сопротивления якоря и наибольшего из моментов переключения;

$R_H = \frac{U_H}{I_H}$  - номинальное сопротивление двигателя;

$U_H$ ,  $I_H$ ,  $M_H$  - номинальные значения напряжения питания, тока и крутящего момента двигателя, соответственно.

Тогда, сопротивления ступеней пускового реостата будут таковы

$$\begin{aligned} R_1 &= R_J \cdot (\lambda - 1), \\ R_2 &= R_1 \cdot \lambda, \\ R_3 &= R_2 \cdot \lambda. \end{aligned} \quad (36)$$

Моменты времени, в которые будут переключаться ступени, определяются по формуле [6]

$$t_i = T_{Mi} \ln \frac{I_1 - I_H}{I_2 - I_H}, \quad (37)$$

где  $T_{Mi} = \frac{J \cdot R_{\Pi i}}{375 \cdot C_E \cdot C_M}$  - электрохимическая постоянная времени для дан-

ной  $i$ -той ступени;

$R_{\Pi i} = R_J + R_i$  - полное сопротивление якорной цепи, включая сопротивление  $i$ -той ступени пускового реостата  $R_i$ ;

$I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_H$  - токи, соответствующие моментам переключения и ток, соответствующий нагрузке на валу двигателя, соответственно.

Поскольку, для машины с независимым возбуждением, токи якоря пропорциональны моментам на валу, то в соотношении (37) токи могут быть заменены соответствующими значениями моментов

$$t_i = T_{Mi} \ln \frac{M_1 - M_H}{M_2 - M_H}. \quad (38)$$

Полученная схема пуска двигателя представлена на рисунке 4.27.

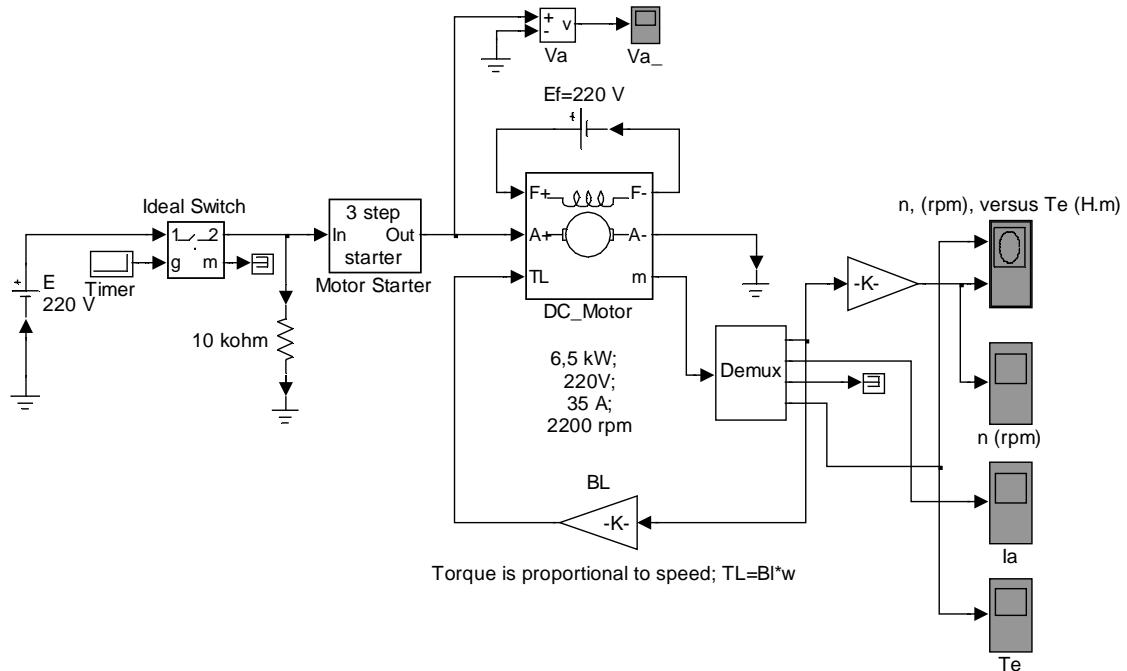


Рисунок 4.27 – Модель схемы пуска с трехступенчатым реостатом

Модель пускового реостата оформлена как подсистема **Motor Starter**. Ее внутренняя структура показана на рисунке 4.28.

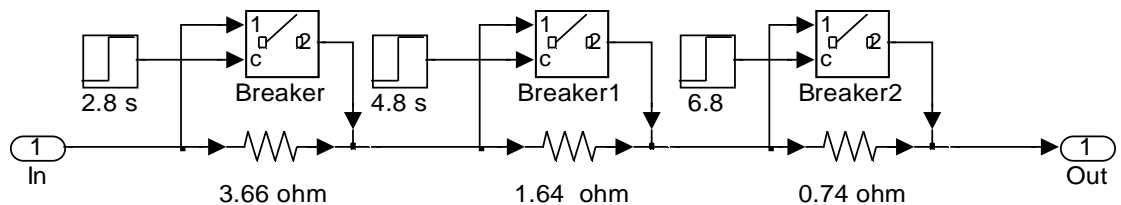


Рисунок 4.28 – Схема пускового реостата

Здесь, сопротивления ступеней реостата заданы в соответствии с расчетом, выполненным по выражениям (44), (36). Эти сопротивления в заданные моменты времени замыкаются накоротко ключами **Breaker**.

Ключи срабатывают в моменты времени, заданные блоками **Step**. В окна настройки этих блоков (рисунок 4.29) введены уставки времени (подобно уставкам реле времени в реальных схемах), определенные по формуле (38).

В модели предусмотрен вывод на осциллографы следующих кривых:

- напряжения подаваемого на двигатель, прибор  $Va\_$ ;



- тока якоря, прибор Ia ;
- скорость вращения вала  $n$  ;
- электромагнитного момента на валу двигателя, прибор Те .

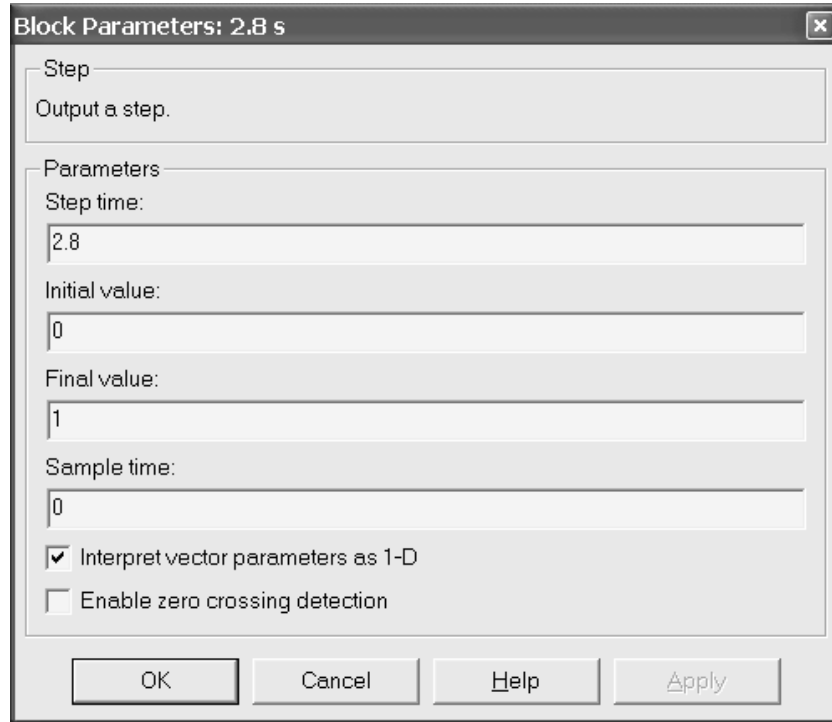


Рисунок 4.29 – Окно настройки блока *Step*

Графопостроитель строит зависимость скорости вращения от момента на валу машины, см. рисунок 4.30.

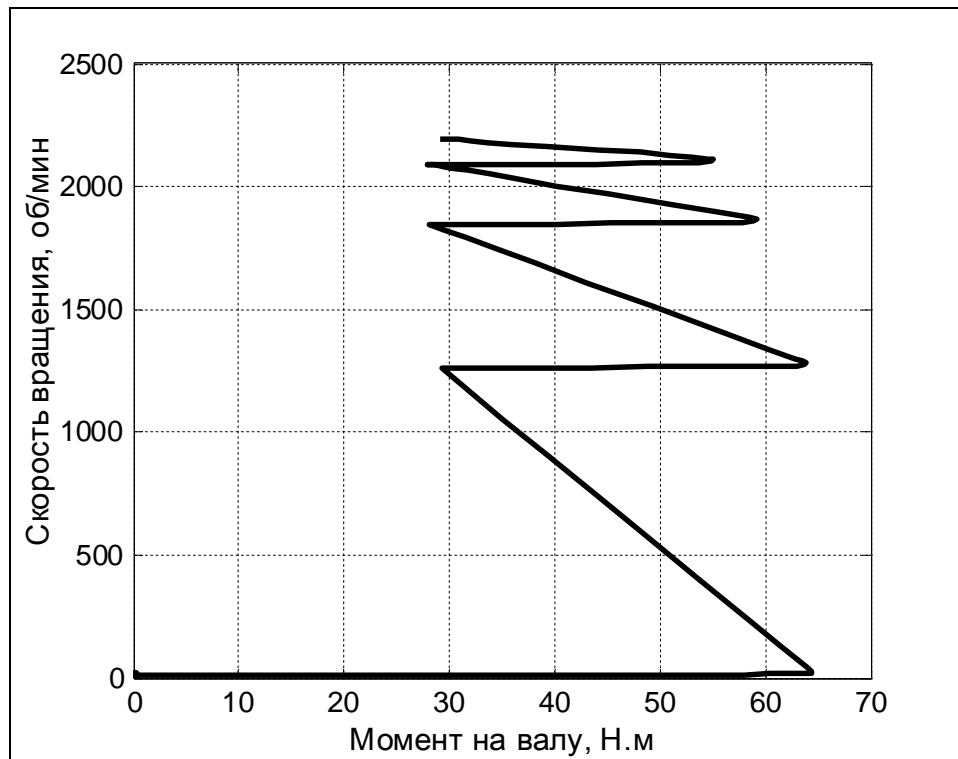


Рисунок 4.30 – Зависимость скорости вращения от момента на валу в процессе пуска

Как видим, точки переключения не точно соответствуют теоретической картине. Это объясняется тем, что при расчете сопротивлений пускового реостата нагрузка на валу двигателя считалась неизменной.

В данной модели в двигатель работает на линейно-возрастающую нагрузку. Она предполагает, что момент сил сопротивления на валу машины растет пропорционально частоте вращения вала. Такую зависимость имеет место, например, в приводе генератора с независимым возбуждением, который работает на постоянную электрическую нагрузку.

Уравнение момента нагрузки в модели имеет вид:  $M_H = K \cdot \omega$ , или в обозначениях принятых в модели:  $T_L = Bl \cdot \omega = 0,2287 \cdot \omega$ .

Ток якоря и момент на валу машины изменяются, так как показано на рисунке 4.31, а график скорости вращения двигателя дан на рисунке 4.32.

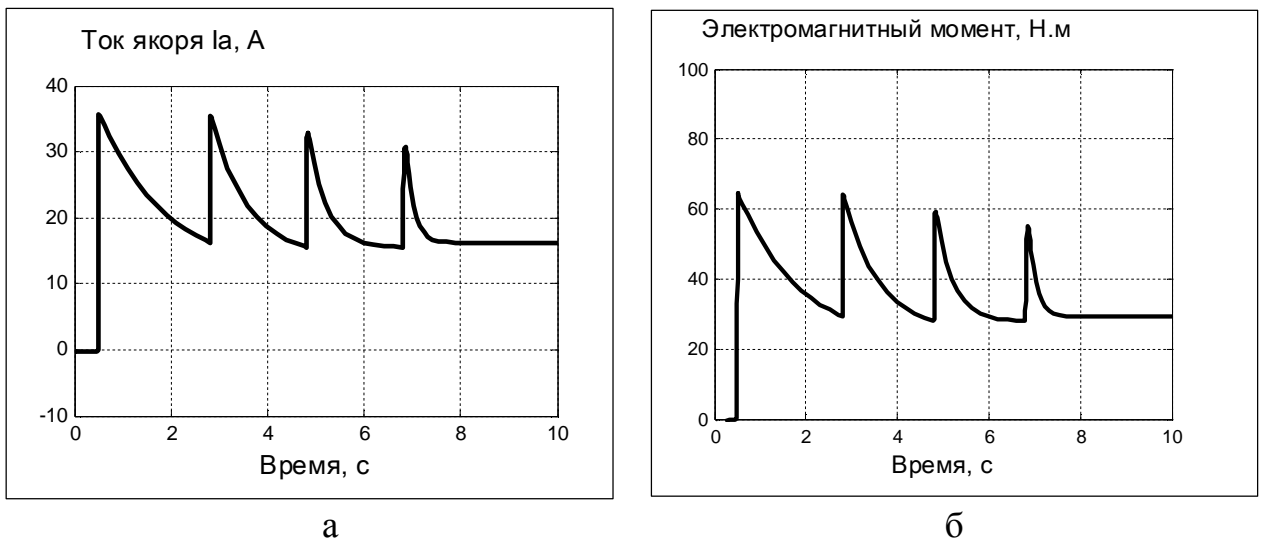


Рисунок 4.31 – Ток якоря при пуске (а), момент на валу (б)

Переключатели, используемые в модели, могут иметь параметры близкие к реальным. Например, можно задать сопротивление ключа в замкнутом  $R_{0N}$  и разомкнутом состоянии  $R_S$ . В последнем случае, возможно задание и емкости между контактами переключателя  $C_S$ . В нашем случае принято, что  $R_{0N} = 0,01$  Ом,  $R_S = \infty$ ,  $C_S = 0$ .

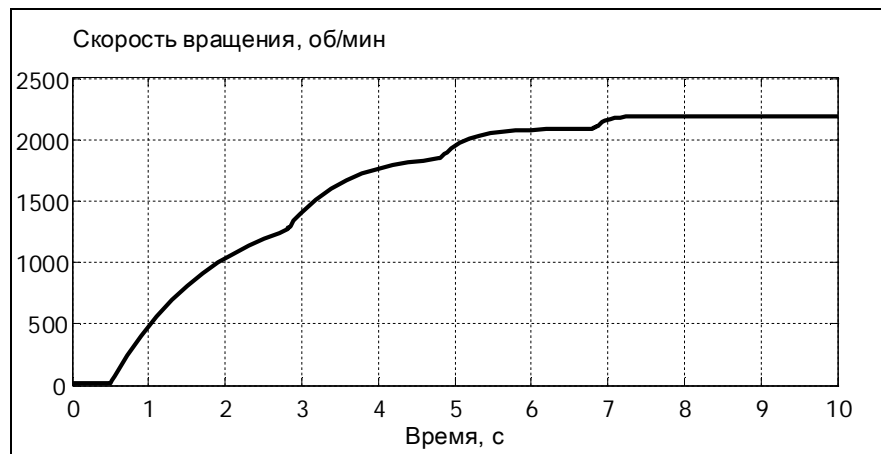


Рисунок 4.32 – График разгона исследуемого двигателя

#### 4.4.2 Моделирование процесса пуска двигателя постоянного тока с пусковым реостатом, переключаемым в функции скорости

Часто, в современных электроприводах пуск двигателей постоянного тока осуществляется в функции скорости вала. При этом в схему управления двигателем вводится датчик скорости вращения. В модели, рассмотренной выше, скорость вращения является одним из выходных параметров, поэтому, дополнив схему задатчиками скоростей переключения и элементами сравнения можно преобразовать модель изображенную на рисунке 4.27 в форму, показанную на рисунке 4.33.

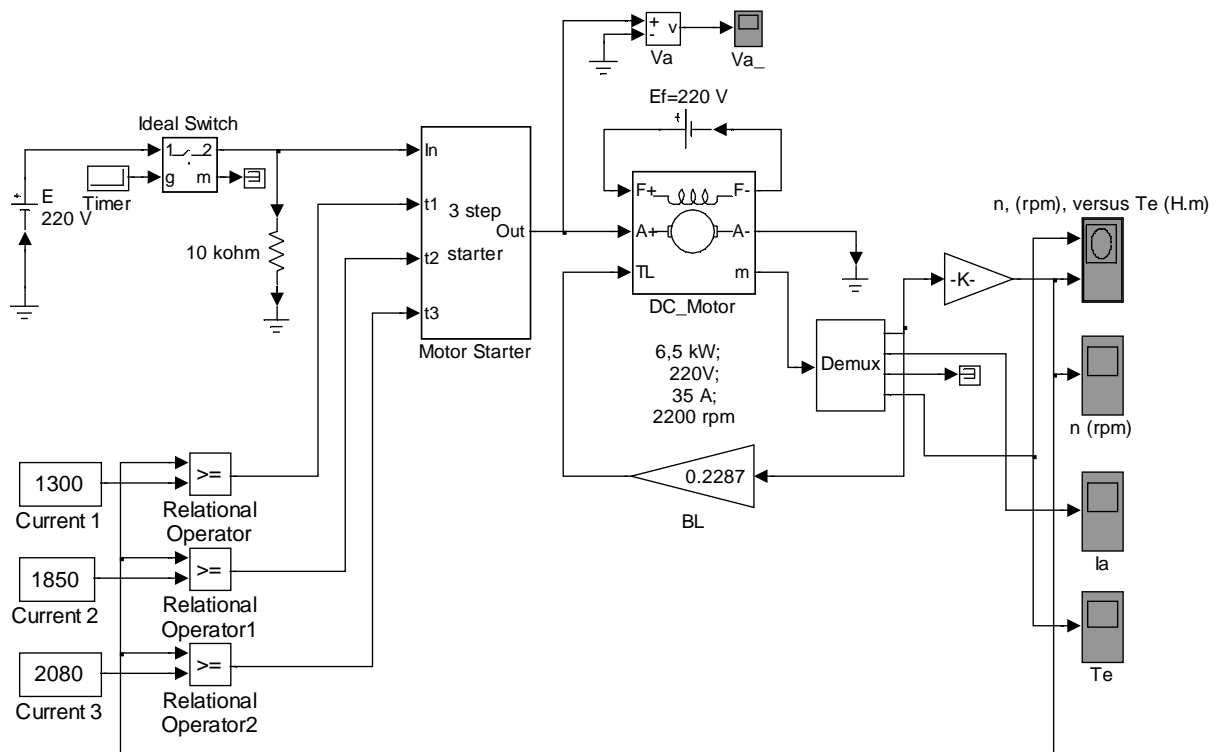


Рисунок 4.33 – Модель схемы пуска с трехступенчатым реостатом, переключаемым в функции скорости

Задатчиками скорости (элементы схемы **Current 1 – Current 3**) являются блоки **Constant** из библиотеки: **Simulink/Sources**. В их окнах настройки, показанных на рисунке 4.34, вводятся заданные величины.

В данной схеме, скорость вращения двигателя  $n$  сравнивается с заданной  $n_i$  (где  $i$ - номер точки переключения) и в момент, когда выполняется условие  $n \geq n_0$ , происходит замыкание очередной ступени пускового реостата.

Количество ступеней реостата и величины их сопротивлений оставлены такими, какими они были в предыдущей модели. Скорости переключения определены из предыдущего опыта.

Элементами сравнения здесь служат блоки **Relational Operator** (оператор соотношения), которые предназначены для сравнения между собой логических или числовых величин.

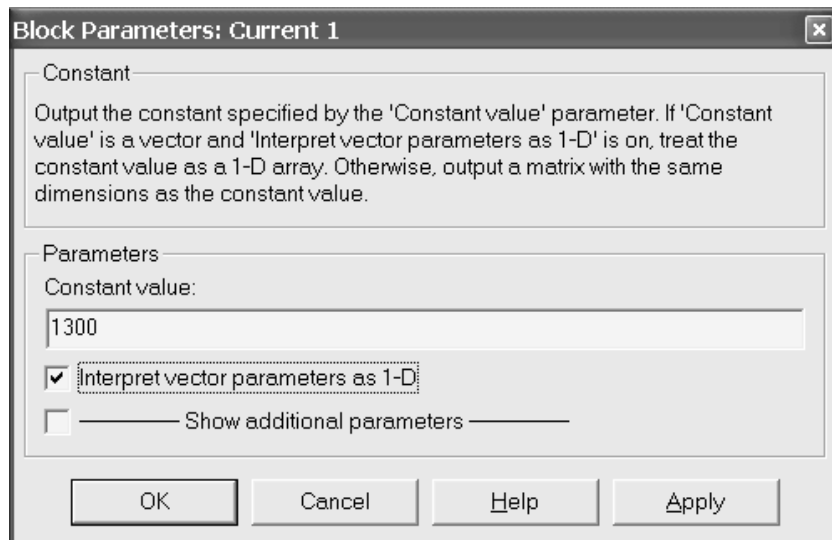


Рисунок 4.34 – Окно настроек блока *Constant*

Формула соотношения между величинами выбирается из раскрывающегося списка в окне настроек блока (рисунок 4.35). Принято, что слева в формуле стоит величина, подаваемая на верхний вход блока, а справа величина, подаваемая на нижний вход. На выходе блока формируется единица, если соотношение выполняется или ноль, если не выполняется. Эти сигналы управляют блоками **Breaker** в модели реостата.

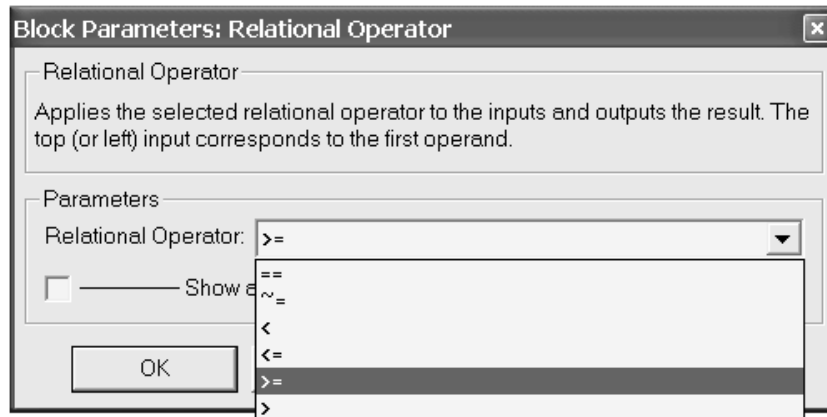


Рисунок 4.35 – Окно настроек блока *Relational Operator*

Схема пускового реостата изменена, как показано на рисунке 4.36.

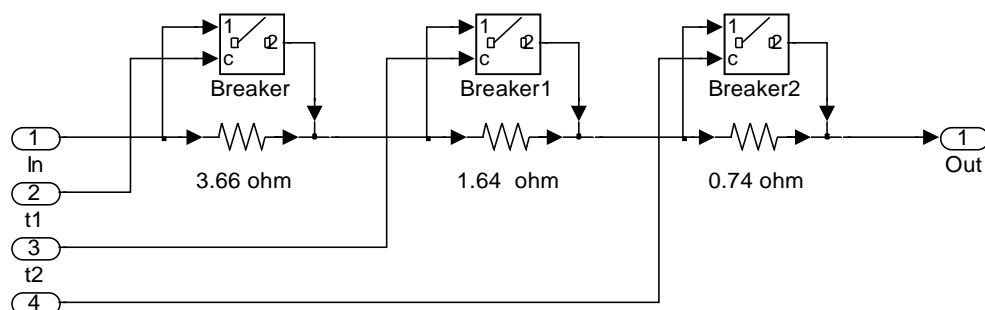


Рисунок 4.36 – Схема пускового реостата

Полученные на модели механические характеристики двигателя показаны на рисунке 4.37, а графики тока якоря и скорости на рисунке 4.38.

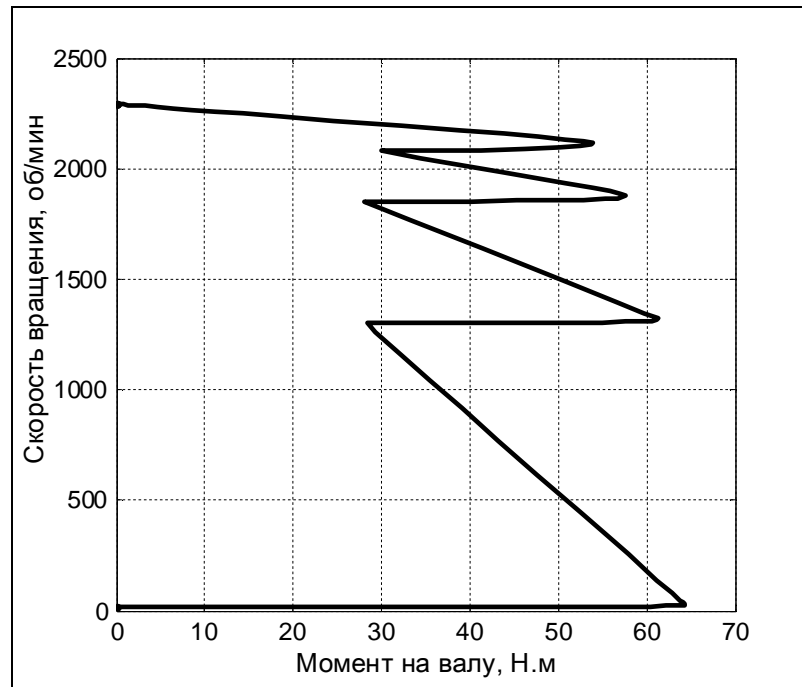


Рисунок 4.37 – Механические характеристики при пуске функции скорости

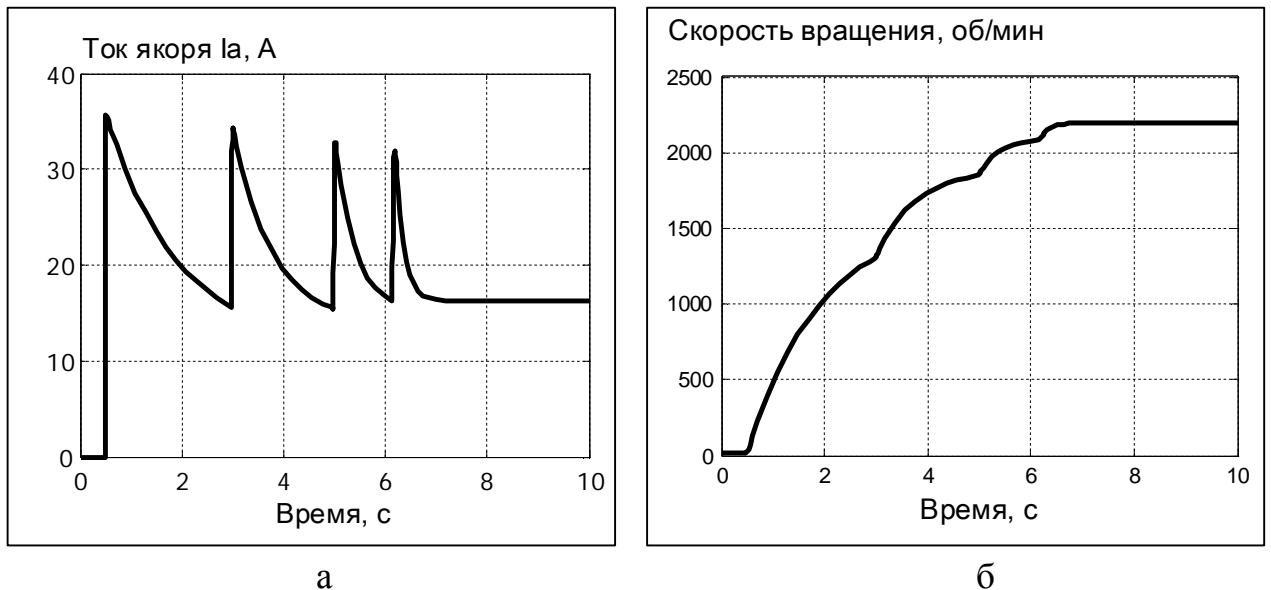


Рисунок 4.38 – Ток якоря (а) и скорость вращения двигателя (б) при пуске в функции скорости

#### 4.4.3 Моделирование процессов реверса и торможения двигателя постоянного тока

Весьма часто требуется быстро остановить механизм или изменить направление его движения (реверс). Скорость и точность, с которой будут проделаны эти операции, во многих случаях определяют производительность механизма и качество вырабатываемого продукта.

В процессе реверса для ограничения тока в цепь якоря вводят дополнительное сопротивление.

Рассмотрим модель для исследования пуска и реверса двигателя постоянного тока независимого возбуждения. За основу ее возьмем схему, приведенную на рисунке 4.27, которая моделирует пуск двигателя с трехступенчатым пусковым реостатом.

Как известно реверс можно осуществить, изменяя полярность напряжения подаваемого на якорь или обмотку возбуждения двигателя. Но второй метод применяется редко, так как из-за значительной постоянной времени обмотки возбуждения процесс реверса носит затяжной характер.

Будет реверсировать двигатель, изменяя полярность напряжения на якоре. Для этого можно поступить двояко: либо смоделировать реальную релейно-контактную схему управления двигателем, либо изменять полярность напряжения на якоре методами, имеющимися в **Simulink**.

Поскольку мы исследуем не поведение схемы управления двигателем, а саму машину, то будем изменять полярности напряжения с помощью блока управляемого источника напряжения (**Controlled Voltage Source**), см. рисунок 4.40.

Будем реверсировать двигатель через 10 секунд после запуска. Для этого на управляющий вход управляемого источника напряжения подадим сигнал с блока **Timer 1**. Данный блок по истечении 0,5 секунды момента начала моделирования выдает число 220, а далее, через 10 секунд изменяет значение выходной величины, и выдает число минус 220. Окно настроек данного блока приведено на рисунке 4.39.

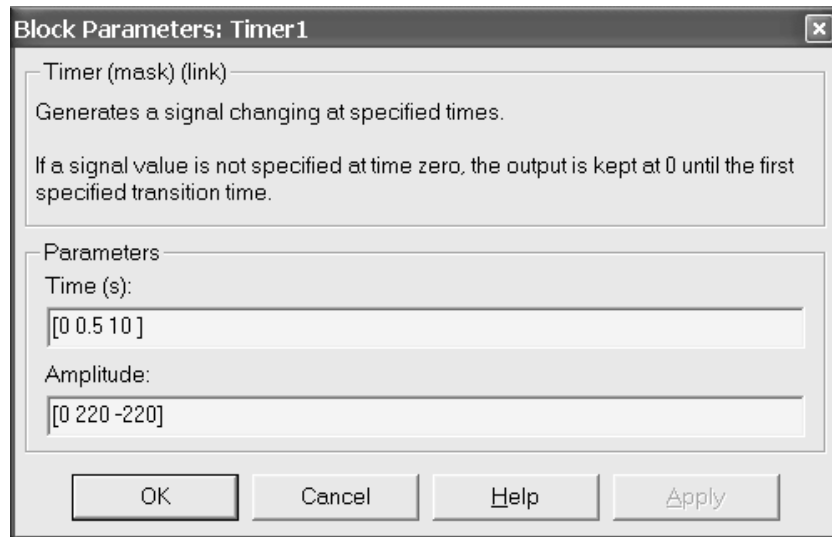


Рисунок 4.39 – Окно настроек блока **Timer 1**

На выходе блока **Controlled Voltage Source** в заданные моменты времени вырабатывается соответствующее напряжение 220 В и минус 220 В.

Для ограничения тока в момент реверса введем в схему добавочное сопротивление. В модели это подсхема **Motor reverse**. Ее схема приведена на рисунке 4.41.

Добавочное сопротивление включается в цепь ключом **Breaker 3**, который приводится в действие сигналом с блока таймера **Timer 4** в момент реверса. Величина добавочного сопротивления принята равной максималь-

ному сопротивлению пускового реостата. При этом ток якоря при реверсе не будет превосходить пусковой ток.

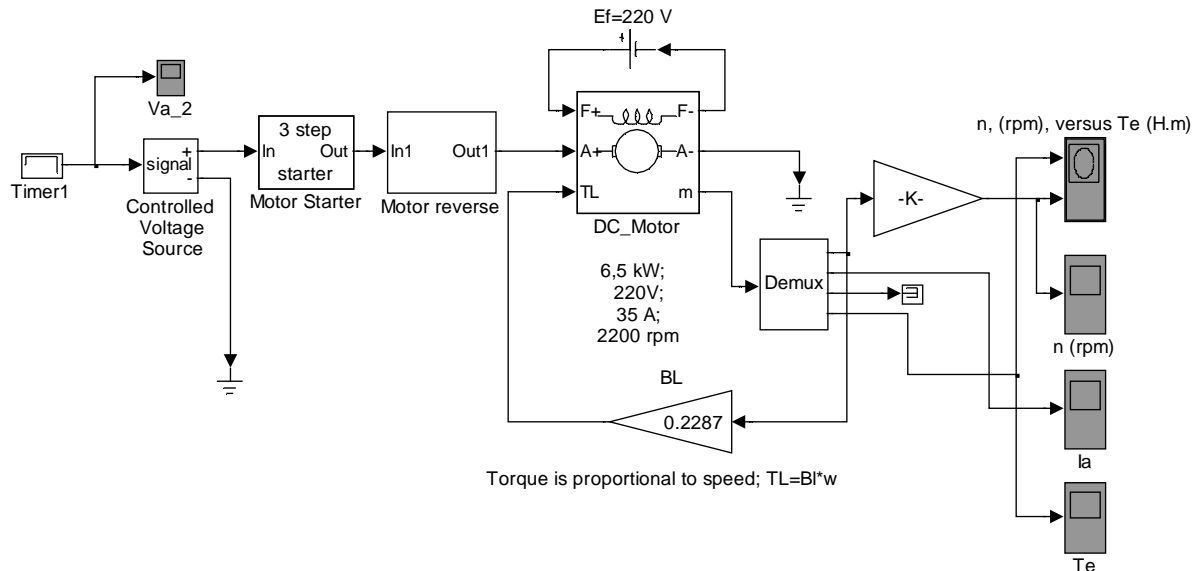


Рисунок 4.40 – Модель для исследования пуска и реверса двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

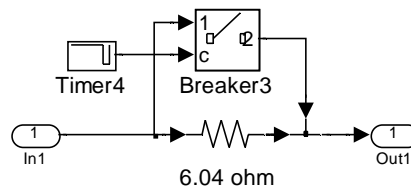


Рисунок 4.41 – Модель схемы включающей в цепь якоря добавочное сопротивление при реверсе

Таймеры, включающие ступени пускового реостата настроены так, что в момент реверса пусковой реостат вводится в цепь якоря полностью, а затем, после полной остановки вала, начинают снова шунтировать ступени пускового реостата. При этом двигатель разгоняется в другую сторону. В момент начала этого разгона момент на валу машины имеет значительную величину, поэтому выдержки времени при переключении ступеней реостата сокращены по отношению к уставкам заданным при пуске.

График подаваемого на двигатель напряжения и тока якоря в процессе пуска и реверса приведены на рисунке 4.42.

Механические характеристики, построенные графопостроителем, приведены на рисунке 4.43.

Зависимость скорости вращения вала двигателя от времени показана на рисунке 4.44.

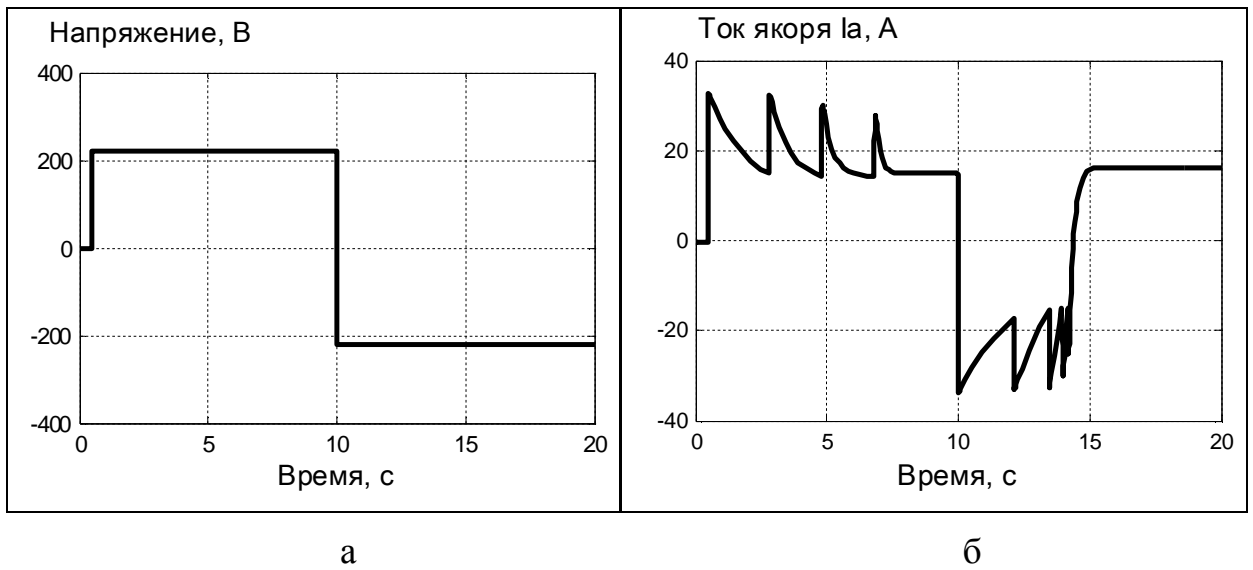


Рисунок 4.42 - Напряжение, подаваемое на якорь (а) и ток якоря (б)

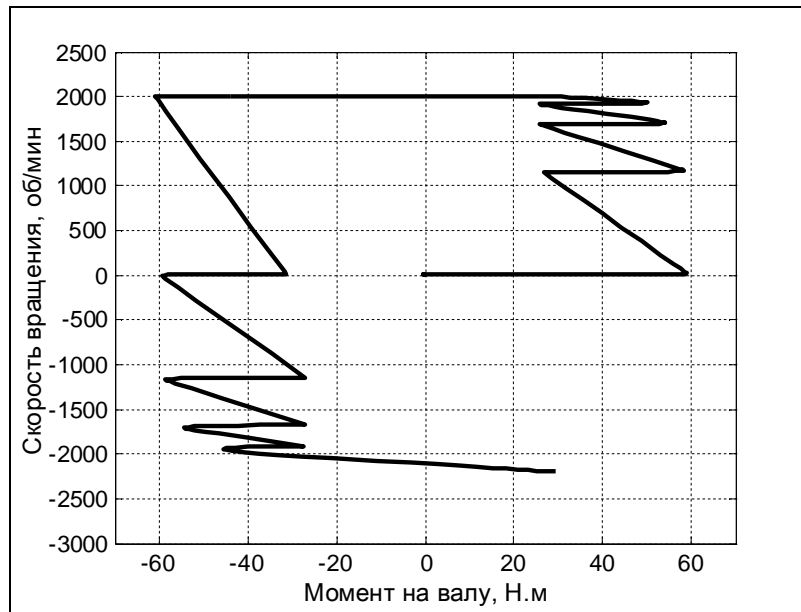


Рисунок 4.43 – Механические характеристики при пуске и реверсе двигателя постоянного тока независимого возбуждения

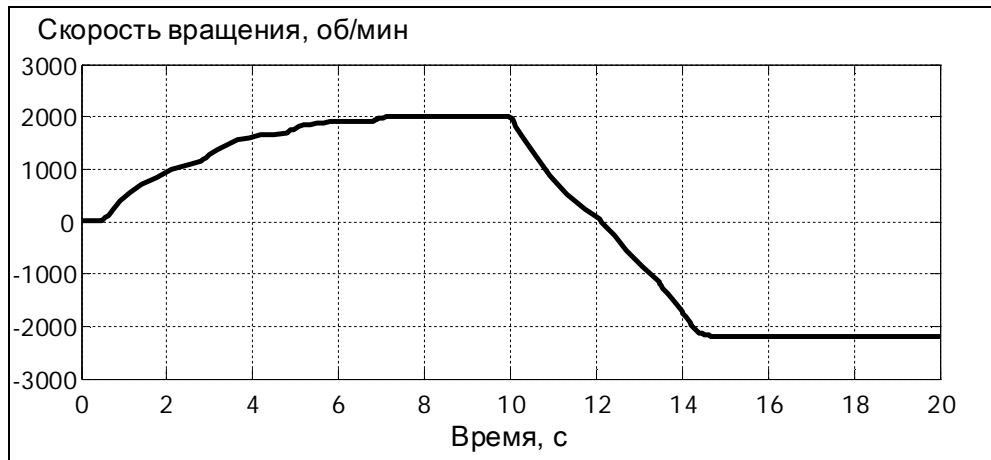


Рисунок 4.44 – График скорости вращения двигателя при пуске и последующем реверсе



Аналогичные модели можно создать для исследования пусковых режимов для машин с последовательным возбуждением или асинхронных двигателей с фазным ротором. Принципиально, данные модели не будут отличаться, от рассмотренных выше, поскольку во всех случаях пуск и реверс осуществляются с помощью пусковых реостатов и добавочных сопротивлений вводимых в цепь якоря или ротора. Отличия будут лишь в величине сопротивлений ступеней реостатов и их количестве

Рассмотрим теперь моделирование схемы торможения двигателя. Существуют три способа принудительного торможения двигателей [6]:

- динамическое торможение;
- торможение противовключением;
- генераторное торможение.

Динамическое торможение происходит при отключении якоря или статора двигателя от сети. К якорю двигателя постоянного тока или фазному ротору асинхронной машины подключается сопротивление (или три сопротивления к каждой фазе обмотки ротора). Кинетическая энергия, запасенная в двигателе, при этом преобразуется в электрическую энергию, а затем в тепловую и рассеивается в окружающем пространстве.

При торможении противовключением к якорю или статору двигателя кратковременно подводится напряжение противоположной полярности (или противоположного чередования фаз). В результате двигатель практически переходит в режим реверса. В момент, когда скорость двигателя снижается до нуля, напряжение, подаваемое на двигатель, отключают.

Генераторное торможение осуществляется тогда, когда скорость двигателя выше скорости идеального холостого хода. Такую схему мы здесь не рассматриваем.

Для сравнения эффективности разных способов торможения, и исследования процессов сопровождающих режимы торможения можно использовать модель приведенную ниже на рисунке 4.45.

В нею включены три отдельные схемы, носящие названия **Variant 1**, **Variant 2** и **Variant 3**, соответственно.

Модель, обозначенная **Variant 1**, представляет собой схему прямого пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. В процессе моделирования двигатель запускается и на 10-й секунде после запуска отключается от сети. Происходит останов двигателя с естественным выбегом, время которого определяется инерционными свойствами машины.

Модель, обозначенная **Variant 2**, представляет собой схему аналогичного двигателя, который на 10-й секунде моделирования отключается от сети и якорь его замыкается на тормозное сопротивление величиной 5 Ом.

Модель, обозначенная **Variant 3**, представляет собой схему динамического торможения двигателя. После прямого пуска, здесь на 10-й секунде моделирования на якорь подается напряжение питания противоположной полярности. Начинается реверс двигателя, который прерывается в момент, когда скорость вала машины равна нулю.

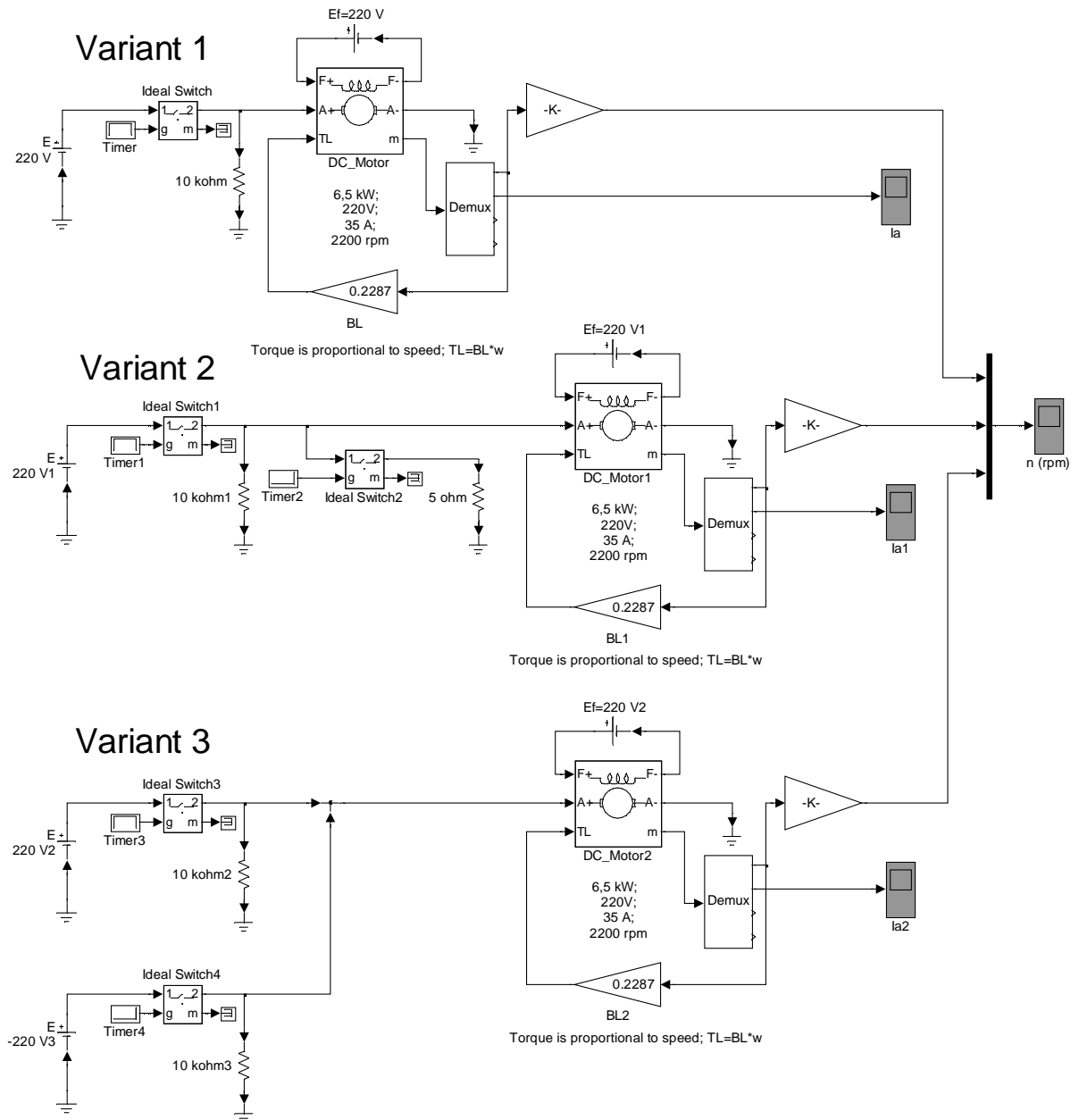


Рисунок 4.45 – Модель для сравнения разных способов торможения

Графики скорости вращения приведены на рисунке 4.46.

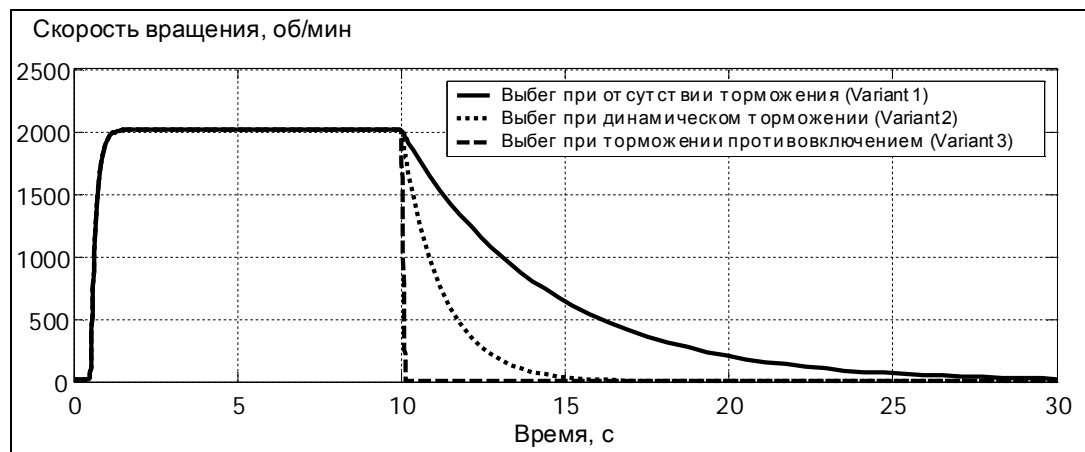


Рисунок 4.46 – Переходные процессы торможения двигателя

## 5 Модели для исследования характеристик асинхронных двигателей

### 5.1 Исследование механических характеристик асинхронного двигателя

В качестве исследуемого объекта выберем асинхронный двигатель типа 4AK160S4Y3 с фазным ротором, подготовка параметров, к моделированию которого рассмотрена ранее.

В рассматриваемой модели предусмотрим возможность исследования механических характеристик двигателя при изменении, как напряжения питания статора, так и при изменении сопротивления включенного в цепь ротора.

Схема модели приведена на рисунке 5.1.

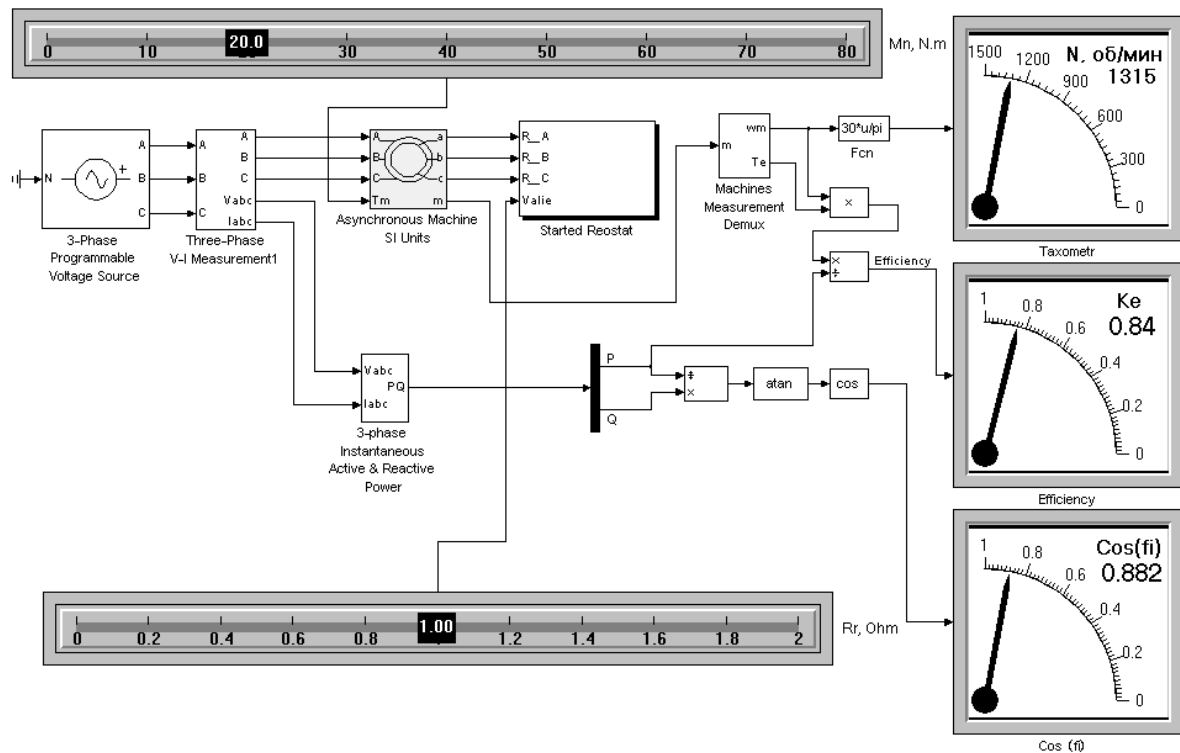


Рисунок 5.1 – Модель для исследования механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором

В качестве источника питания используем блок **3-Phase Programmable Voltage** (3-х фазный программируемый источник напряжения, соединенный в звезду), с параметрами: напряжение между выводами фаз (т.е. линейное напряжение) - 220 В; начальная фаза фазы А – 0 °; частота – 50 Гц. Эти параметры вводятся в окно параметров блока в виде вектора [220 0 50].

Для исследования зависимости механических характеристик двигателя от напряжения питания, следует задавать его значение в окне блока параметров **3-Phase Programmable Voltage**, например, [180 0 50] (для линейного напряжения 180 В).

Для измерения действующих значений линейных напряжений и токов в схеме между источником и моделью двигателя включим блок **Three-Phase V-I Measurement** (блок трехфазных измерений). На его выходе формируются векторы значений линейных напряжений **Vabc** и токов **Iabc**. Эти величины применяются в модели для вычисления активной и реактивной мощности потребляемой двигателем из сети. Блок **3-phase Instantaneous Active & Reactive Power**, внутренняя схема которого приведена на рисунке 5.2, производит определение активной и реактивной мощности трехфазной нагрузки.

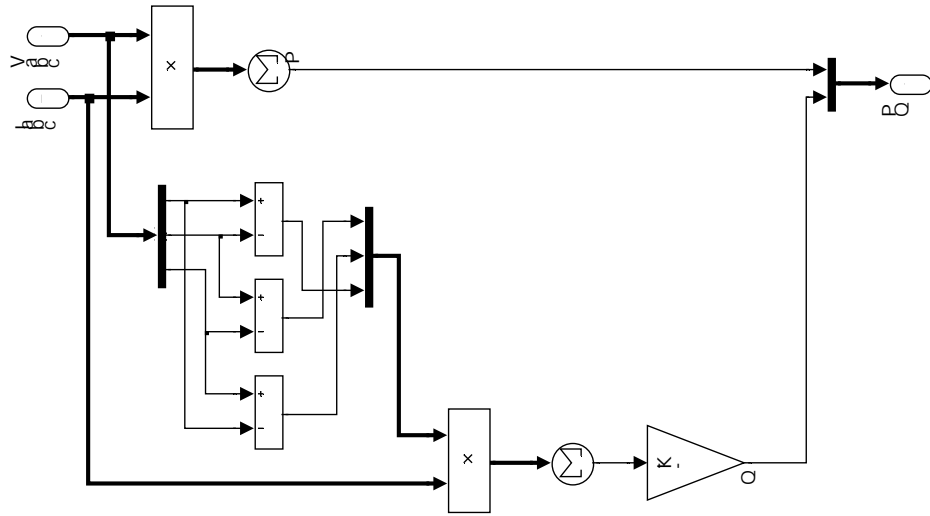


Рисунок 5.2 – Внутренняя схема блока **3-phase Instantaneous Active & Reactive Power**

Для вычисления активной мощности находится сумма скалярных произведений фазных напряжений и токов, соответственно.

$$P = \dot{U}_a \cdot \dot{I}_a + \dot{U}_b \cdot \dot{I}_b + \dot{U}_c \cdot \dot{I}_c,$$

Реактивная мощность определяется как сумма скалярных произведений линейных напряжений на фазные токи, деленная на  $\sqrt{3}$

$$Q = \frac{\dot{U}_{bc} \cdot \dot{I}_a + \dot{U}_{ca} \cdot \dot{I}_b + \dot{U}_{ab} \cdot \dot{I}_c}{\sqrt{3}}. \quad (39)$$

На выходе блока формируется вектор из двух значений активной (**P**) и реактивной (**Q**) мощности.

Далее определяется коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) по выражению

$$\cos \varphi = \cos \left( \arctg \left( \frac{P}{Q} \right) \right). \quad (40)$$

Для оценки эффективности регулирования скорости вращения асинхронного двигателя, с помощью реостата в цепи ротора, в модели определяется величина коэффициента полезного действия (КПД – обозначенная на схеме **Ke**).

Он вычисляется по выражению

$$K_e = \frac{P_m}{P} = \frac{T_e \cdot \omega}{P}, \quad (41)$$

где  $P_m$  - механическая мощность на валу двигателя;

$T_e$  - крутящий момент на валу двигателя;

$\omega$  - угловая скорость вращения вала.

Момент нагрузки и сопротивление реостата в модели задаются с помощью движковых регуляторов.

В пакете **SimPowerSystems** отсутствует готовый блок регулируемого внешним сигналом переменного сопротивления. Но его можно создать на основе блока **Controlled Voltage Source** (блок управляемого источника напряжения). Действительно, наличие в цепи сопротивления приводит к возникновению на нем падения напряжения  $U$ , противодействующего протекающему току  $I$ . Поэтому для создания модели переменного резистора необходимо включить в цепь управляемый источник напряжения, на вход которого будет подаваться сигнал пропорциональный протекающему по цепи току, как показано на рисунке 5.3.

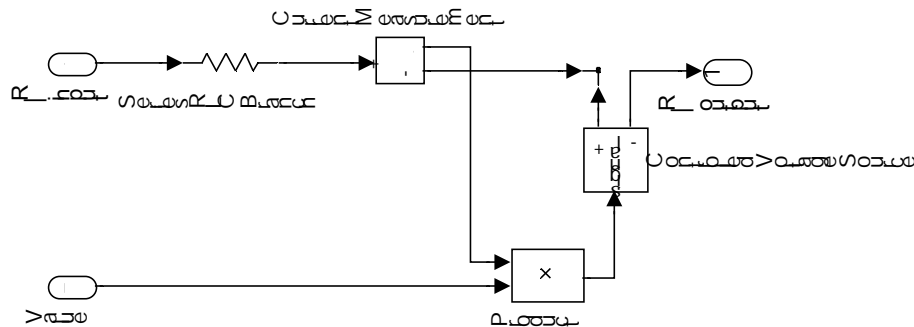


Рисунок 5.3 – Модель управляемого переменного резистора

В данной схеме  $U = \text{Valie} \cdot I$ , учитывая, что согласно закону Ома  $U = R \cdot I$ , получаем, что

$$\text{Valie} = R. \quad (42)$$

Таким образом, задавая значение параметра **Valie**, можно изменять сопротивление данного переменного резистора  $R$ .

Для предотвращения операции деления на ноль в момент включения модели необходимо ввести в схему дополнительный резистор (блок **Series RLC Branch**). Его величина может быть как угодно малой, например, в данной схеме  $R_0 = 0,001 \text{ Ом}$ .

С учетом наличия данного резистора, который можно рассматривать как минимальное значение сопротивления переменного резистора, величина последнего составит

$$R = \text{Valie} + R_0. \quad (43)$$

Значение  $R_0$  в модели может интерпретироваться как сопротивление контактного ползунка переменного резистора, которое остается неизменным при регулировании сопротивления реостата.

Для моделирования трехфазного реостата необходимо объединить три одинаковых схемы изображенных на рисунке 5.3, так, чтобы они имели об-

щий вход управления. Для этого удобно оформить модель каждого однофазного реостата как подсхему. На рисунке 5.4 изображена схема получившегося трехфазного реостата.

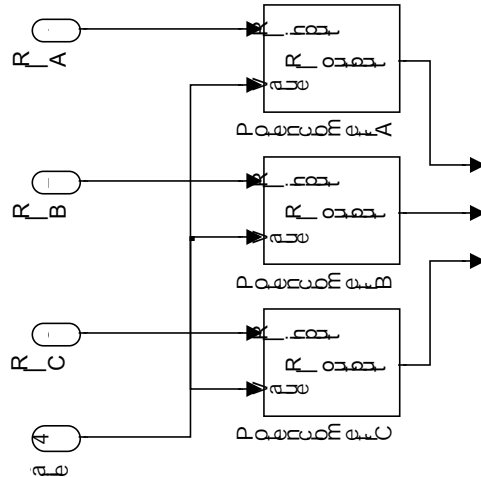


Рисунок 5.4 – Схема трехфазного реостата

В свою очередь, модель на рисунке 5.4 можно представить как подсхему. На основной модели (рисунок 5.1) она обозначена как **Started Reostat**.

На приведенных ниже рисунках 5.5 – 5.8 в качестве примера показаны результаты моделирования.

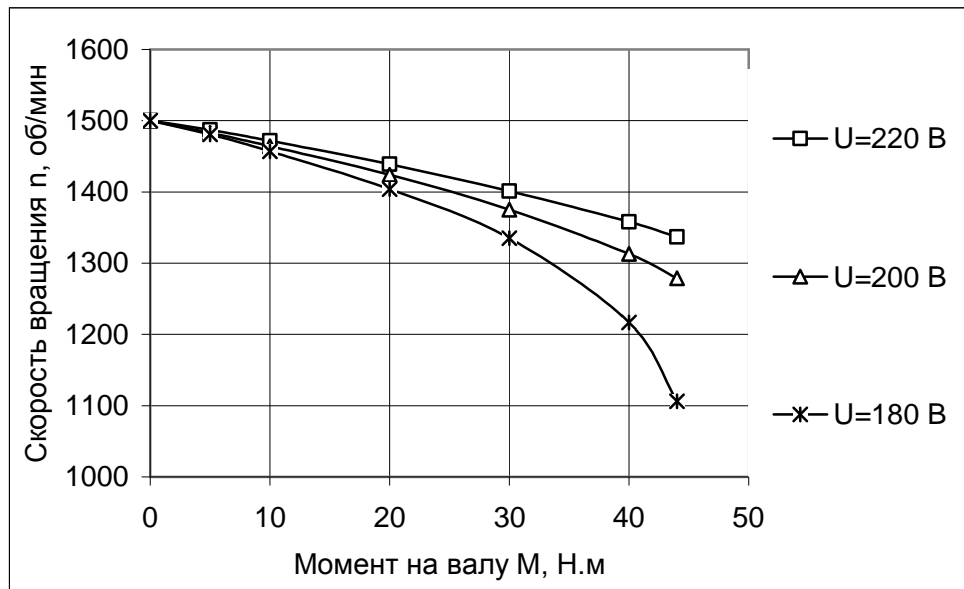


Рисунок 5.5 – Механические характеристики асинхронного двигателя при различных напряжениях питания и короткозамкнутой фазной обмотке

Выходными величинами модели асинхронного двигателя являются момент на валу и частота вращения вала, которая для наглядности пересчитывается в скорость вращения и отображается на циферблате тахометра.

Для вывода из блока **Asynchronous Machine SI Units** момента и частоты вращения служит описанный ранее блок **Machines Measurement Demux**.

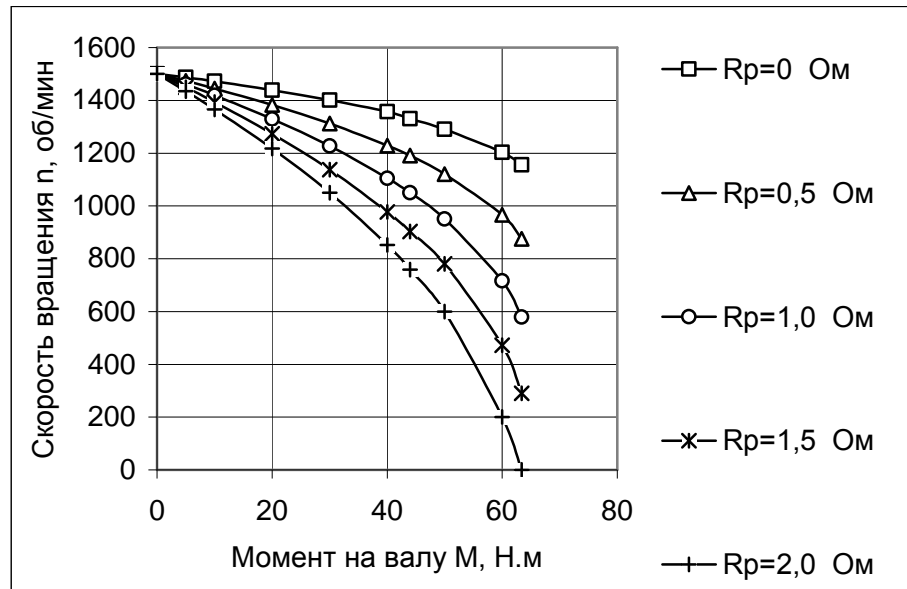


Рисунок 5.6 – Механические характеристики асинхронного двигателя при различных сопротивлениях пуско-регулирующего реостата и номинальном напряжении питания

Коэффициент полезного действия двигателя и его коэффициент мощности также выведены на индицирующие приборы.

На рисунке 5.7 приведена снятая «экспериментально» зависимость коэффициента мощности от нагрузки при номинальном напряжении питания и короткозамкнутой фазной обмотке. Интересно, что, как и следует из теории, данная кривая практически не зависит от величины сопротивления в цепи ротора. Как видим, из рисунка 5.8, КПД при данном типе регулирования скорости вращения невелик и резко снижается с ростом нагрузки и увеличении сопротивления пуско-регулирующего реостата.

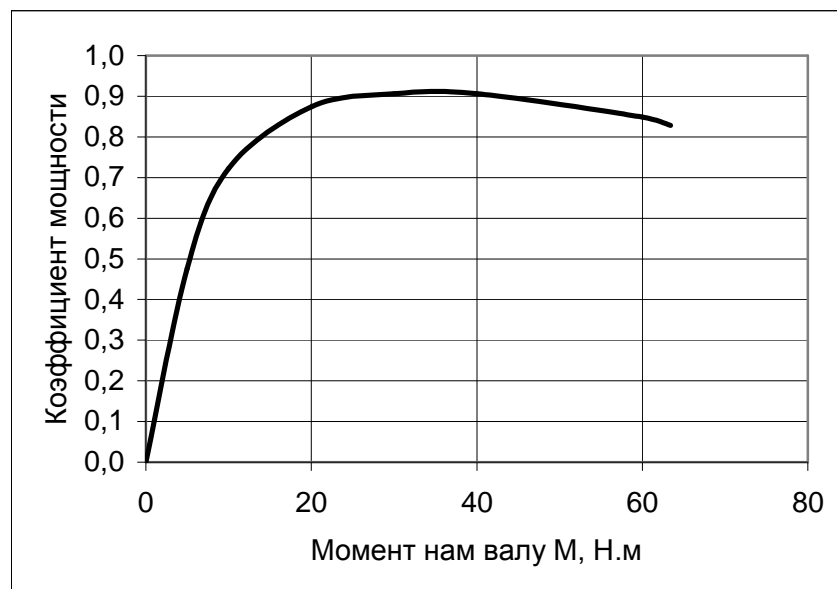


Рисунок 5.7 – Зависимость  $\cos \varphi$  от нагрузки при номинальном напряжении питания

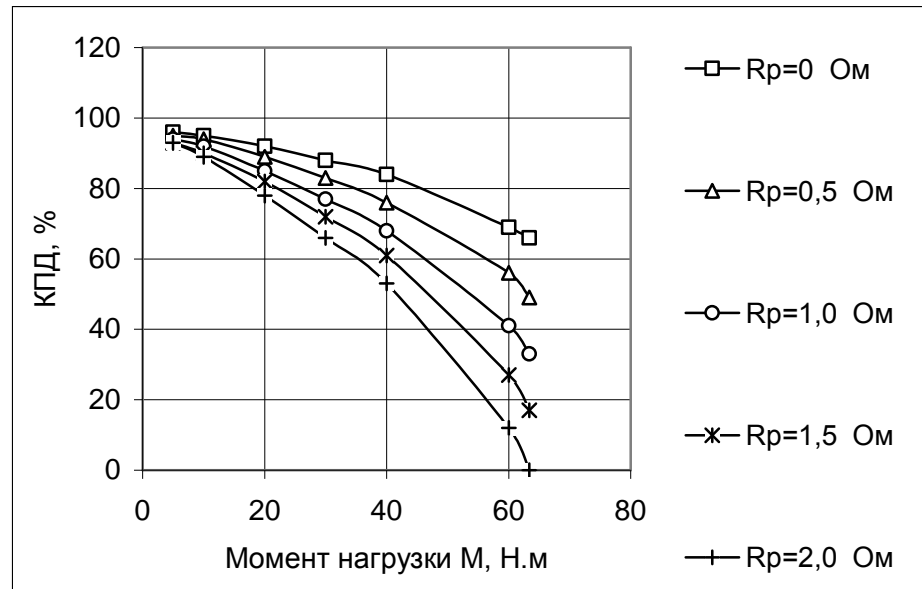


Рисунок 5.8 – Зависимость КПД от нагрузки при номинальном напряжении питания и разных сопротивлениях реостата

Данная схема позволяет исследовать не только статические механические характеристики двигателя, но и изучать динамику при прямом пуске двигателя с фазным ротором. Для исследования переходных процессов в двигателе нужно включить в схему осциллограф, как показано на рисунке 5.9, на данной схеме связи и приборы для регистрации коэффициента мощности и КПД удалены.

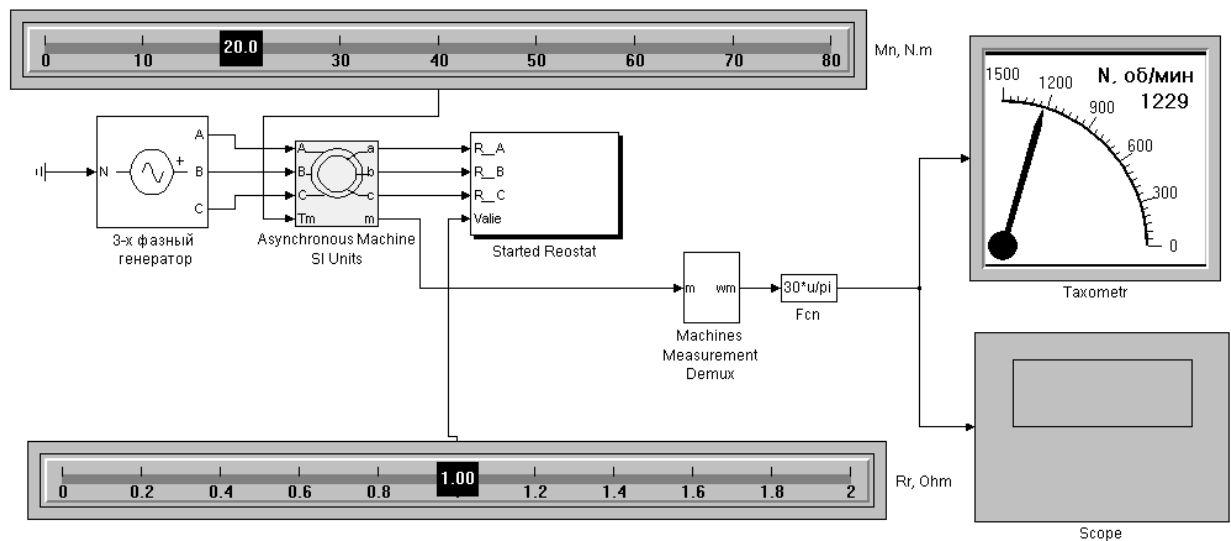
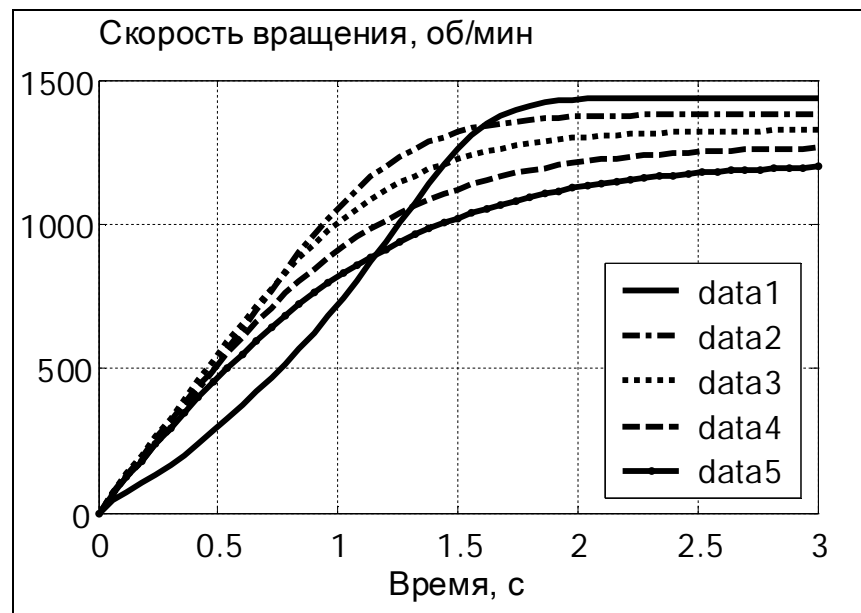


Рисунок 5.9 – Модель для исследования динамики асинхронного двигателя с фазным ротором

Например, на рисунке 5.10 показаны переходные процессы разгона двигателя при включении его с разными значениями сопротивления пускового реостата и одинаковой нагрузке  $T_m = 20$  Н·м.





*Рисунок 5.10 – Переходные процессы при пуске асинхронного двигателя с фазным ротором для разных значений сопротивлений пускового реостата*

В модели, каждый из приведенных переходных процессов получается на отдельном экране, но в целях сокращения объема мы показываем их на общем графике, полученном в результате редактирования.

Видим, что наиболее быстро протекает процесс пуска при короткозамкнутом роторе. С ростом величины сопротивления реостата процесс разгона двигателя затягивается.

## 6 Примеры сложных моделей с использованием электрических машин

### 6.1 Управление частотой вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

В состав рассматриваемого программного пакета входят и блоки регуляторов, позволяющие создать модели управления автоматизированного электропривода, как с аналоговым, так и с дискретным регулированием.

Методы выбора типа регулятора и его расчет его настроек рассматриваются в курсах «Теория автоматических систем» и «Автоматизированный электропривод» и здесь нами освещаться не будут. В настоящем разделе мы покажем лишь принцип построения таких моделей.

Рассмотрим пример моделирования схемы регулирования частотой вращения двигателя постоянного тока, см. рисунок 6.1.

Регулирование частоты вращения будем осуществлять периодическим включением и отключением напряжения питания с помощью запираемого тиристора (блок **ГТО**). Для осуществления форсированного регулирования величина напряжения питания выбрана на 36% выше, чем номинальное напряжение якоря.

для обеспечения протекания тока по якорной цепи в моменты запираания тиристора, параллельно якорю включается обратный диод (блок **D1**).

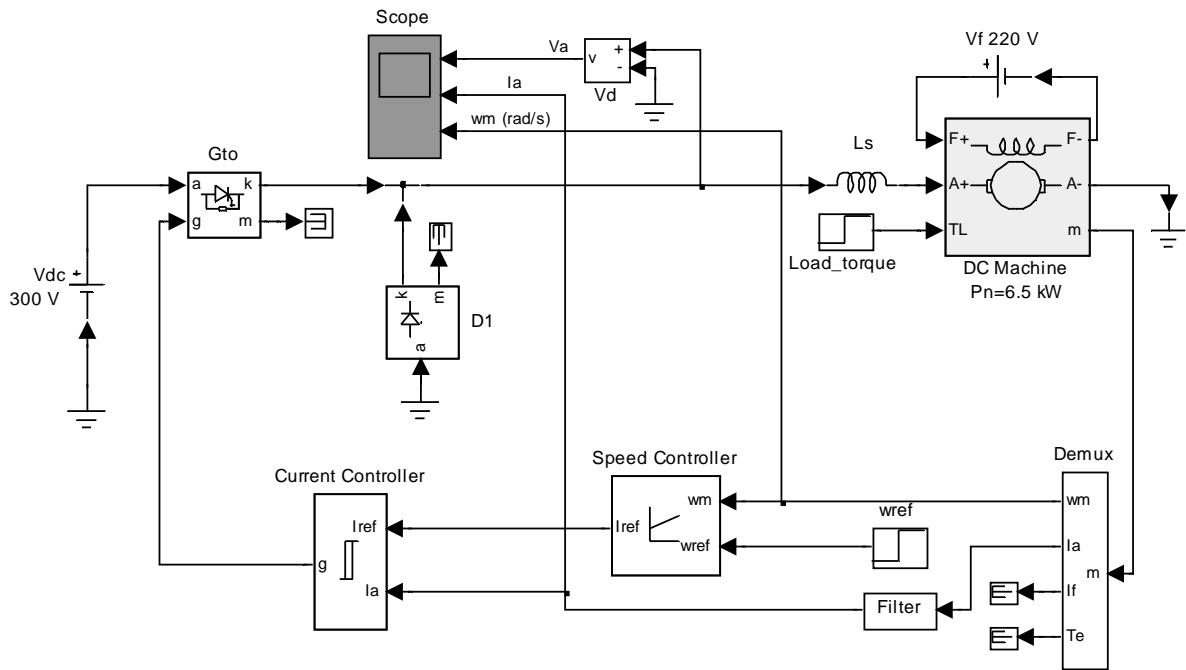


Рисунок 6.1 – Схема управления частотой вращения двигателя постоянного тока

Индуктивность  $L_s$  включенная последовательно с якорем двигателя моделирует индуктивность соединительных проводов.

Схема регулирования частоты вращения – двухконтурная. В первом контуре, заданное значение частоты вращения машины, которое вырабатывается блоком **wref**, сравнивается с текущим, поступающим от блока **Demux**.

Сравнение происходит в блоке **Speed Controller**, представляющим собой пропорционально-интегральный (ПИД) регулятор, внутренняя схема которого изображена на рисунке 6.2.

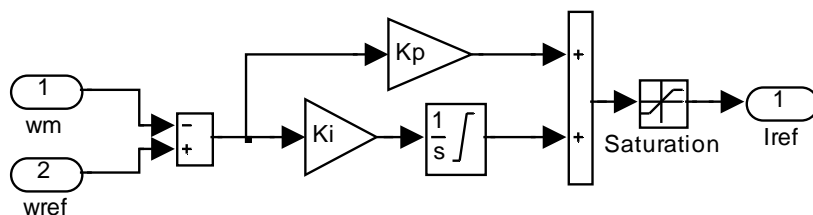


Рисунок 6.2 – Схема блока **Speed Controller**

Выходной сигнал этого регулятора задает ток, который должен протекать в якоре двигателя. Для предотвращения выхода из строя реального двигателя величина этого тока ограничивается блоком **Saturation** (параметр **Current limit**).

Блок ПИД-регулятора представляет собой маскированную подсхему, величины настроек которой вводятся в специальном окне, рисунок 6.3.

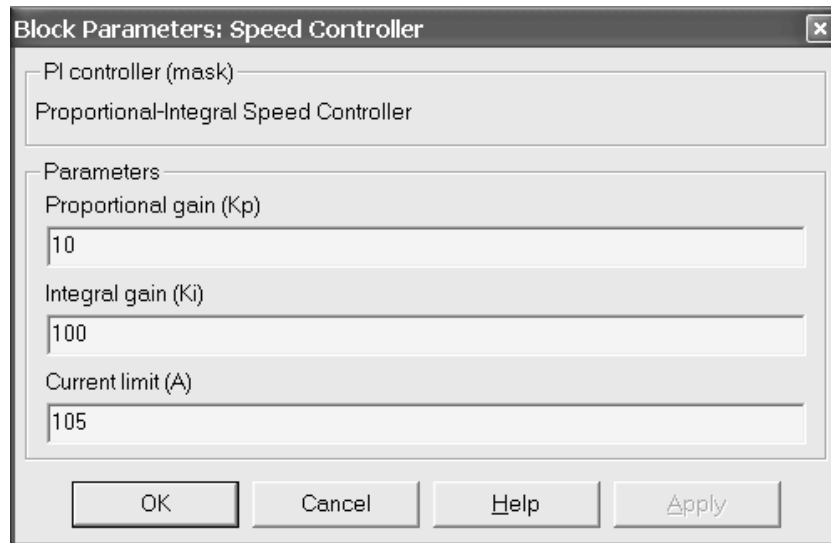


Рисунок 6.3 - Окно настроек ПИД-регулятора

Таким образом, ПИД-регулятор вырабатывает в данной схеме задающее значение тока якоря. Ток якоря, в свою очередь, регулируется вторым контуром управления.

Второй контур управления представляет собой релейную схему. В нем, заданное значение тока якоря (поступающее с блока **Speed Controller**) сравнивается с текущим значением тока, поступающего с блока **Demux**. Сравнение происходит внутри блока **Current Controller** (регулятор тока). Внутренняя структура данного блока показана на рисунке 6.4.

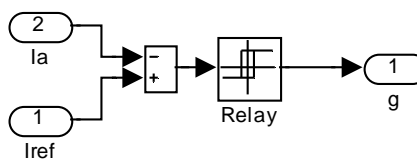


Рисунок 6.4 – Структура блока **Current Controller**

Если заданное значение меньше текущего значения тока, то тиристор открывается, иначе он остается запертым. Величина гистерезиса, необходимого для надежной работы данной схемы задается в блоке **Relay**.

Блок **Current Controller** так же оформлен в виде маскированной подсхемы и имеет только один параметр **Hysteresis band** (Ширина гистерезиса).

Пусть нам необходимо изменять частоту вращения со  $120 \text{ рад}^{-1}$  до  $160 \text{ рад}^{-1}$ , причем переход между значениями должен произойти через 0,8 секунд после начала процесса пуска.

Кроме того, по истечении 1,5 секунд с начала работы схемы, значение момента нагрузки на валу изменяется с  $15 \text{ Н}\cdot\text{м}$  до  $45 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

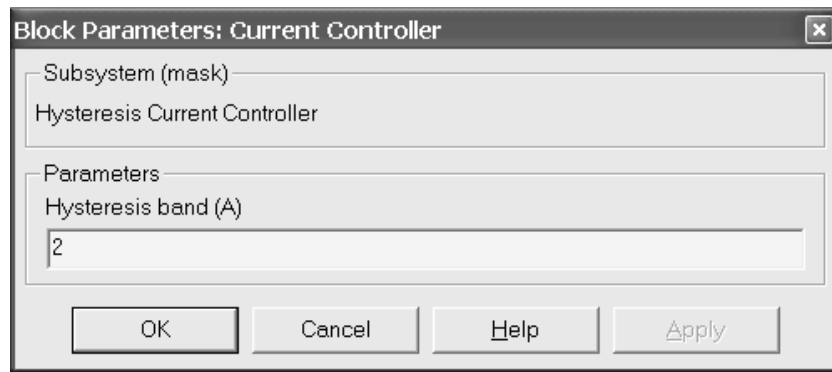


Рисунок 6.5 – Окно настроек блока **Current Controller**

Результат работы схемы показан на рисунке 6.6. На нем приведены три графика: напряжения на якоре двигателя; ток якоря и частота вращения вала.

Видим, что выход на первую ступеньку заданной частоты вращения ( $120 \text{ рад}^{-1}$ ), происходит менее чем за 0,7 с, и перерегулирование составляет не более 5% (рисунок 6.7).

Переход на вторую ступень частоты вращения ( $160 \text{ рад}^{-1}$ ) происходит быстрее (менее чем за 0,4 с), причем перерегулирование составляет 3,75% (рисунок 6.8).

Просадка частоты вращения при подъеме нагрузки на валу в три раза составляет не более 1,25% и длится менее 0,3 с (рисунок 6.9).

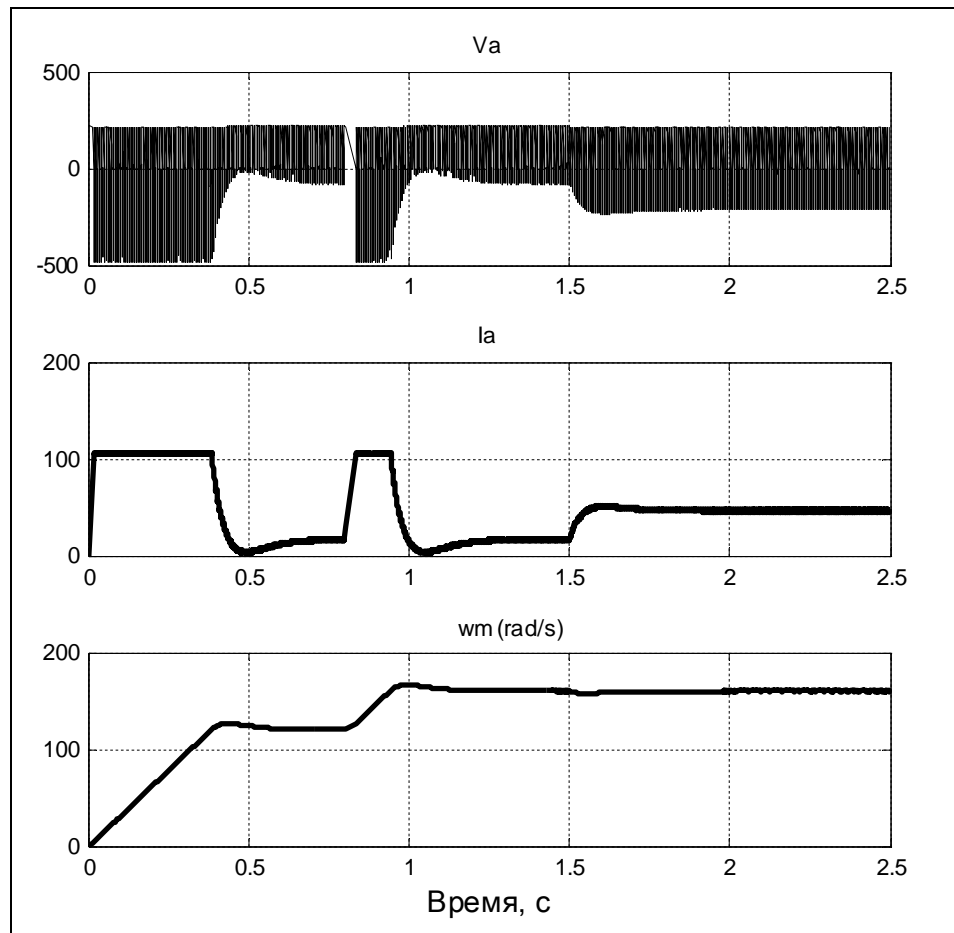


Рисунок 6.6 – Графики напряжения  **$V_a$** , тока якоря  **$I_a$**  и частоты вращения  **$\omega_m$**

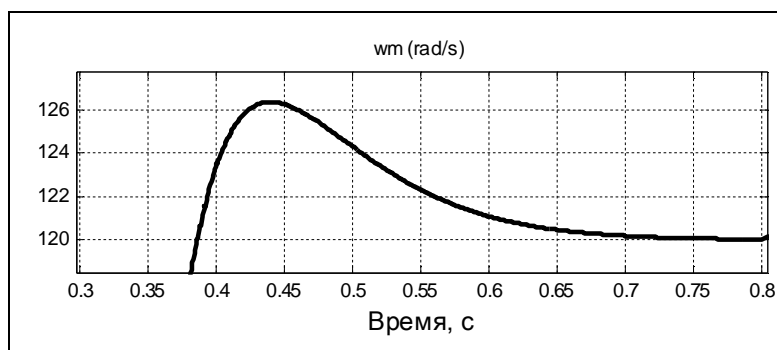


Рисунок 6.7 – Частота вращения  $\omega_m$  в диапазоне времени моделирования от 0,3 до 0,8 с

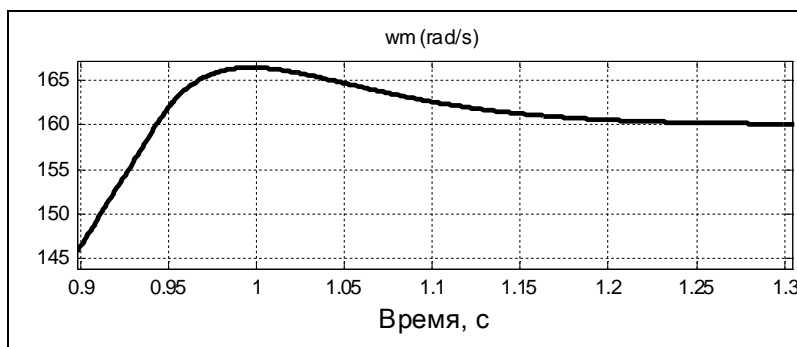


Рисунок 6.8 – Частота вращения  $\omega_m$  в диапазоне времени моделирования от 0,9 до 1,3 с

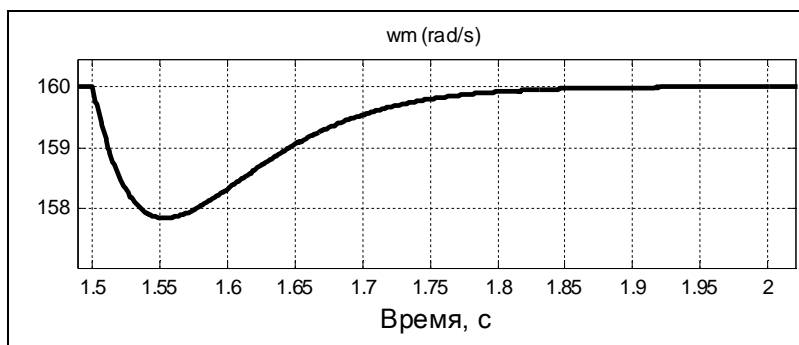
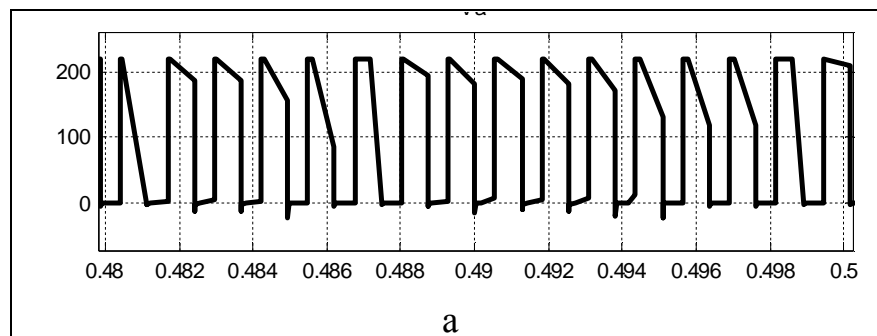


Рисунок 6.9 – Частота вращения  $\omega_m$  в диапазоне времени моделирования от 1,5 до 2,0 с

Форма импульсов напряжения на якоре показана на рисунке 6.10. Отрицательные выбросы обусловлены наличием индуктивности в цепи якоря.

Длительность импульсов разная, что объясняется работой системы регулирования частоты вращения.



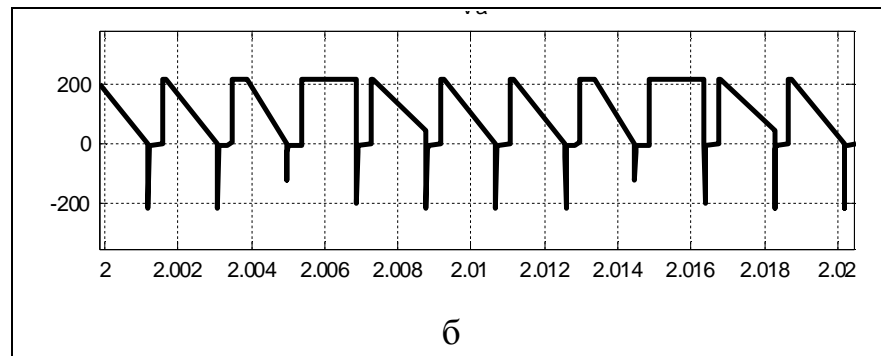


Рисунок 6.10 – Форма импульсов напряжения на якоре двигателя: в переходном процессе (а) в установившемся режиме (б)

В переходном процессе частота работы тиристорного ключа выше, вследствие чего, запасы энергии в индуктивности якорной цепи меньше, а, следовательно, меньше амплитуда импульсов выбросов обратного напряжения.

## 6.2 Управление частотой вращения асинхронного двигателя

Как известно наилучший способ управления частотой вращения трехфазного асинхронного двигателя – частотный. При этом изменяются частота и величина напряжения подаваемого на статор двигателя. При данном способе регулирования механические характеристики получаются наиболее жесткими [6].

В настоящее время для получения трехфазного напряжения переменной частоты и амплитуды служат устройства называемые инверторами. Они преобразуют переменный ток промышленной частоты в переменный ток другой частоты.

Инвертор достаточно сложное устройство. Его моделирование может быть проведено двояко:

во-первых, может быть создана полная модель электрической схемы инвертора, включающая управляемый выпрямитель, тиристорную схему преобразования постоянного напряжения в переменное, устройство управления и т.д.

во-вторых, можно смоделировать математическую зависимость, выражающую требуемые напряжения с заданной частотой и фазой и получить их методами **Simulink**, например, используя управляемые источники напряжения.

Если нас интересует работа самого инвертора и процессы, протекающие в нем, то можно пойти первым путем. В данном случае наша задача - исследовать поведение асинхронного двигателя при частотном регулировании скорости вращения, поэтому полная модель инвертора нам не требуется. В рассматриваемой схеме инвертор моделируется математическим блоком, изображенным на рисунке 6.11.

Анализ и описание данного блока мы здесь приводить не будем, так как это выходит за рамки настоящей работы. Во второй части настоящего по-

события будут рассмотрены модели устройств преобразовательной техники, в том числе и инверторы, как автономные, так и ведомые сетью.

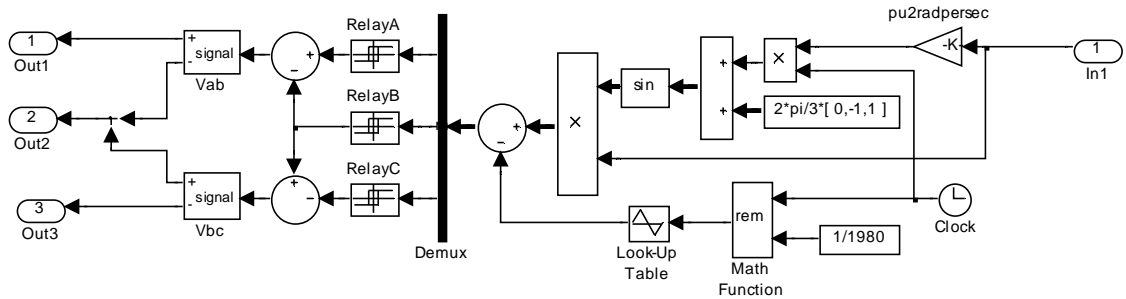


Рисунок 6.11 – Схема подсистемы моделирующей инвертор

Отметим только, что результатом работы данного блока является формирование трех сдвинутых на  $120^\circ$  последовательностей импульсов напряжения, частота которых постоянна, а относительная длительность и полярность изменяются по синусоидальному закону. Такое напряжение носит название широтно-модулированного, а инверторы называют – инверторы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Вид одной такой последовательности соответствующей линейному напряжению между фазами а и b ( $V_{ab}$ ) показан на рисунке 6.12.

Наличие индуктивности в обмотках статора приводит к тому, что ток статора (и ротора) имеет практически синусоидальный характер при питании обмоток существенно несинусоидальным напряжением.

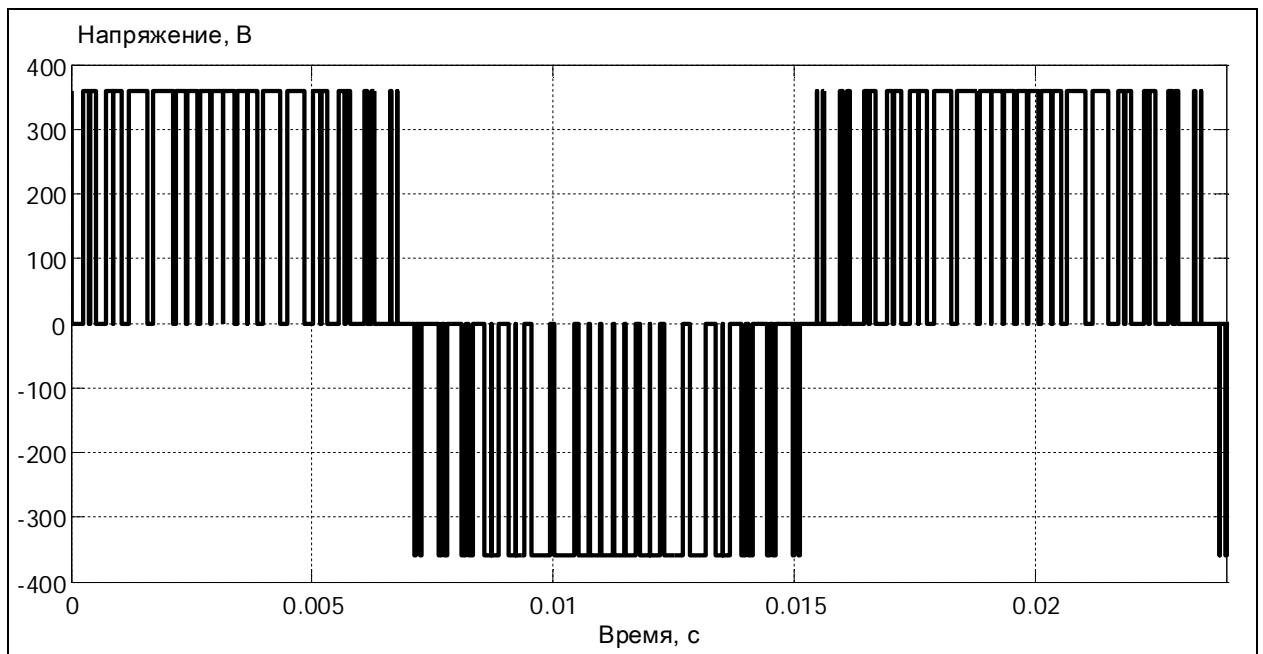


Рисунок 6.12 –Выходное линейное напряжение инвертора одной из фаз инвертора

Схема управление асинхронным двигателем показана на рисунке 6.13. В ней задатчик скорости выполнен в виде блока **Step**, который подает на инвертор сигнал (в относительных единицах) управляющий частотой вращения

машины. В качестве устройства задания можно использовать и ползунковый элемент, аналогичный примененному в моделях описанных ранее.

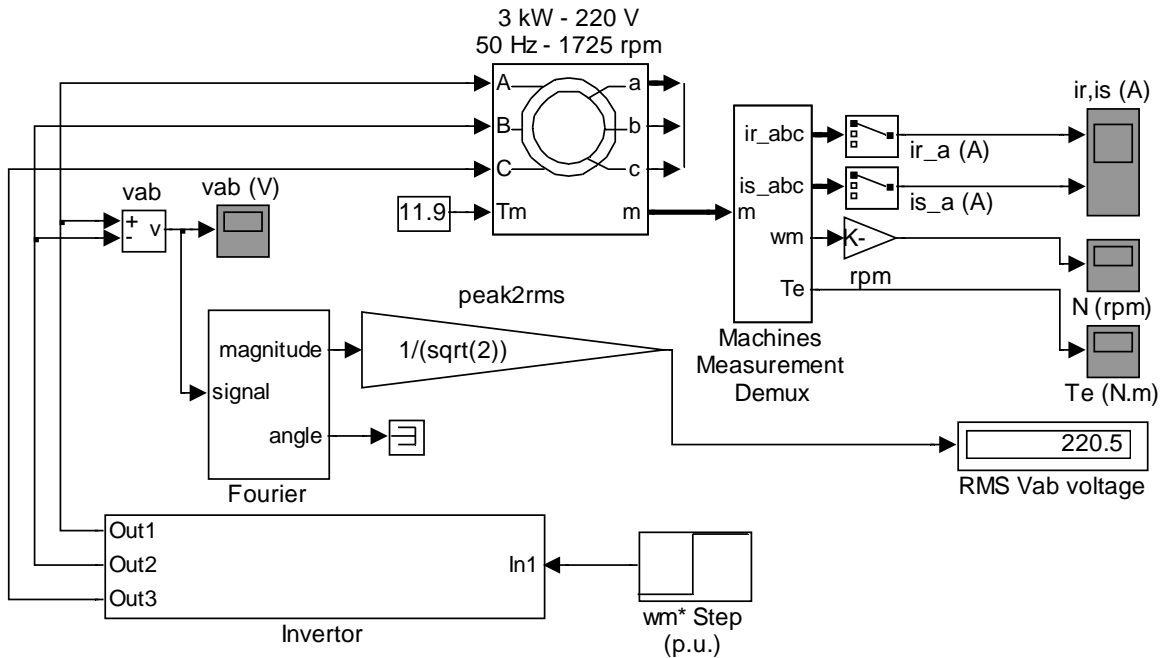


Рисунок 6.13 – Схема модели частотного управления асинхронным двигателем

Модель позволяет наблюдать процессы изменения токов статора и ротора (фаза A), разгона и изменение электромагнитного момента на валу при пуске двигателя. Кривые на рисунках 6.14 – 6.16 показывают результаты моделирования.

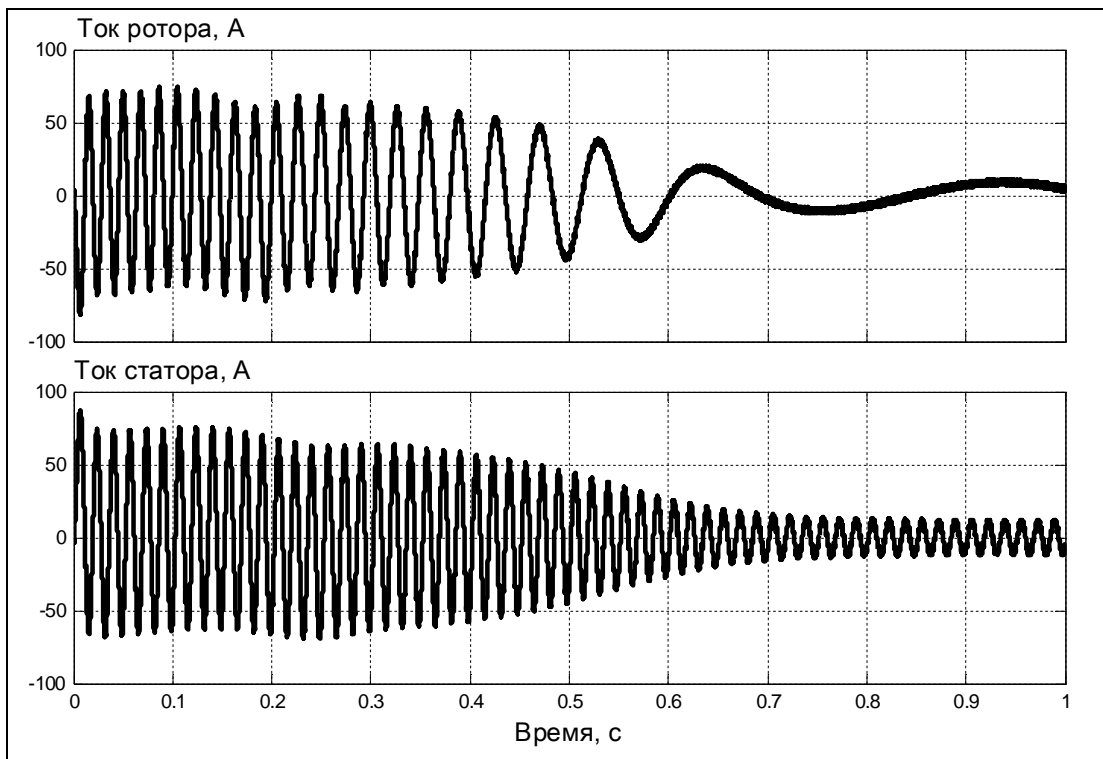


Рисунок 6.14 – Токи ротора и статора в процессе пуска двигателя



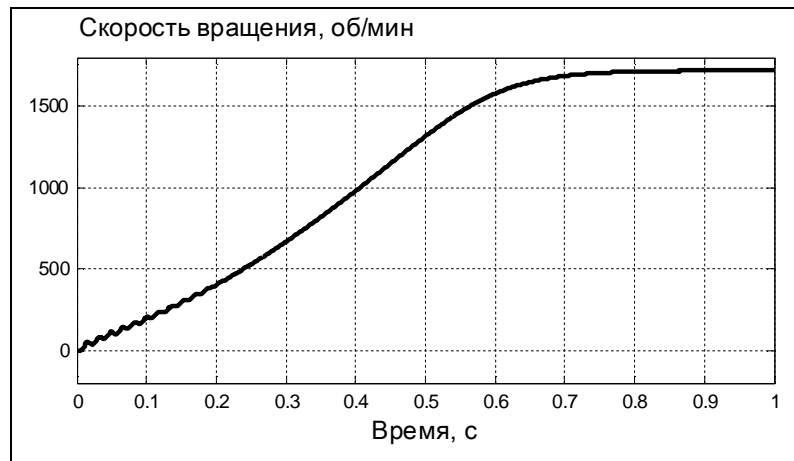


Рисунок 6.15 – Кривая разгона двигателя

Как видим при пуске ток, потребляемый двигателем из сети, значительно превышает установившееся значение, но по мере разгона машины ток статора (и ток ротора) снижаются. Наглядно видно, что при наборе оборотов вала, т.е. при уменьшении скольжения частота тока в роторе падает.

Кривая изменения электромагнитного момента приведена на рисунке 6.16.

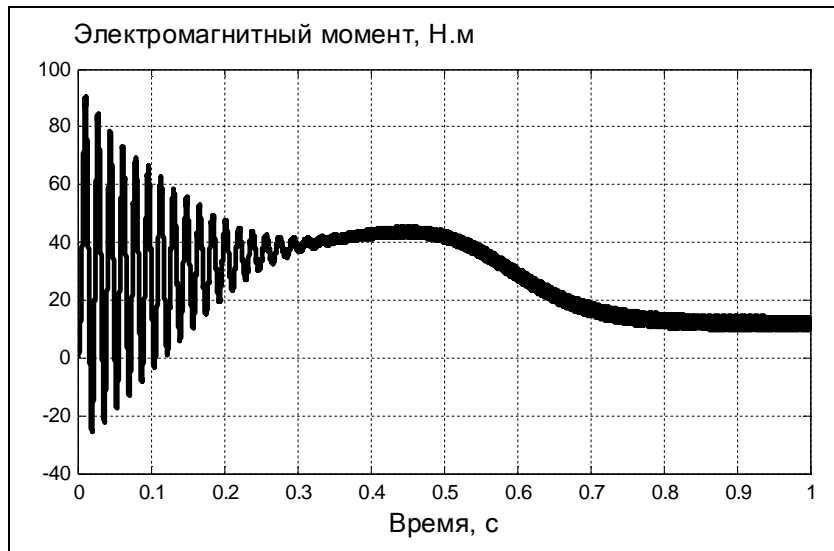


Рисунок 6.16 – Электромагнитный момент машины при пуске

Для измерения действующего значения напряжения подаваемого на двигатель в модели использован блок **Fourier** (блок Фурье анализа) из библиотеки **SimPowerSystems/Extra Library/Measurements/Fourier**. Этот блок выделяет в подаваемом на его вход периодическом сигнале заданную гармонику и выдает значение ее амплитуды и начальной фазы. Требуемую частоту гармоники следует задавать в окне настроек блока, рисунок 6.17.

В модели используется только выход амплитуды гармоники. Для пересчета ее величины в действующее значение амплитуда делится на  $\sqrt{2}$ , перед отображением на индикаторе **RMS Vab voltage**.

В данной модели нагрузка на валу двигателя постоянна (задана блоком **Constant**), но ее можно изменять, введя в схему ручной задатчик. Добавление

в схему тахометра (аналогично модели показанной ранее на рисунке 5.9) позволит исследовать механические характеристики машины при различных частотах питающей сети.

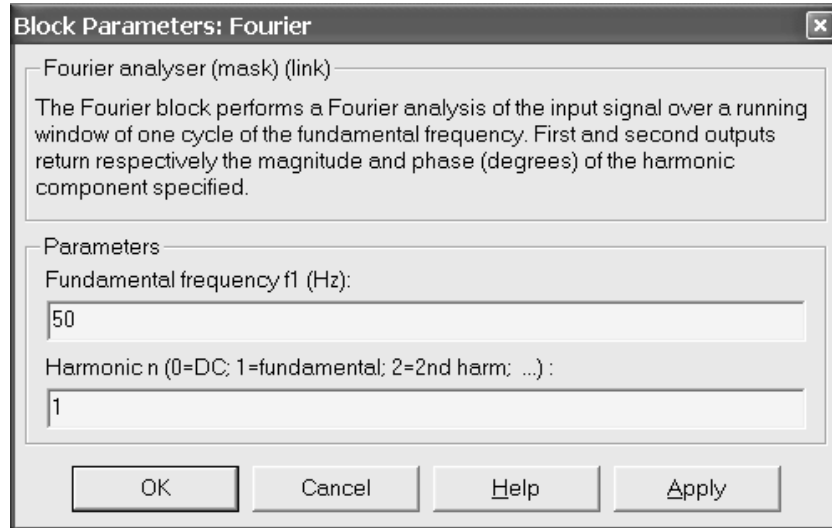


Рисунок 6.17 – Окно настроек блока *Fourier*

## 7 Практические советы по моделированию

### 7.1 Использование переменных для задания параметров блоков

Параметры блоков можно задавать не только в виде значений числовых параметров, но и имен переменных. Значения переменных необходимо задать до начала процесса моделирования в рабочей области системы MATLAB. Такой способ задания переменных удобен, если требуется проводить многовариантные расчеты для одной и той же модели динамической системы. На рисунке 7.1,а показана модель, которая описывается параметрами  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Окно настроек данной модели приведено на рисунке 7.1,б.

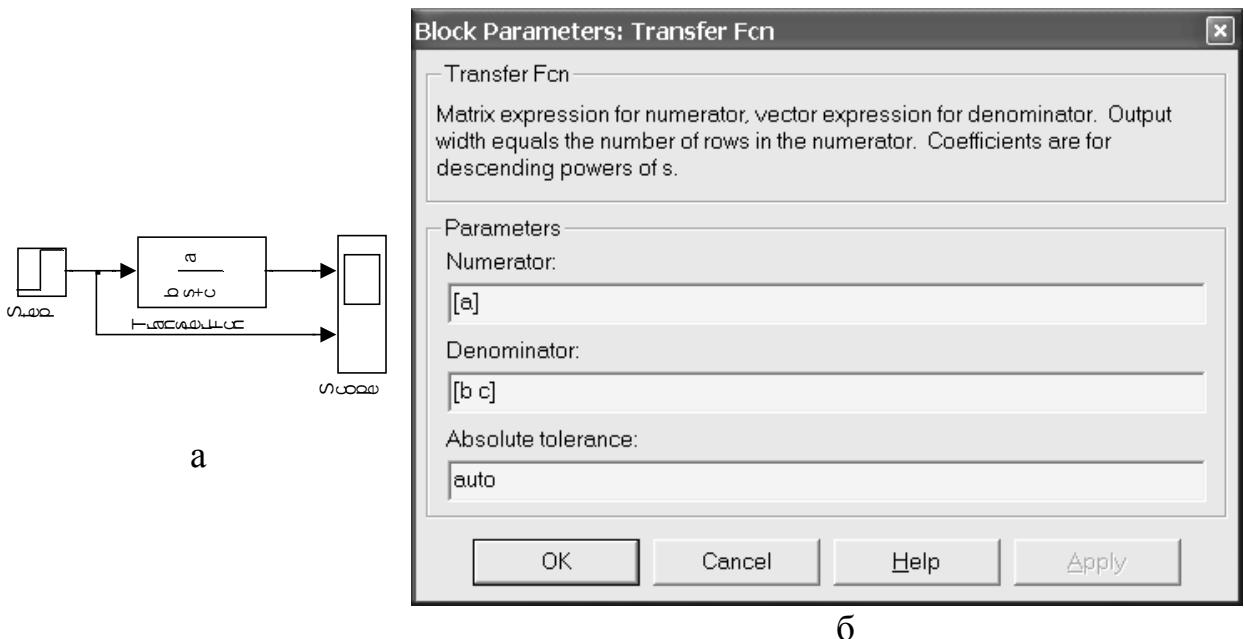


Рисунок 7.1 – Задание параметров модели в виде переменных

Ввод значений переменных можно выполнить в командном окне системы. После приглашения (символ `>>`) необходимо напечатать команды для присвоения переменным требуемых значений, например:

```
a=1
b=2
c=1
```

После этого можно приступить к моделированию.

В том случае, когда параметров много, целесообразно создать М-файл, содержащий операторы присваивания значений переменным, открыть его в окне редактора/отладчика и запустить на выполнение опцией меню **De-  
bug\Run**.

## 7.2 Форматирование графиков в окне блока *Scope*

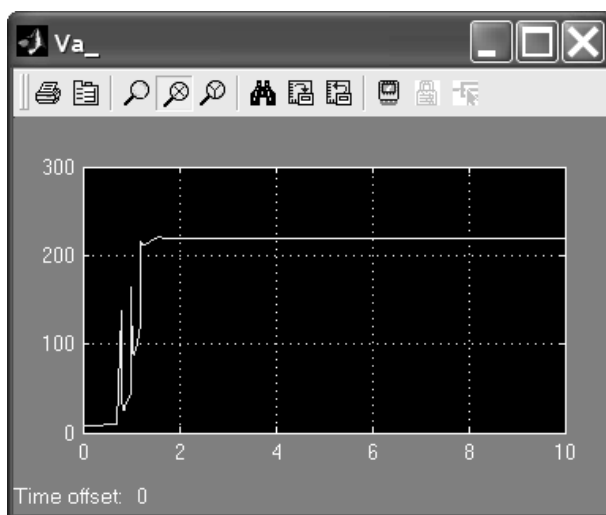
Окно блока **Scope**, отображающие графики сигналов, не имеет возможностей по изменению внешнего вида окна и графиков. Фактически доступен для изменения только масштаб графиков. Опции изменения цвета, шрифта, линий – недоступны.

Кроме того, темный цвет фона графиков, принятый в системе по умолчанию, затрудняет их печать и вставку в отчеты, рисунок 7.2, а.

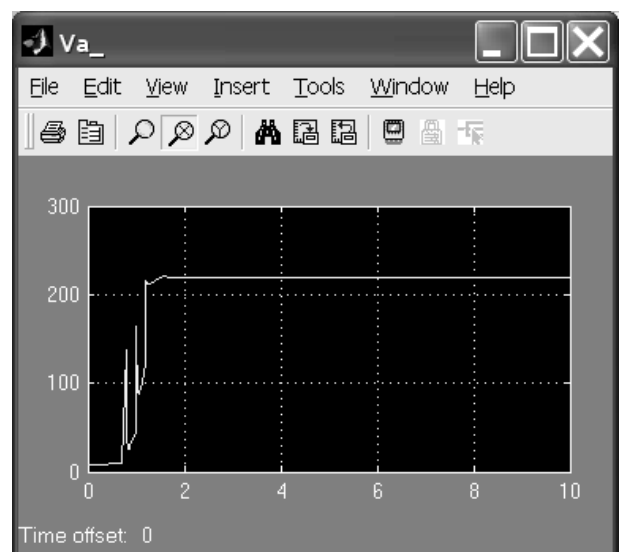
Для расширения возможности управлением внешним видом графиков блока осциллографа, следует выполнить следующие настройки, используя командное окно системы MATLAB.

```
set(0,'ShowHiddenHandles','On')
set(gcf,'menubar','figure')
```

В результате в окне блока появится меню, как это показано на рисунке 7.2.



а



б

Рисунок 7.2 – Окно блока **Scope** по умолчанию (а),  
окно с меню редактирования графика (б)

Используя команды меню **Edit/Figure Properties/.., Edit/Axes Properties/.., Edit/Current Object Properties/..**, можно изменять внешний вид окна, осей, самих графиков в соответствии со своими требованиями.

В данной работе все приведенные графики подвергались такому редактированию, в частности изменялся цвет окна (на белый), линий (на черный) и вводились подписи осей графиков.

### 7.3 Отображение рисунка в окне модели

Для повышения наглядности модели может потребоваться поместить на схеме рисунки или чертежи. Стандартные средства для этой операции отсутствуют.

Для того чтобы обойти данное ограничение, необходимо:

- создать пустую подсистему;
- выполнить ее маскирование (**Edit\Mask Subsystem**);
- открыть окно редактирования маски (**Edit\Edit Mask..**);
- на вкладке **Icon** в графе **Drawing Commands** ввести команду для считывания из файла и отражения графического образа, например:

```
image(imread('Picture_1.jpg','jpg')),
```

где первый параметр – имя графического файла, а второй – его тип.

Можно вставлять также файлы типа **\*.bmp**.

На рисунке 7.3 показан пример окна с созданным таким образом рисунком.

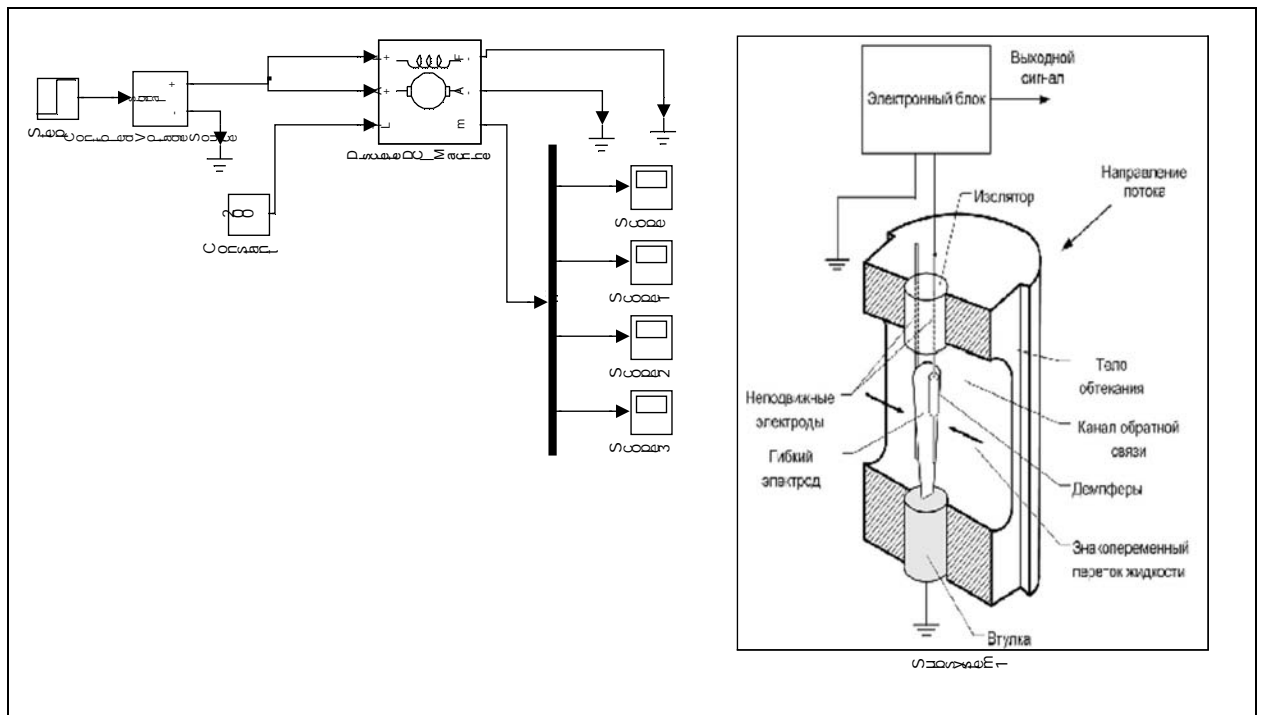


Рисунок 7.3 - Пример модели с внедренным в нее рисунком

Более обширный перечень практических советов приведен в книге И.В.Черных [7].

## Перечень блоков библиотекиDials & Gauges (шкалы и управляющие элементы)

В библиотеку входят 9 наборов блоков, общий вид некоторых из которых приведен на рисунках А.1 – А.9.

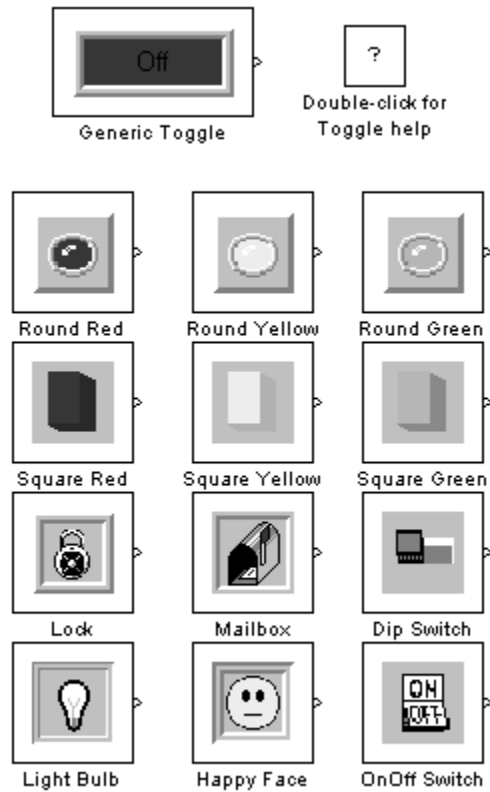
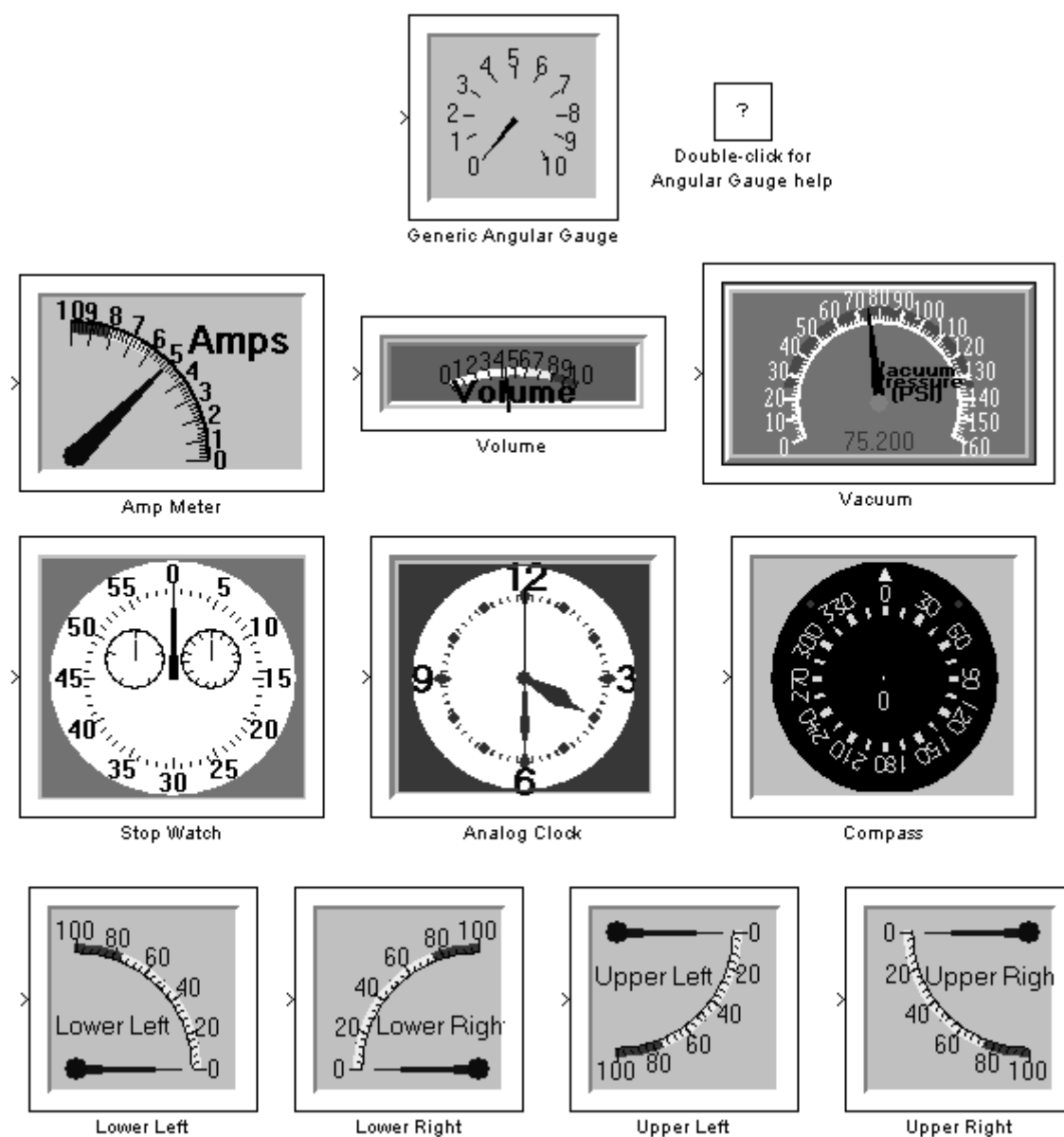


Рисунок А.1 – Блоки *Toggle ActiveX Control*

Блоки данной библиотеки представляют собой выключатели и кнопки с индикаторами. Индикаторы могут иметь различную форму, цвет и закон изменения свечения. Они могут мигать, загораться на определенное время, издавать звуковые сигналы.



*Рисунок А.2 – Блоки Angular Gauge ActiveX Control*

Блоки библиотеки многоцелевые, настраиваемые шаблоны для создания шкальные приборов. Их параметры настройки обеспечивают мощный инструмент для разработки приборов, обеспечивая полный контроль масштабов шкал, видов стрелок, шрифтов, заголовков и т.д.

Библиотека **Angular Gauge ActiveX Control** - идеальный элемент для технических интерфейсов.

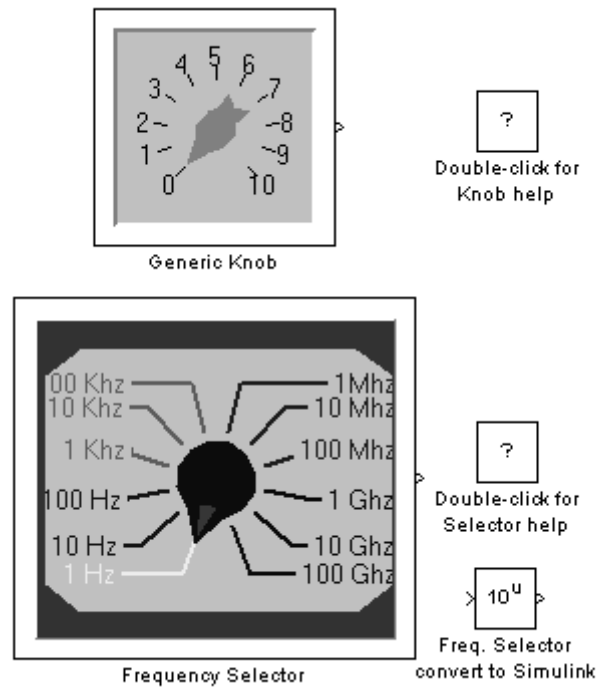
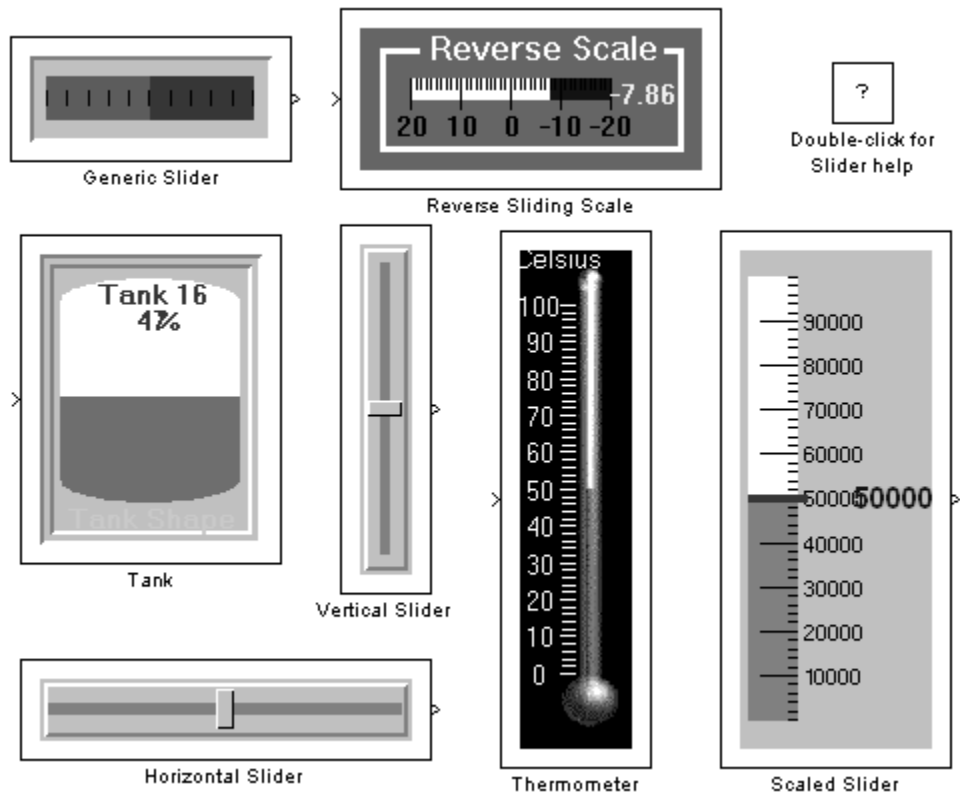


Рисунок А.3 – Блоки **Knob ActiveX Control**

Библиотека переключателей, позволяющая создавать переключатели практически любого требуемого вида.



*Рисунок А.4 – Блоки **Slider ActiveX Control***

Блоки для создания ползунковых элементов управления - универсальный инструмент, который позволяет создавать ползунки (слайдеры), задатчики, шкалы, и т.д. которые включают скользящий механизм. Их настройки легко позволяют быстро разработать любой нужный элемент данного типа. Ползунки управляются мышью и эта особенность позволяет создавать модели с динамическим изменением параметров в процессе работы, что часто необходимо для технических интерфейсов.



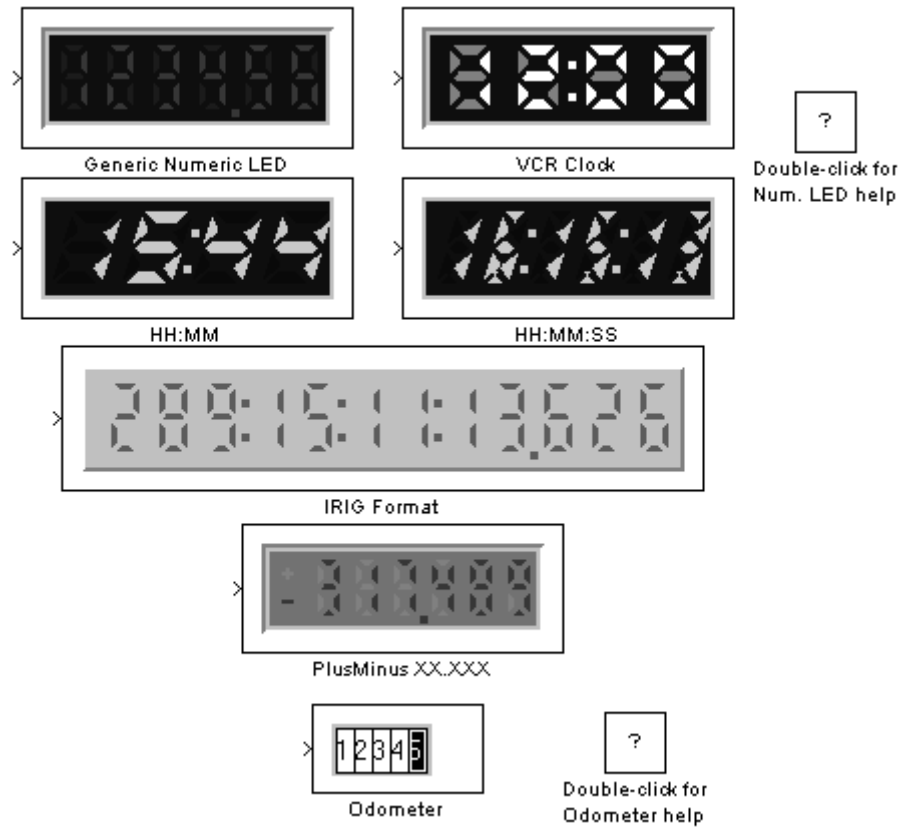


Рисунок A.5 – Блоки *Numeric LED ActiveX Control*

Блоки цифровой индикации предназначены для разработки цифровых дисплеев технических интерфейсов. Их параметры обеспечивают полную настройку размеров, цветов и других визуальных особенностей дисплеев. Можно создавать как цифровые, так и алфавитно-цифровые индикаторы.

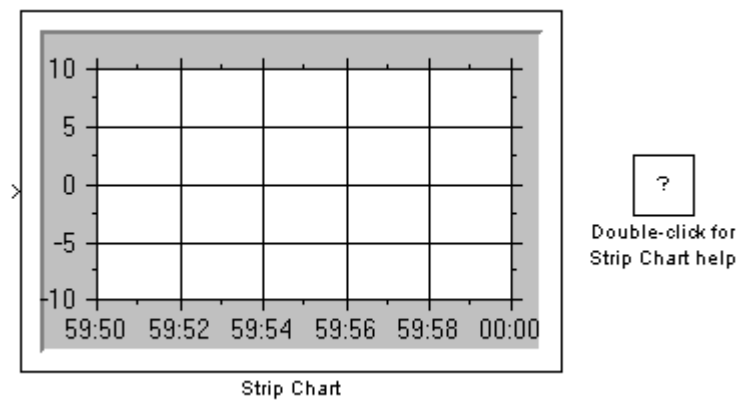


Рисунок A.6 – Блок *Strip Chart*

Блок многолучевого осциллографа, позволяет разрабатывать осциллографы с внешним видом близким к реальным приборам.

## Список литературы

1. Дэбни Дж., Хартман Т. Simulink 4.0. Секреты мастерства/Пер. с англ. М.Л. Симонова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 233 с.
2. Потемкин В.Г. Инструментальные средства MatLab 5.x. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 448 с.
3. SIMULINK. Simulink Reference. Version 5.0 The MathWorks, Inc., July 2002. 578 p.
4. Лурье М.С., Лурье О.М. Применение системы Matlab при изучении курса электротехники. Монография. СибГТУ, Красноярск, 2005, 200 с.
5. Вешеневский С.Н. Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей. М.: Госэнергоиздат, 1954, 327 с.
6. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. М.: Госэнергоиздат, 1960, 472 с.
7. Черных И.В. Simulink среда создания инженерных приложений. — М.: ДИАЛОГ - МИФИ, 2004. — 496 с.

Отв. редактор профессор А.А.Вайс  
 Редактор РИО Л.М. Буторина  
 Техн. редактор Т.П. Попова

---

Подписано в печать 25.01.2006 г.

Формат 60x84 1/16

Печать офсетная

Уч.-изд. л. 6,1

Заказ № 46/4

Бумага типографская

Усл. печ. л. 6,1

Тираж 200 экз.

Изд. № 563

Лицензия ЛР№020346 20.01.1997.

---

Редакционно-издательский отдел СибГТУ. 660049, Красноярск, пр. Мира, 82, тип. СибГТУ.

@ ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», 2006.