

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Кафедра «Электроподвижной состав»

Ю.С. Кабалык

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Методическое пособие по выполнению
лабораторных работ

Хабаровск
Издательство ДВГУПС
2012

УДК 621.317.329 (075.8)
ББК 0232 – 042я73
К 120

Рецензент

Доцент кафедры
«Электротехника, электроника и электромеханика» ДВГУПС,
кандидат технических наук
В. Г. Скорик

Кабалык, Ю. С.

К 120 Имитационное моделирование устройств электроподвижного состава : метод. пособие по выполнению лабораторных работ / Ю. С. Кабалык. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – 64 с. : ил.

В пособии приведена методика выполнения лабораторных работ на ЭВМ с использованием программы имитационного моделирования Matlab Simulink.

Предназначены для студентов 3–4-го курсов всех форм обучения, изучающих дисциплины «Математические модели технических систем в расчётах на ЭВМ» и «Математическое моделирование».

**УДК 621.317.329 (075.8)
ББК 0232 – 042я73**

© ДВГУПС, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Лабораторная работа № 1. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ОПЕРАЦИОННОЙ СРЕДОЙ SIMULINK И ПРОСТЕЙШИЕ МОДЕЛИ	5
1.1. Общие сведения о программе Matlab Simulink.....	5
1.2. Простейшие модели.....	10
1.3. Порядок выполнения работы.....	15
Контрольные вопросы	17
Лабораторная работа № 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ RLC-КОНТУРА	17
2.1. Теоретическое описание объекта моделирования.....	17
2.2. Блоки, необходимые для создания модели	18
2.3. Порядок выполнения работы.....	19
Контрольные вопросы	24
Лабораторная работа № 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ	25
3.1. Теоретическое описание объекта моделирования.....	25
3.2. Блоки, необходимые для создания модели	26
3.3. Порядок выполнения работы.....	28
Контрольные вопросы	32
Лабораторная работа № 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ	33
4.1. Теоретическое описание объекта моделирования.....	33
4.2. Блоки, необходимые для создания модели	34
4.3. Порядок выполнения работы.....	36
Контрольные вопросы	39
Лабораторная работа № 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ	39
5.1. Теоретическое описание объекта моделирования.....	39
5.2. Блоки, необходимые для создания модели	40
5.3. Порядок выполнения работы.....	41
Контрольные вопросы	46
Лабораторная работа № 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ЗОННО-ФАЗНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ	46
6.1. Теоретическое описание объекта моделирования.....	46
6.2. Блоки, необходимые для создания модели	49
6.3. Порядок выполнения работы.....	51
Контрольные вопросы	57
Лабораторная работа № 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОГО ИНВЕРТОРА ТОКА57	57
7.1. Теоретическое описание объекта моделирования.....	57
7.2. Блоки, необходимые для создания модели	59
7.3. Порядок выполнения работы.....	60
Контрольные вопросы	63
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	64

ВВЕДЕНИЕ

При создании современных сложных устройств большое время уделяется процессу проектирования. При этом должны соблюдаться высокая точность и надежность расчётов. Теоретический подход занимает относительно много времени, экспериментальный – материальных затрат. В этой связи применение моделирования позволяет в значительной степени улучшить процесс разработки новых технических систем.

При моделировании реальный объект с целью изучения заменяется аналогом, представляющим собой абстрагированную копию реального объекта. Наиболее простым методом моделирования является имитационное, поскольку оно обладает большей наглядностью и использует все мощности современной вычислительной техники. Точность имитационного моделирования зависит от разработанной модели и средства моделирования.

Применение имитационного моделирования на современных компьютерах (ЭВМ) позволяет подробно и глубоко изучать различные технические объекты в достаточной полноте, недоступной только теоретическим или физическим средствам изучения.

Знание студентами основ имитационного моделирования и опыт практического их применения позволит с большей эффективностью выполнять реальные проектные задачи.

Лабораторная работа № 1. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ОПЕРАЦИОННОЙ СРЕДОЙ SIMULINK И ПРОСТЕЙШИЕ МОДЕЛИ

Цель работы: изучение основ работы в среде Simulink и создание простейших моделей [1, 6].

1.1. Общие сведения о программе Matlab Simulink

Simulink – это среда имитационного моделирования. Для начала работы в Simulink необходимо запустить пакет Matlab. При запуске этого пакета появится окно, показанное на рис. 1.1.

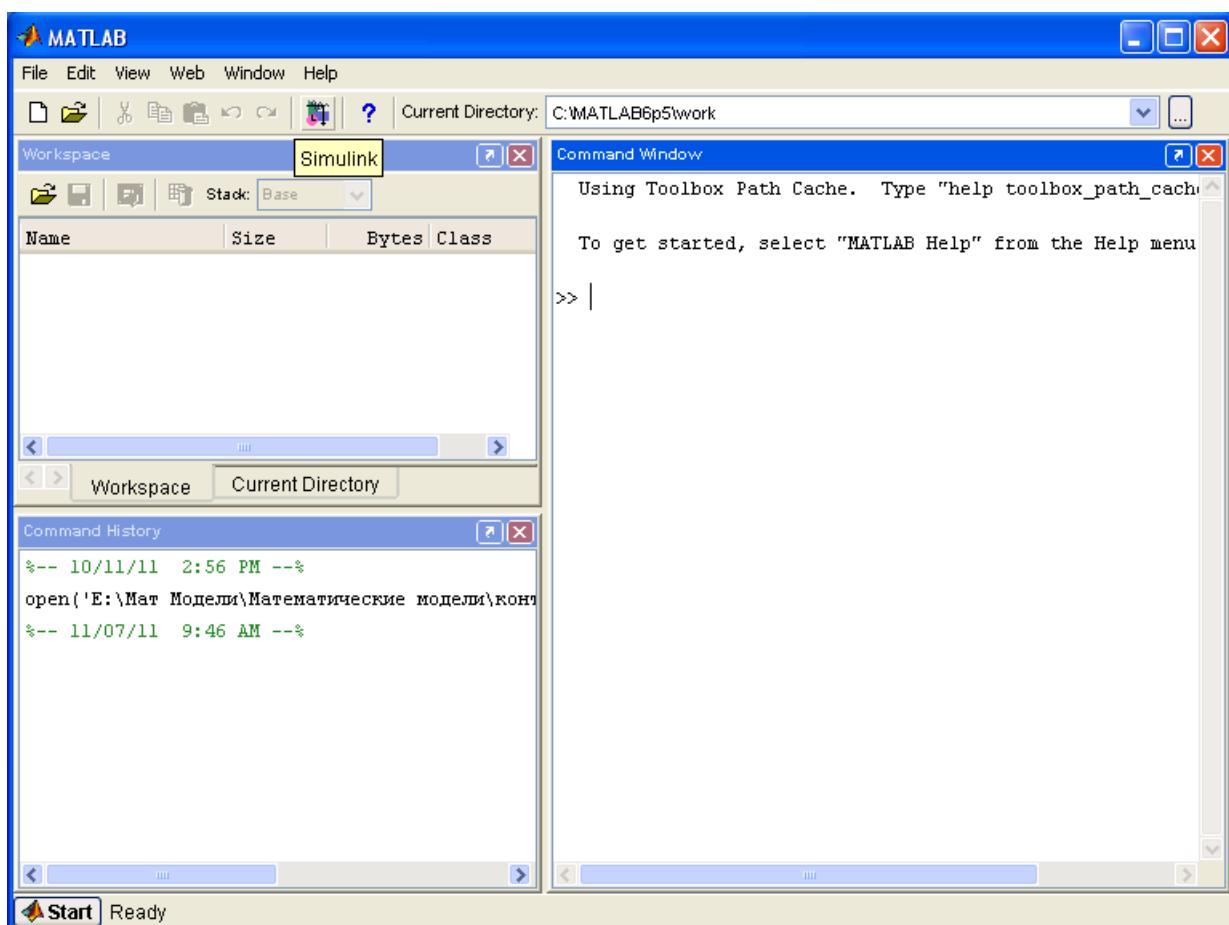


Рис.1.1. Окно программы Matlab

Программа Simulink запускается с помощью кнопки (Simulink) на панели инструментов командного окна Matlab (на рис. 1.1 на эту кнопку наведён курсор мыши). При нажатии этой кнопки открывается библиотека

компонентов. Библиотека компонентов содержит большое количество элементов (блоков), необходимых для создания модели. Из программы Simulink библиотека вызывается с помощью кнопки  (Library Browser), расположенной на панели инструментов. Внешний вид обозревателя окна библиотеки представлен на рис.1.2.

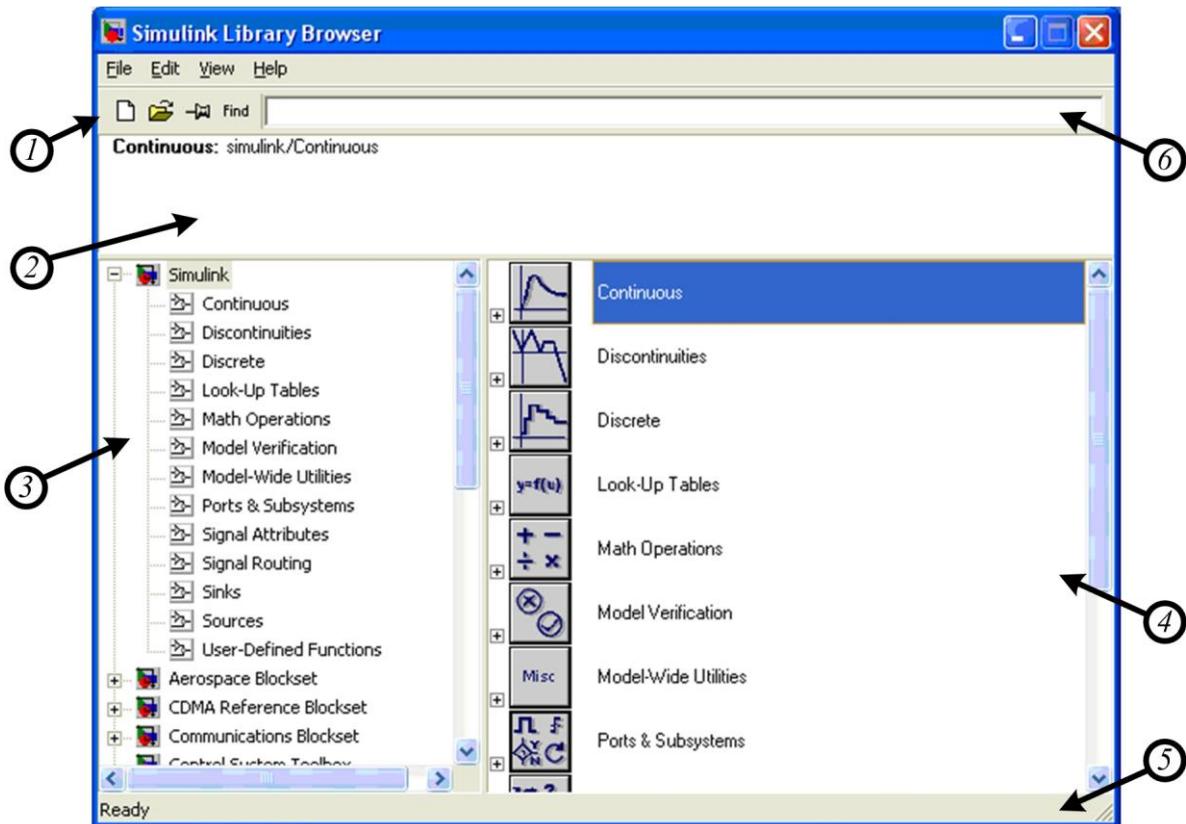


Рис. 1.2. Внешний вид обозревателя окна библиотеки: 1 – панель инструментов с кнопками наиболее часто используемых команд; 2 – окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном разделе библиотеки и блоке; 3 – список разделов библиотеки; 4 – список вложенных блоков или разделов библиотеки. Показывается содержимое раздела, указанного в списке разделов библиотеки; 5 – строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию; 6 – строка поиска блоков

Для поиска необходимого блока проще всего воспользоваться автоматическим поиском по названию. Для этого в строку поиска записывается название (можно только несколько букв из названия) искомого блока и нажимается клавиша **Enter**. После этого начинается автоматический поиск компонента по введенному названию. Если требуемый блок найден, то он отображается в списке вложенных блоков как выбранный. Если при

если найденный блок не является искомым, а имеется лишь совпадение в названии, то следует повторно нажать клавишу **Enter**, после чего начнётся дальнейший поиск блоков по заданному названию.

Для создания модели в среде Simulink необходимо создать новый файл с помощью команды **File**→**New**→**Model** или с помощью кнопки  (New model). После выполнения этой команды появится окно, в котором строится модель. Открытие созданной ранее модели происходит с помощью команды **File**→**Open**.

После того, как необходимый блок найден в библиотеке, его необходимо переместить в окно модели. Это осуществляется «перетаскиванием» необходимого блока из списка обозревателя библиотеки в рабочее поле окна модели с помощью курсора (левой клавишей мыши).

После перемещения блоки необходимо расставить в нужном порядке. Для удаления блока необходимо его выделить и нажать клавишу **Delete**. Для операций над блоком необходимо нажать на нём правой кнопкой мыши и выбрать пункт **Format**. Этот пункт имеет следующие команды:

Font – формат текста названия блока;

Hide Name (**Show Name**) – убрать название (показать название);

Flip Name – переместить название на противоположную сторону блока;

Flip Block – зеркально отразить блок;

Rotate Block – повернуть блок по часовой стрелке (**Clockwise**) или против часовой стрелки (**Counterclockwise**);

Show Drop Shadow (**Hide Drop Shadow**) – показать тень (убрать тень).

Копирование блоков можно как с помощью стандартных сочетаний клавиш Windows, так и с помощью клавиши **Ctrl**. Во втором случае необходимо зажать клавишу **Ctrl**, а затем перетащить соответствующий блок в необходимое место.

Также, если требуется, изменяются параметры блоков. Параметры блока вызываются двойным щелчком левой кнопкой мыши по соответствующему блоку. При изменении численных параметров в качестве десятичного делителя используется точка, а не запятая. После редактирования параметров следует нажать клавишу **OK** или **Apply**.

На рис. 1.3 представлено окно модели с блоками *Scope*, *Constant* и *Display*.

После расстановки блоков в рабочем поле модели их необходимо соединить. Блоки соединяются через входы и выходы. Вход обозначается стрелкой, направленной в блок, а выход – стрелкой, направленной из блока.

ка (на рис. 1.3 элемент *Scope* имеет один вход и не имеет выхода, а элемент *Constant* имеет один выход и не имеет входа). Для соединения двух блоков необходимо нажать на выход первого блока, а затем, не отпуская клавиши мыши, провести линию связи до входа второго блока. Если соединение произведено правильно, то линия связи будет сплошной. В случае неправильного (незаконченного) соединения линия связи будет штриховой красного цвета. При этом следует помнить, что таким способом нельзя соединить два входа или два выхода. Для этого требуются специальные соединители, о которых будет рассказываться позже. Если требуется соединить три блока, то следует сначала провести линию связи между двумя из них, а вход (выход) третьего соединить с созданной линией связи, соединяющей два первых блока. Можно также соединение с третьим блоком осуществлять от линии связи. Для этого соединение необходимо производить правой кнопкой мыши.

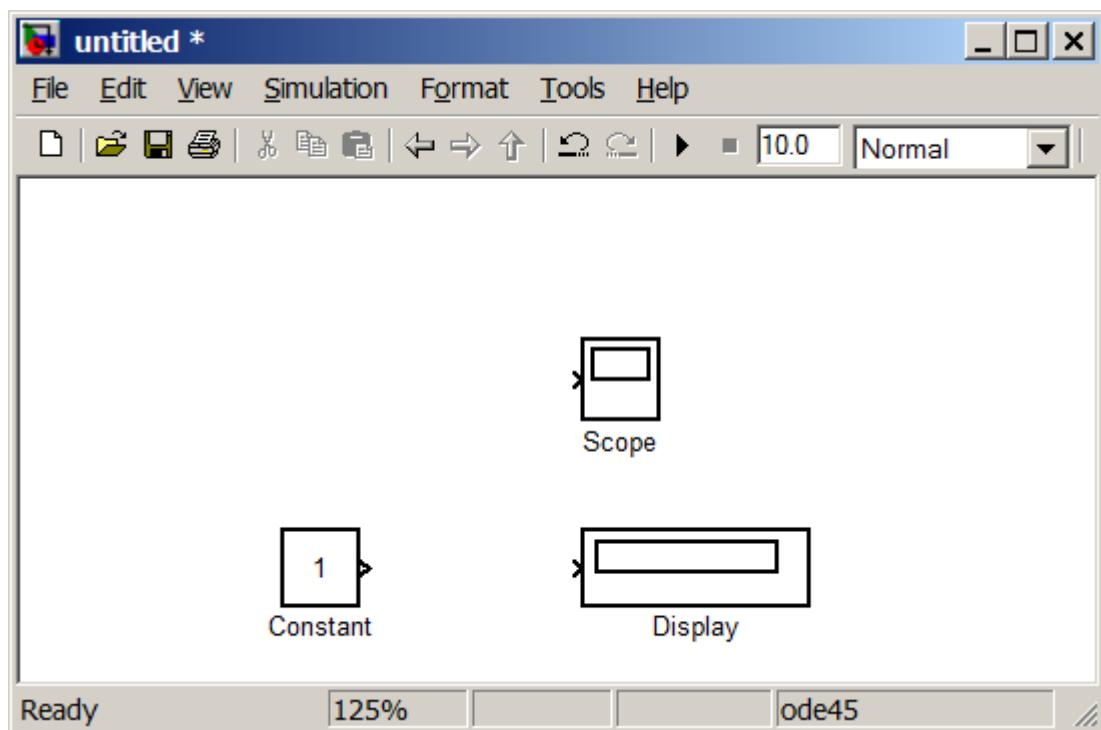


Рис. 1.3. Окно модели с блоками

Также существует другой способ соединения блоков. Для этого нужно выделить первый блок и нажать клавишу **Ctrl**. Не отпуская этой клавиши, следует нажать на второй блок. При этом будет проведена линия связи между выходом первого блока и входом второго блока. Если число выхо-

дов и входов больше одного, то будет проведено столько линий связи, сколько имеется выходов на первом элементе.

На рис. 1.4 показано окно модели с соединёнными блоками.

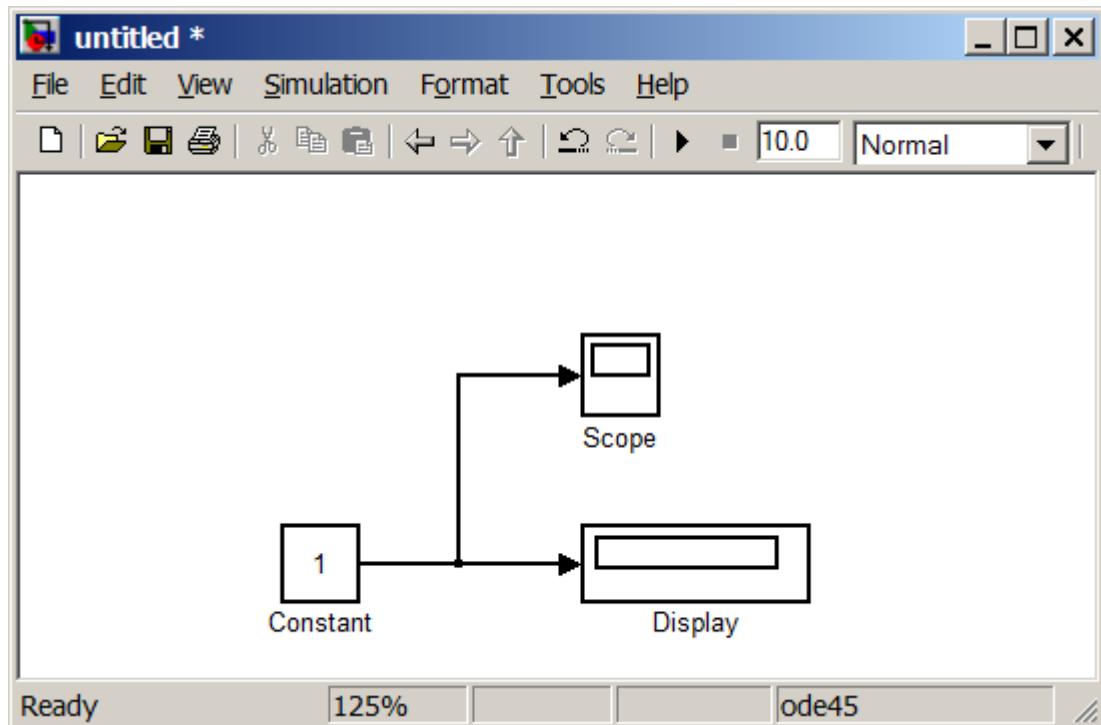


Рис.1.4. Окно модели с соединёнными блоками

Сохранение модели производится с помощью команды **File→Save As**. Имя файла не должно содержать более 64 символов, должно начинаться с буквы и содержать только алфавитно-цифровые символы латиницы. Такое же требование (за исключением количества символов) относится к пути файла.

Перед запуском модели необходимо установить параметры моделирования. Задание этих параметров выполняется в окне настройки параметров расчёта, открываемом командой **Simulation→Simulation Parameters**. Вид окна настройки параметров расчёта показан на рис. 1.5.

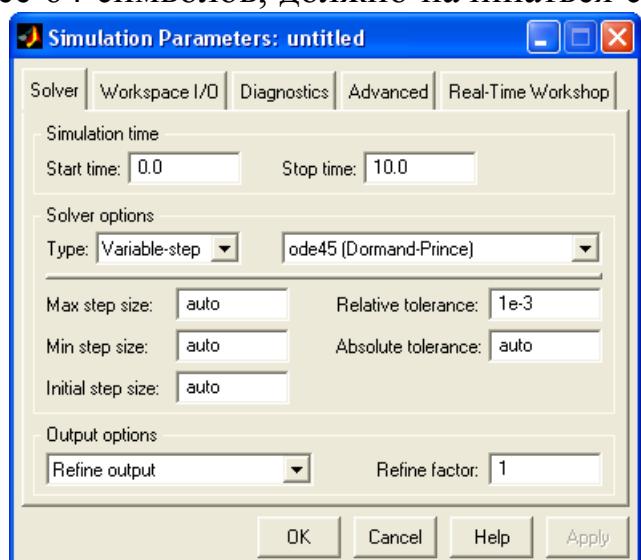


Рис. 1.5. Вид окна настройки параметров расчёта

В левой части окна находится список групп настраиваемых параметров. Установка параметров моделирования выполняется с помощью панели **Solver**. Элементы этой панели разделены на две группы: **Simulation time** (интервал времени моделирования) **Solver options** (параметры расчёта).

Интервал времени моделирования задаётся путём указания начального (Start time) и конечного (Stop time) значений времени расчёта. Как правило, начальное время указывается равным нулю, а конечное время зависит от условий поставленной задачи.

В параметрах расчёта необходимо выбрать метод интегрирования (Type): с фиксированным шагом (Fixed-step) или с переменным шагом (Variable-step). Максимальный шаг интегрирования задаётся в графе **Max Step Size**. Также в параметрах расчёта необходимо указать один из следующих методов:

ode45 – одношаговые явные методы Рунге-Кутта 4-го и 5-го порядка;

ode23 – одношаговые явные методы Рунге-Кутта 2-го и 3-го порядка;

ode113 – многошаговый метод Адамса-Башвортса-Мултона переменного порядка;

ode15s – многошаговый метод переменного порядка (от 1 до 5), использующий формулы численного дифференцирования;

ode23s – одношаговый метод, использующий модифицированную формулу Розенброка 2-го порядка;

ode23t – метод трапеций с интерполяцией;

ode23tb – неявный метод Рунге-Кутта в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка в последующем.

После редактирования параметров следует нажать клавишу **OK** или **Apply**.

Запуск расчёта (моделирования) выполняется с помощью команды **Simulation→Start** или нажатием кнопки  на панели инструментов.

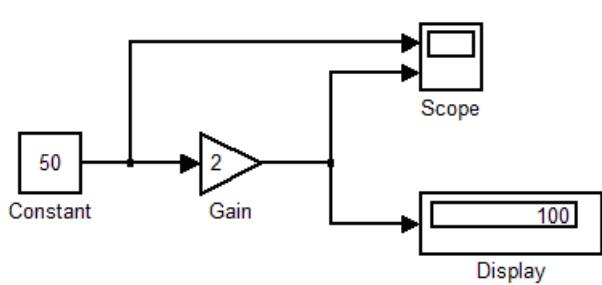


Рис. 1.6. Модель умножения числа (после проведения моделирования)

1.2. Простейшие модели

Рассмотрим простейшие модели. На рис. 1.6 представлена модель со следующими элементами:

Constant – генератор постоянного сигнала. На выходе создаёт постоянный сигнал. Величина сигнала задаётся в параметрах (Constant value).

Gain – линейный умножитель. На выходе создаёт сигнал, равный входному сигналу, умноженному на заданное значение. Величина множителя задаётся в параметрах (*Gain*). Для получения математической функции деления необходимо в строку *Gain* записывать « $1/x$ », где x – величина, на которую требуется поделить входной сигнал.

Scope – осциллограф. Строит график зависимости входного сигнала от времени. Для просмотра графика необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на блоке. Осциллограф может иметь несколько входов. Для этого необходимо в параметрах осциллографа (кнопка ) указать количество входов (Number of axes). В случае, когда входной сигнал имеет значения больше или значительно меньше шкалы графика, следует нажимать на кнопку  (Autoscale). Для увеличения масштаба используются кнопки:  – увеличение масштаба по заданной области;  – увеличение масштаба по горизонтальной оси;  – увеличение масштаба по вертикальной оси. Также в параметрах можно задавать предел точек, из которых строится график. Во всех лабораторных работах необходимо исключить такой предел точек. Для этого нужно в настройках убрать галочку «*Limit Data Points to Last*».

Display – дисплей. Показывает величину входного сигнала в виде числовой записи на самом блоке.

В параметрах можно менять формат записи числа (целое число из пяти цифр, число с символами степени десяти и т. д.).

На рис. 1.6 элемент *Constant* имел значение 50, а элемент *Gain* – значение 2. Начальное время моделирования было 0, а конечное – 1. Метод моделирования – *ode23s*. После того как схема собрана и параметры установлены, необходимо запустить моделирование. Осциллограмма, построенная элементом *Scope*, показана на рис. 1.7.

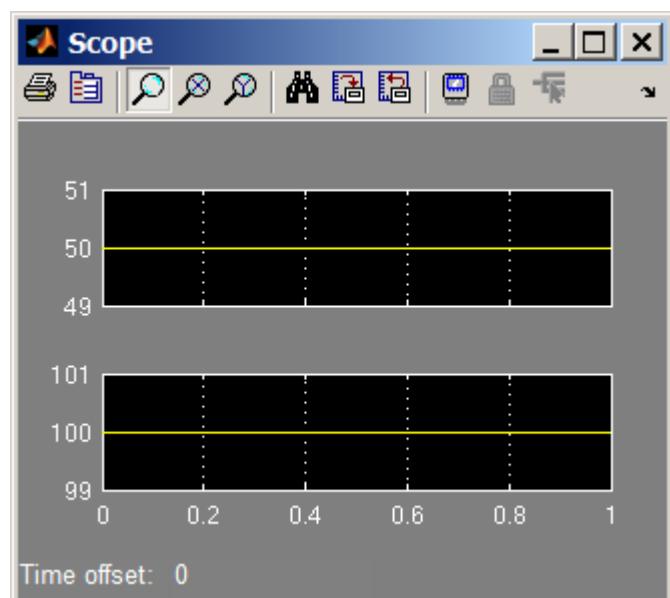


Рис. 1.7. График, построенный элементом *Scope*

Анализируя представленную модель, можно наглядно убедиться в работоспособности элементов: с выхода элемента *Constant* на вход элемента *Gain* поступает сигнал, равный 50. Элемент *Gain* умножает этот сигнал на заданное значение 2 и на его выходе образуется сигнал, равный 100.

На следующих моделях можно рассмотреть моделирование электрических цепей. При этом будут использованы следующие блоки:

- *DC voltage source* – источник постоянного напряжения. В параметрах можно изменять величину генерируемого напряжения (Amplitude), В. Внешний вид блока показан на рис. 1.8, *a*.

- *AC voltage source* – источник переменного напряжения. Выходное напряжение изменяется по синусоидальному закону. В параметрах изменяется амплитуда напряжения (Amplitude), В; начальная фаза (Phase), эл. град.; частота (Frequency), Гц. Внешний вид блока показан на рис. 1.8, *б*.

- *Series RLC Branch* – последовательный RLC контур. Представляет собой последовательно соединённые активное, индуктивное и ёмкостное сопротивление. В параметрах можно изменять активное сопротивление (Resistance), Ом; индуктивность (Inductance), Гн; ёмкость (Capacitance), Ф. Внешний вид блока показан на рис. 1.8, *в*.

- Для получения только одного сопротивления необходимо в элементе *Series RLC Branch* исключить остальные два. Исключения сопротивлений осуществляются проставлением для них следующих параметров: для активного сопротивления – «0», для индуктивного сопротивления – «0», для ёмкостного сопротивления – «inf» (англ. *infinity* – бесконечность). На рис. 1.8, *г* показан элемент, представляющий два последовательно соединённых сопротивления RL. Для получения такого элемента в *Series RLC Branch* заданы параметры R = 10; L = 10; C = inf.

- *Ground* – заземление. Внешний вид блока показан на рис. 1.8, *д*, *е*. Может быть с выходом (рис. 1.8, *д*) или с входом (рис. 1.8, *е*).

- *Voltage measurement* – датчик напряжения. На выходе создаёт сигнал, численно равный разности потенциалов на входе блока (между входами «+» и «-»). Внешний вид блока показан на рис. 1.8, *ж*.

- *Current measurement* – датчик тока. На выходе создаёт сигнал, численно равный силе тока, проходящего через него (между входами «+» и «-»). Внешний вид блока показан на рис. 1.8, *и*.

T-connector – соединитель линий связи. Используется для соединения двух выходов с одним входом. Внешний вид блока показан на рис. 1.8, *к*.

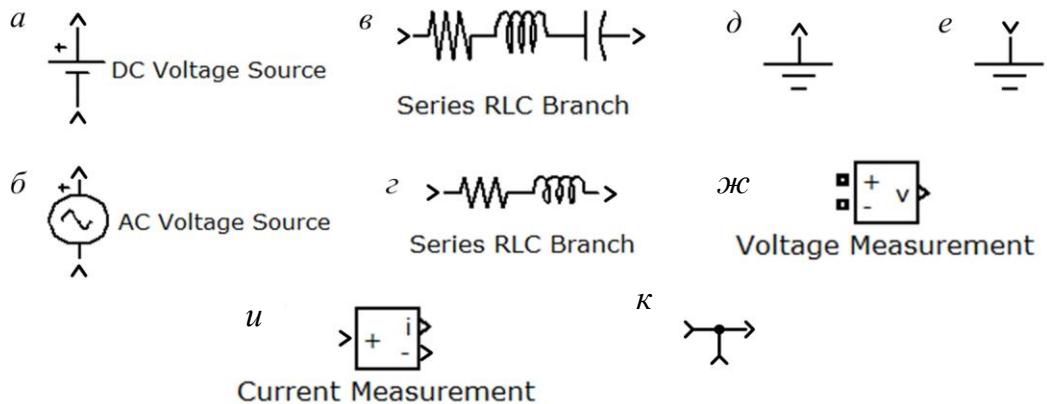


Рис. 1.8. Элементы, необходимые для создания моделей электрических цепей

На рис. 1.9 представлена модель простой электрической цепи постоянного тока, содержащей источник постоянного напряжения и активное сопротивление. Источник постоянного напряжения генерирует напряжение величиной $U = 10$ В, активное сопротивление составляет $R = 3$ Ом. Время моделирования 0–2 с; метод расчёта *ode23s*.

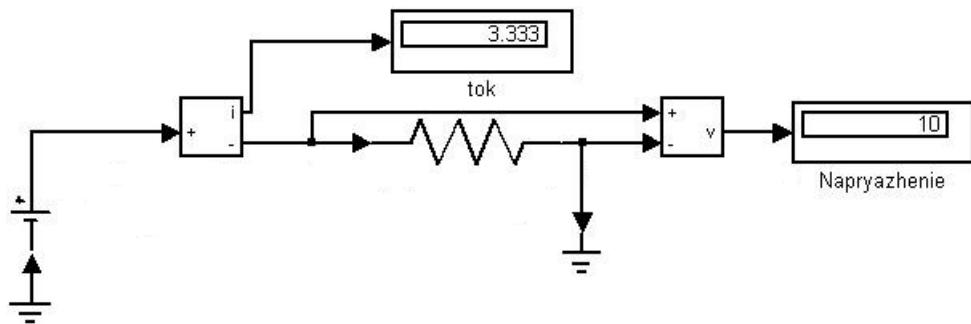


Рис. 1.9. Модель простой электрической цепи постоянного тока

В модели названия блоков *Constant* изменены, а названия остальных элементов убраны. Для изменения названия блока необходимо щелкнуть по его названию левой кнопкой мыши.

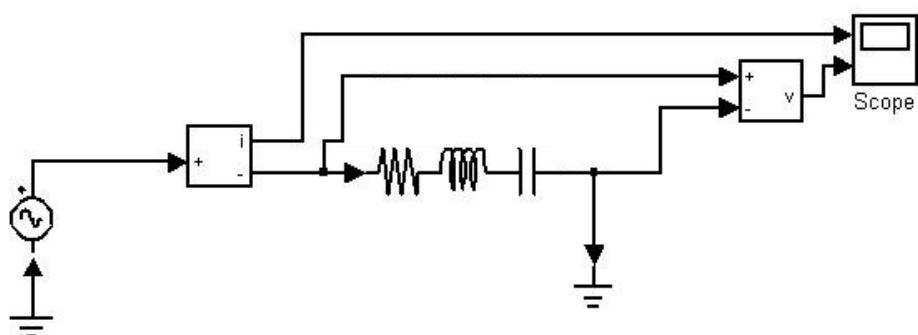
Правильность расчёта составленной модели (рис. 1.9) можно проверить с помощью закона Ома:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{3} = 3,333 \text{ A.}$$

Проведённый расчёт подтверждает правильность моделирования.

На рис. 1.10 представлена модель простой электрической цепи переменного тока, содержащая источник переменного напряжения и последовательно соединённые активное, индуктивное и ёмкостное сопротивления. Параметры источника напряжения: амплитуда – 10 В, частота 50 Гц, фаза – 0. Параметры RLC: $R = 0,1 \text{ Ом}$, $L = 0,001 \text{ Гн}$, $C = 0,15 \text{ Ф}$. Время моделирования 0,9–1 с; метод расчёта *ode23s*; максимальный шаг интегрирования 0,0001.

a



б

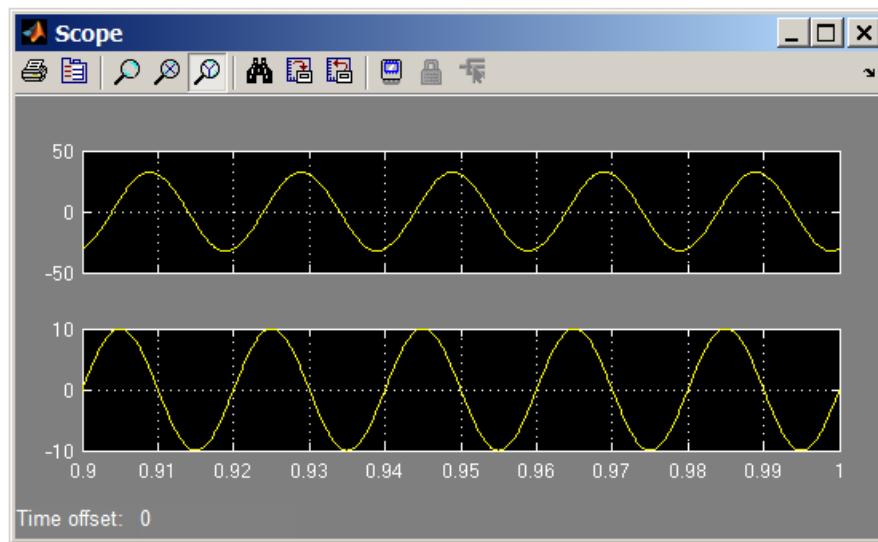


Рис. 1.10. Модель простой электрической цепи переменного тока (*а*) и результаты её расчёта на осциллографе (*б*)

Правильность моделирования составленной модели (рис. 1.10) можно также проверить с помощью закона Ома:

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{10}{0,1 + \frac{1}{j314,16 \cdot 0,15} + j314,16 \cdot 0,001} = 10,437 - j30,574 = 32,3e^{-71,2} A.$$

Проведённый расчёт подтверждает правильность моделирования.

1.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить интерфейс программы и выучить основные понятия.
2. Создать простейшие модели (рис. 1.6, 1.9, 1.10) и произвести их расчёт.
3. Создать в Simulink простейшую модель деления числа. Модель создавать по аналогии с рассмотренной на рис. 1.6. Числа выбираются индивидуально для каждого студента из табл. 1.1. Сохранить внешний вид схемы модели и полученные осциллограммы.

Таблица 1.1
Варианты для индивидуального задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Первое число (числитель)	20	15	10	5	10	15	20	25	30	25	15	10	15	20
Второе число (знаменатель)	2	3	4	5	6	7	6	5	4	3	2	3	4	5

4. Создать и рассчитать в Simulink каждую из электрических схем постоянного тока, представленных на рис. 1.11. Модель создавать по аналогии с рассмотренной на рис. 1.9. Величина эдс источника напряжения и параметры сопротивлений выбираются индивидуально для каждого студента из табл. 1.2. Сохранить внешний вид схемы модели. Проверить правильность моделирования с помощью первого закона Ома.

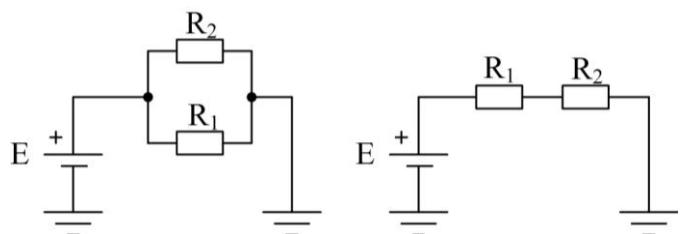


Рис. 1.11. Электрические схемы постоянного тока для индивидуальной работы

Таблица 1.2
Варианты для индивидуального задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
E, В	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
R ₁ , Ом	10	12	14	16	18	20	22	24	22	20	18	16	14	12
R ₂ , Ом	2	3	4	5	6	7	6	5	4	3	2	3	4	5

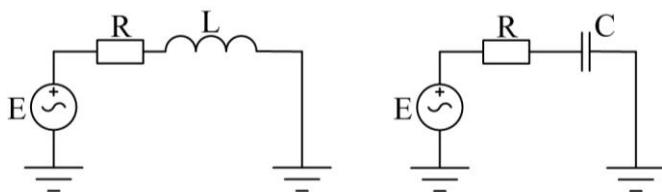


Рис. 1.12. Электрические схемы переменного тока для индивидуальной работы

5. Создать и рассчитать в Simulink одну из электрических схем переменного тока, представленных на рис. 1.12. Модель создавать по аналогии с рассмотренной на рис. 1.10. Величина эдс источника напряжения и параметры сопротивлений выбираются индивидуально для каждого студента из табл. 1.3. Частота источника напряжения – 50 Гц. Сохранить внешний вид схемы модели и полученные осциллограммы. Проверить правильность моделирования с помощью первого закона Ома.

Таблица 1.3
Варианты для индивидуального задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
E _{амп} , В	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
R, Ом	10	12	14	16	18	20	22	24	22	20	18	16	14	12
L, Гн	2	3	4	5	6	7	6	5	4	3	2	3	4	5

6. По окончании работы сделать вывод.

Содержание отчёта:

- цель работы;
- введение (о программе Simulink);
- 3 рисунка схем и 2 осциллограммы простейших моделей (п. 2);
- рисунок схемы модели деления числа (п. 3);
- 2 рисунка схем моделей цепей постоянного тока (п. 4);
- проверка правильности моделирования с помощью закона Ома (п. 4);

- 2 рисунка схем и 2 осциллограммы цепей моделей переменного тока (п. 5);
- проверка правильности моделирования с помощью закона Ома (п. 5);
- вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое Simulink?
2. Основные элементы окна обозревателя библиотеки.
3. Как создаются модели в Simulink?
4. Основные операции над блоками.
5. Основные параметры моделирования.
6. Какие блоки использовались в работе? Какие они выполняют функции?

Лабораторная работа № 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО RLC КОНТУРА

Цель работы: исследовать реакцию последовательного RLC-контура на изменение питающего напряжения [6].

2.1. Теоретическое описание объекта моделирования

В работе требуется произвести моделирование электрической схемы с источником питания и последовательно соединёнными RLC-сопротивлениями (RLC-контур). Принципиальный вид изучаемой электрической схемы показан на рис. 2.1.

В работе необходимо изучить реакцию схемы на изменение величины напряжения источника питания. При продолжительном приложении постоянного напряжения к RLC-контру, протекающий по нему ток будет равен нулю, поскольку ёмкость не проводит постоянный ток. Однако если напряжение источника питания мгновенно изменяется, то начинается переходной процесс, вызывающий свободные колебания тока в цепи.

Если в контуре отсутствует активное сопротивление, то свободные колебания тока являются гармоническими (рис. 2.2, а). При таких колебаниях происходит превращение электрической энергии конденсатора в маг-

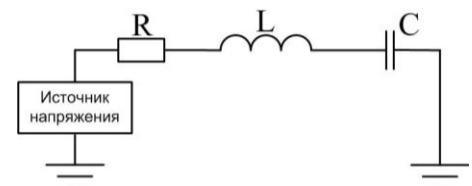


Рис. 2.1. Принципиальный вид изучаемой электрической схемы

нитную энергию катушки и наоборот. Такие колебания будут протекать бесконечно долго с частотой

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.1)$$

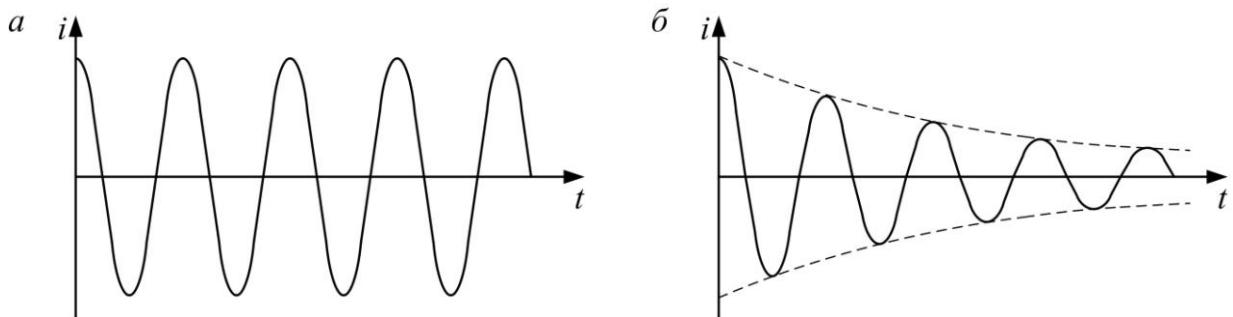


Рис. 2.2. Гармонические (а) и затухающие (б) колебания тока

Однако все реальные контуры содержат активное сопротивление, поэтому с течением времени часть энергии будет рассеиваться в виде теплоты. В этом случае колебания будут затухающими (рис. 2.2, б).

2.2. Блоки, необходимые для создания модели

Для выполнения лабораторной работы, кроме блоков изученных ранее, потребуются следующие блоки:

- *Sine Wave* – генератор синусоидально изменяющегося сигнала. В настройках блока задаются следующие основные параметры: величина амплитуды генерируемого сигнала (Amplitude), В; частота генерируемого сигнала (Frequency), рад/с; фаза генерируемого сигнала (Phase), рад. Внешний вид блока показан на рис. 2.3, а.

- *XY Graph* – блок построения двумерных графиков. Строит график зависимости между входными сигналами. Данные для горизонтальной оси берутся по первому (верхнему) входу, а для вертикальной оси – по второму (нижнему) входу. График отображается автоматически сразу после начала расчёта. В настройках блока задаются следующие основные параметры: минимальное значение по горизонтальной оси (x-min); максимальное значение по горизонтальной оси (x-max); минимальное значение по вертикальной оси (y-min); максимальное значение по вертикальной оси (y-max). Внешний вид блока показан на рис. 2.3, б.

- *Step* – генератор ступенчато изменяющегося сигнала. На выходе создаёт постоянный сигнал, который изменяет своё значение до заданной величины в заданный момент времени. В настройках блока задаются следующие основные параметры: время переключения (Step time), с; значение сигнала до переключения (Initial value); значение сигнала после переключения (Final value). Внешний вид блока показан на рис. 2.3, в.

- *Controlled Voltage Source* – управляемый источник напряжения. На выходе (между выходами «+» и «-») создаёт разность потенциалов (в вольтах), численно равную входному сигналу (на входе «Signal»). Внешний вид блока показан на рис. 2.3, г.

- *Sum* – сумматор. Производит суммирование или вычитание входных сигналов. Количество входов и знак (суммирование или вычитание) каждого входа задаются в настройках блока в строке List of signs в виде последовательности необходимых знаков (+, -). Например, если требуется от величины сигнала с первого входа отнять величину сигнала со второго и третьего входов, то необходимо записать [+ - -] (без пробелов и квадратных скобок). Во всех лабораторных работах при использовании блока необходимо в его настройках в строке «Output Data Type Mode» выбрать параметр «Same As First Input». В настройках блока также можно изменить его внешний вид (Icon shape): круглый (Round) или прямоугольный (Rectangular). Внешний вид блока показан на рис. 2.3, д и е.

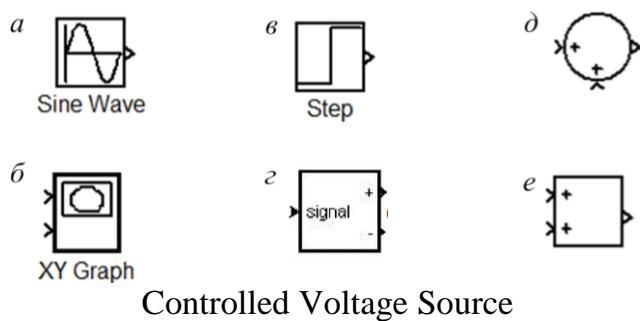


Рис. 2.3. Элементы, необходимые для выполнения лабораторной работы

Помимо представленных блоков, в работе используются *series RLC branch*, *voltage measurement*, *current measurement*, *scope*, *ground*.

2.3. Порядок выполнения работы

1. Создать модель RLC-контура, где напряжение источника питания изменяется ступенчато. Сохранить внешний вид модели и полученные осциллограммы и графики.

Основная электрическая схема, используемая в работе и созданная в Simulink, представлена на рис. 2.4. Параметры моделирования для всех вариантов работы должны быть следующими: время моделирования 0–0,1 с; метод моделирования ode23s. Параметры сопротивлений: активное – выбирается согласно варианту из табл.2.1; индуктивность – 0,01 Гн; ёмкость – 0,001 Ф.

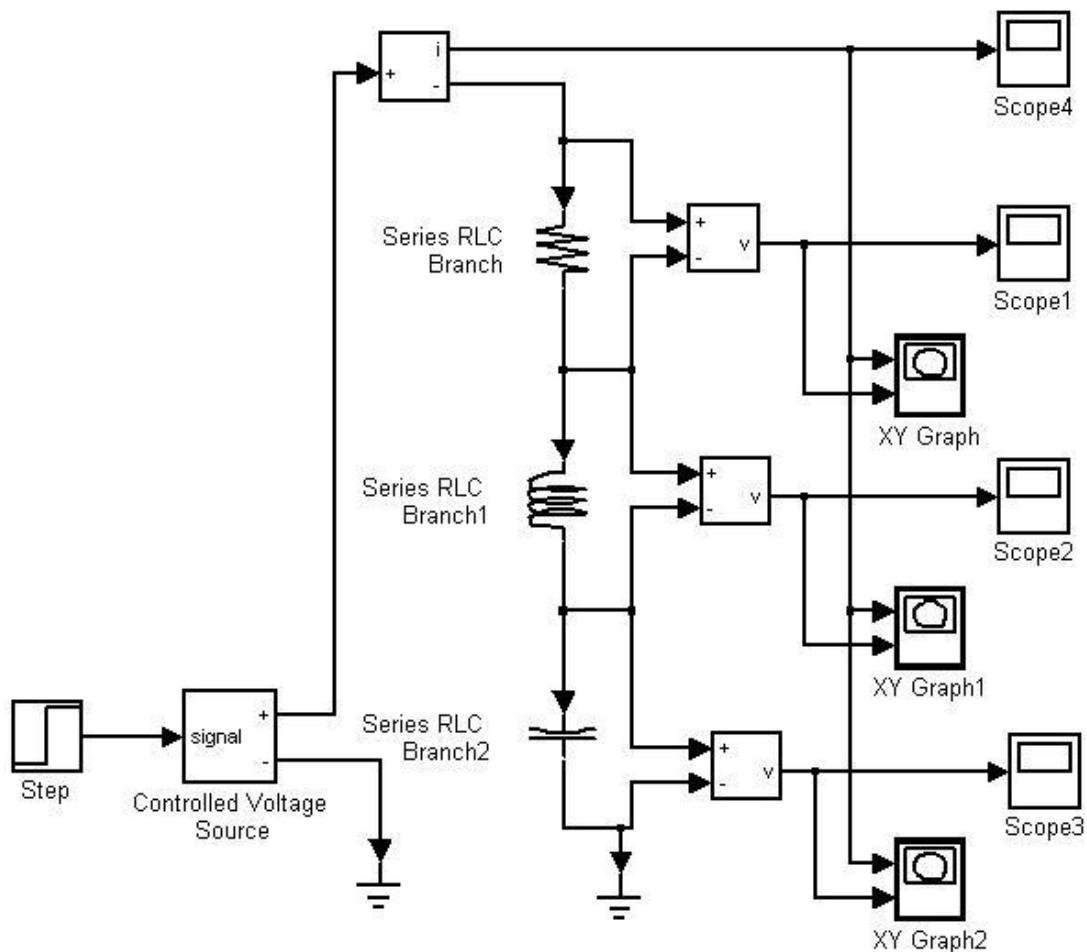


Рис.2.4. Модель для изучения реакции схемы, созданная в Simulink

Таблица 2.1
Варианты для индивидуального задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R, Ом	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
E, В	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625

Ступенчатое изменение питающего напряжения осуществляется следующим образом. RLC-контура питается от управляемого источника напряжения, который управляет генератором ступенчато изменяющегося сигнала.

Параметры элемента *step*: время переключения – 0,01 с, значение сигнала до переключения – 0; значение сигнала после переключения – выбирается согласно варианту из табл. 2.1 в строке «Е». После установки необходимых параметров можно начинать расчёт модели. При этом границы осей графиков с элементов *XY Graph* необходимо задать такими, чтобы построенные линии отходили от крайнего значения оси на 10–20 значений. Если заданы правильные параметры, то элементы *Scope* должны построить осциллограммы, аналогичные представленным на рис. 2.5, а элементы *XY Graph* – графики, аналогичные представленным на рис. 2.6.

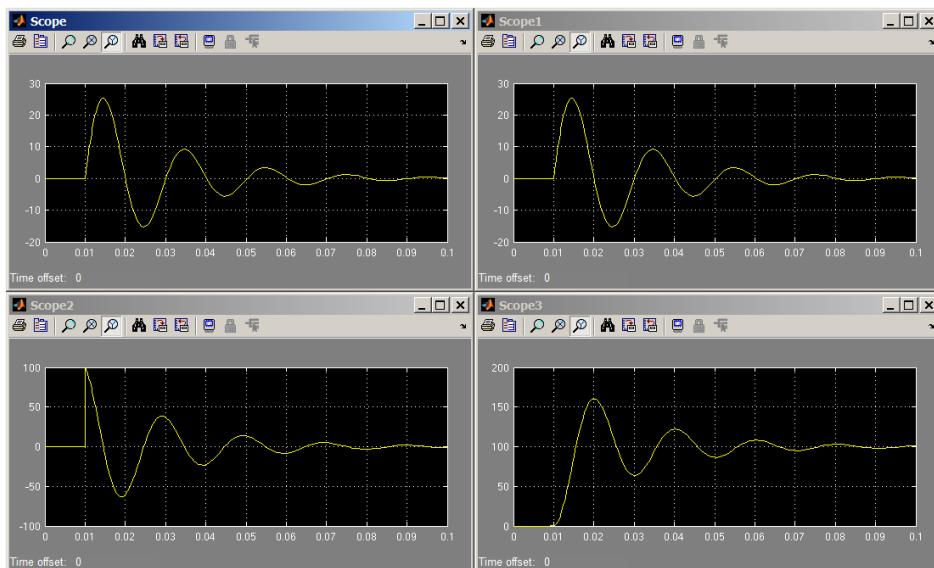


Рис. 2.5. Графики, построенные элементами *Scope*

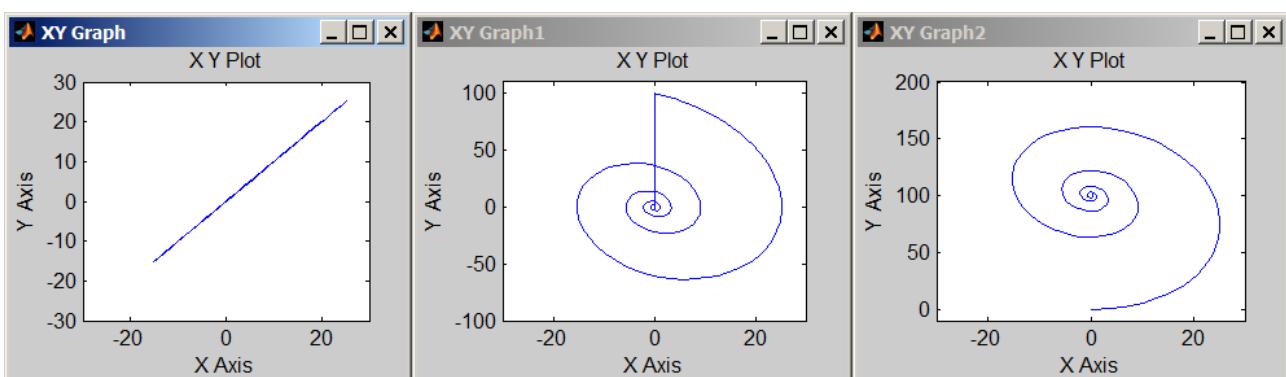


Рис. 2.6. Графики, построенные элементами *XY Graph* при подаче ступенчато изменяющегося напряжения

Из рис. 2.5 видно, что при подаче напряжения на RLC-контур (время 0,01 с) происходит колебательный процесс в виде затухающих колебаний. При этом в начальный момент времени всё напряжение источника прикладывается к индуктивности, а с увеличением времени – к ёмкости.

Графики, построенные элементами *XY Graph*, представляют собой вольтамперные диаграммы элементов. Из них видно, что на активном сопротивлении ток и напряжение совпадают по фазе, а на индуктивном и ёмкостном – не совпадают.

2. Создать модель RLC-контура, где напряжение источника питания изменяется синусоидально. Сохранить внешний вид модели и полученные осциллограммы и графики.

Для создания синусоидально изменяющегося напряжения на выходе управляемого источника напряжения необходимо в схеме (рис. 2.4) элемент *Step* заменить элементом *Sine Wave*.

Параметры элемента *Sine Wave* задаются следующие: амплитуда сигнала – 50; частота сигнала – 500 рад/с; фаза – 0. Параметры моделирования и элементов сопротивлений остаются прежними, за исключением величины активного сопротивления: его необходимо установить равным 0,001 Ом. Если всё сделано правильно, то блоки *XY Graph* отобразят графики, аналогичные представленным на рис. 2.7.

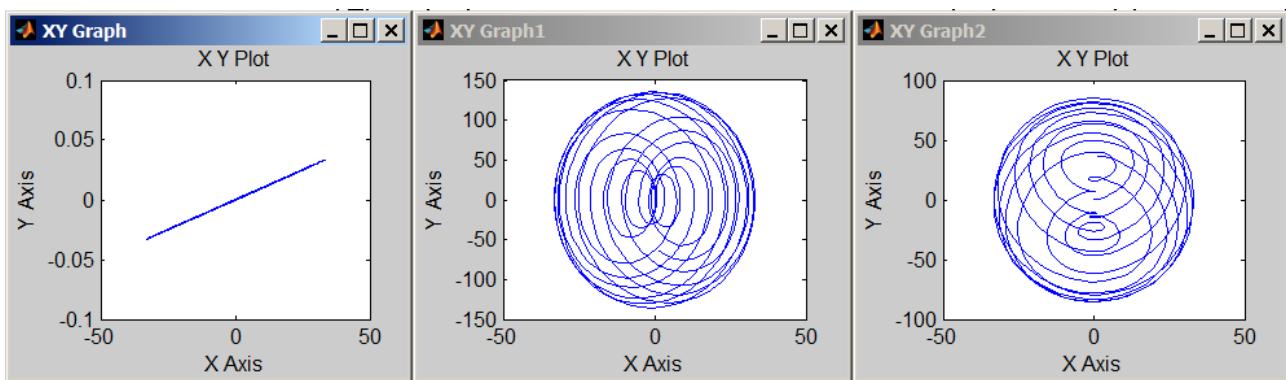


Рис. 2.7. Графики, построенные элементами *XY Graph* при подаче синусоидально-го напряжения

3. Создать модель RLC-контура, где напряжение источника питания изменяется ступенчато и синусоидально. Сохранить внешний вид модели и полученные осциллограммы и графики.

Для получения необходимого напряжения на выходе управляемого источника напряжения к элементу *Step* необходимо добавить элемент *Sine Wave* так, как показано на рис. 2.8. Параметры моделирования и сопротивлений остаются аналогичными параметрам, принятым во втором пункте.

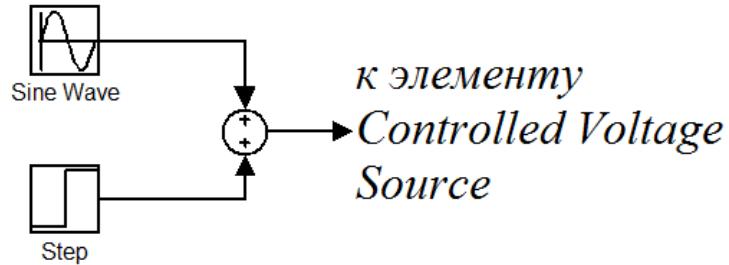


Рис. 2.8. Схема управления элементом *Controlled Voltage Source*

Необходимо задать следующие параметры элемента *Sine Wave*: амплитуда сигнала – 50; частота сигнала – 500 Гц; фаза – 0. Для элемента *Step* параметры: время переключения – 0,01 с; значение сигнала до переключения – 0; значение сигнала после переключения – из табл. 2.1. Если всё сделано правильно, то элементы *Scope* построят осциллограммы, аналогичные представленным на рис. 2.9.

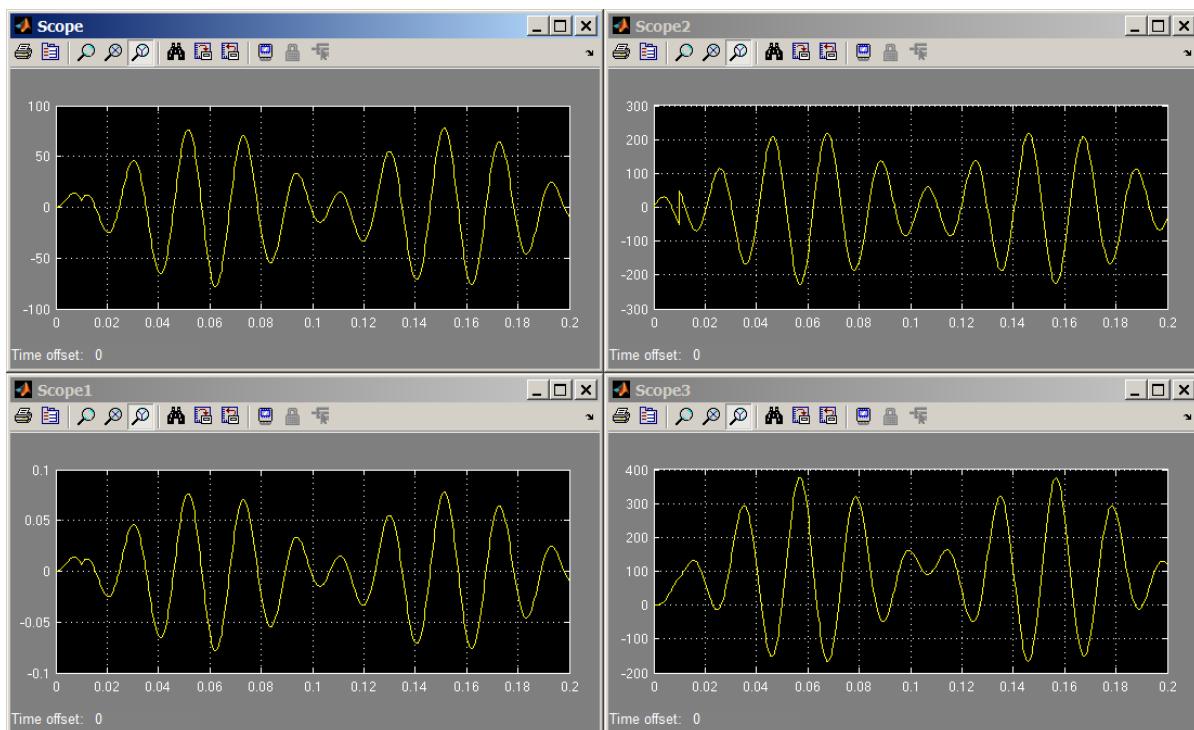


Рис. 2.9. Осциллограммы, построенные элементами *Scope* при подаче ступенчатого и синусоидального напряжения

Из осцилограмм (рис. 2.9) видно, что в цепи наблюдается неравномерность амплитуды. Это объясняется тем, что частота источника напряжения не совпадает с резонансной частотой RLC-контура, что вызывает наложение гармоник различной частоты.

4. Сделать вывод о проделанной работе. Вывод должен отражать основные особенности реакции RLC-контура на различные виды подаваемого на него напряжения.

Содержание отчёта:

- введение;
- внешний вид модели со ступенчато изменяющимся напряжением источника (п. 1);
- осцилограммы и графики, полученные при расчёте модели со ступенчато изменяющимся напряжением источника (п. 1);
- внешний вид модели с синусоидально изменяющимся напряжением источника (п. 2);
- осцилограммы и графики, полученные при расчёте модели с синусоидально изменяющимся напряжением источника (п. 2);
- внешний вид модели с различно изменяющимся напряжением источника (п. 3);
- осцилограммы и графики, полученные при расчёте модели с различно изменяющимся напряжением источника (п. 3);
- вывод.

Контрольные вопросы

1. Особенности гармонических колебаний тока.
2. Особенности затухающих колебаний тока.
3. Как функционирует созданная модель?
4. Описание полученных осцилограмм.
5. Какие блоки использовались в работе? Какие они выполняют функции?
6. Как необходимо дополнить схему, чтобы измерять напряжение на двух элементах?

Лабораторная работа № 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы: произвести расчёт математической модели двухмассовой системы путём блочного построения её уравнений в среде Simulink. Искомыми значениями являются колебания двух масс [2, 3].

3.1. Теоретическое описание объекта моделирования

В работе используется упрощенная модель с двумя степенями свободы, в которой две массы связаны упругими и диссипативными связями (рис. 3.1). Такая модель с принятными допущениями описывает вертикальные колебания рельсовых экипажей с двухъярусным рессорным подвешиванием. К таким экипажам можно отнести электровозы, тепловозы и пассажирские вагоны.

Модель, представленная на рис. 3.1, при наличии возмущения со стороны пути описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{z}_1 + b_1 \cdot \dot{z}_1 + b_2 \cdot \dot{z}_2 + c_1 \cdot z_1 + c_2 \cdot z_2 &= \\ &= b_1 \cdot \dot{h} + c_1 \cdot h; \\ m_2 \cdot \ddot{z}_2 + b_2 \cdot \dot{z}_2 + c_2 \cdot \dot{z}_1 + c_2 \cdot z_2 &= 0, \end{aligned} \quad (3.1)$$

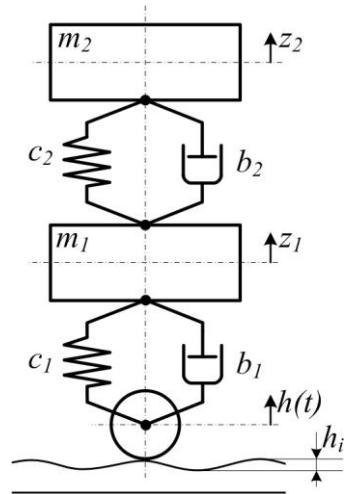


Рис. 3.1. Двухмассовая модель с упругими и диссипативными связями

где m_1 – обрессоренная масса тележки; m_2 – масса кузова, приведённая к одной тележке; c_1 , c_2 – жесткость соответственно первого и второго яруса подвешивания; b_1 , b_2 – демпфирование соответственно первого и второго яруса подвешивания; h – вертикальная неровность пути (возмущение); z_1 , z_2 – обобщенные координаты соответственно тележки и кузова.

Преобразуя (3.1), получим

$$\begin{aligned} \ddot{z}_1 &= -\frac{1}{m_1} (b_2 \cdot \dot{z}_1 + b_2 \cdot \dot{z}_2 + c_1 \cdot z_1 + c_2 \cdot z_2 - b_1 \cdot \dot{h} - c_1 \cdot h) \\ \ddot{z}_2 &= -\frac{1}{m_2} (b_2 \cdot \dot{z}_2 + c_2 \cdot \dot{z}_1 + c_2 \cdot z_2) \end{aligned} \quad (3.2)$$

В качестве возмущения принимается неровность, предложенная профессором Н. Н. Кудрявцевым,

$$h(t) = |A_1 \cdot \sin(\omega t) + A_2 \sin(3\omega t)|, \quad (3.3)$$

где A_1, A_2 – амплитуды неровностей пути. Выбираются в зависимости от типа и состояния пути; ω – частота возмущения

$$\omega = \frac{\pi V}{L}, \quad (3.4)$$

где V – скорость движения вдоль пути; L – длина рельсов.

Такая неровность хорошо описывает вертикальное изменение прогиба пути вдоль рельсового звена.

3.2. Блоки, необходимые для создания модели

Для выполнения лабораторной работы, кроме блоков изученных ранее, потребуются следующие блоки:

- *Clock* – источник сигнала времени. Создаёт сигнал, равный текущему времени моделирования. Внешний вид блока показан на рис. 3.2, *a*.

- *Fcn* – функциональный блок. Создаёт сигнал, равный заданной функции от входного сигнала. Необходимая функция задаётся в настройках блока в строке Expression на языке С. В записи функции можно использовать следующие компоненты:

- входной сигнал. Обозначается *u*, если он является скалярным. Если входной сигнал – вектор, необходимо указывать номер элемента вектора в круглых скобках. Например, «*u*(1)» и «*u*(3)» – первый и третий элементы входного вектора;

- константы;
- арифметические операторы (+ – * /);
- операторы отношения (= != > < >= <=);
- логические операторы (&& || !);
- круглые скобки;
- математические функции: *abs*, *acos*, *asin*, *atan*, *atan2*, *ceil*, *cos*, *cosh*, *exp*, *fabs*, *floor*, *hypot*, *ln*, *log*, *log10*, *pow*, *power*, *rem*, *sgn*, *sin*, *sinh*, *sqrt*, *tan*, и *tanh*;
- переменные из рабочей области. Если переменная рабочей области является массивом, то ее элементы должны указываться с помощью ин-

дексов в круглых скобках. Например, $A(1,1)$ – первый элемент матрицы A . Внешний вид блока показан на рис. 3.2, б.

• *Derivative* – дифференциатор. Создаёт сигнал, равный производной по времени от входного сигнала. Внешний вид блока показан на рис. 3.2, в.

• *Mux* – мультиплексор. Объединяет сигналы с нескольких входов в один выход (вектор). В настройках блока необходимо задать следующие параметры: количество входов (Number of Inputs); способ отображения (Display option). В последнем параметре можно выбрать один из следующих вариантов: вертикальный узкий прямоугольник чёрного цвета (bar); прямоугольник с белым фоном и отображением меток входных сигналов (signals); прямоугольник с белым фоном без отображения меток входных сигналов (none). Внешний вид блока показан на рис. 3.2, г.

• *Integrator* – интегратор. Создаёт сигнал, равный интегралу от входного сигнала. В настройках блока необходимо задать один из параметров внешнего сброса (External reset):

- none – нет (сброс не выполняется);
- rising – нарастающий сигнал (передний фронт сигнала);
- falling – спадающий сигнал (задний фронт сигнала);
- either – нарастающий либо спадающий сигнал;
- level – не нулевой сигнал (сброс выполняется, если сигнал на управляющем входе становится не равным нулю).

При выборе любого параметра, кроме «none», на изображении блока появляется дополнительный управляющий вход (на левой стороне блока, нижний).

Также в настройках блока *Integrator* необходимо задать источник начального значения выходного сигнала (Initial condition source): внешний (external) или внутренний (internal). При выборе внутреннего источника в настройках появится строка (Initial condition), в которой необходимо записать значение начального значения выходного сигнала блока. Если выбран внешний источник, то на изображении блока появляется дополнительный вход, обозначенный x_0 . На этот вход необходимо подать сигнал, задающий начальное значение выходного сигнала блока. Внешний вид блока показан на рис. 3.2, д.

• *MinMax Running Resettable* – обнуляемый определитель минимума или максимума. Определяет минимальное или максимальное значение входного сигнала (вход «u»). Вход «R» используется для сброса выходного значения. В настройках блока необходимо задать следующие параметры: функцию (Function) определения максимального (max) или минимального (min) значения входного сигнала; начальное значение (Initial condition). Элемент увеличивает (уменьшает) выходной сигнал от заданного начального значения до максимального (минимального) на входе. Другими словами, если задано найти минимальное значение положитель-

ной функции ($f > 0$), а начальное значение равно 0, то сигнал на выходе не будет изменяться и останется равным нулю. Внешний вид блока показан на рис. 3.2, e.

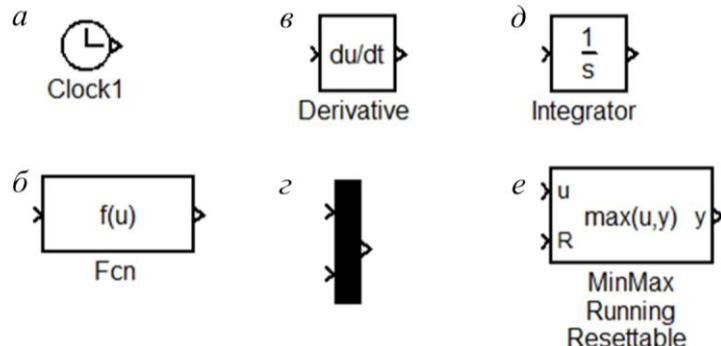


Рис. 3.2. Элементы, необходимые для выполнения лабораторной работы

Помимо представленных блоков, в работе используются *Sum*, *Gain*, *Scope*.

3.3. Порядок выполнения работы

1. Создать модель уравнений вынужденных колебаний и задать в ней соответствующие параметры.

Уравнения (3.2), записанные в форме блоков в среде Simulink, представлены на рис. 3.3.

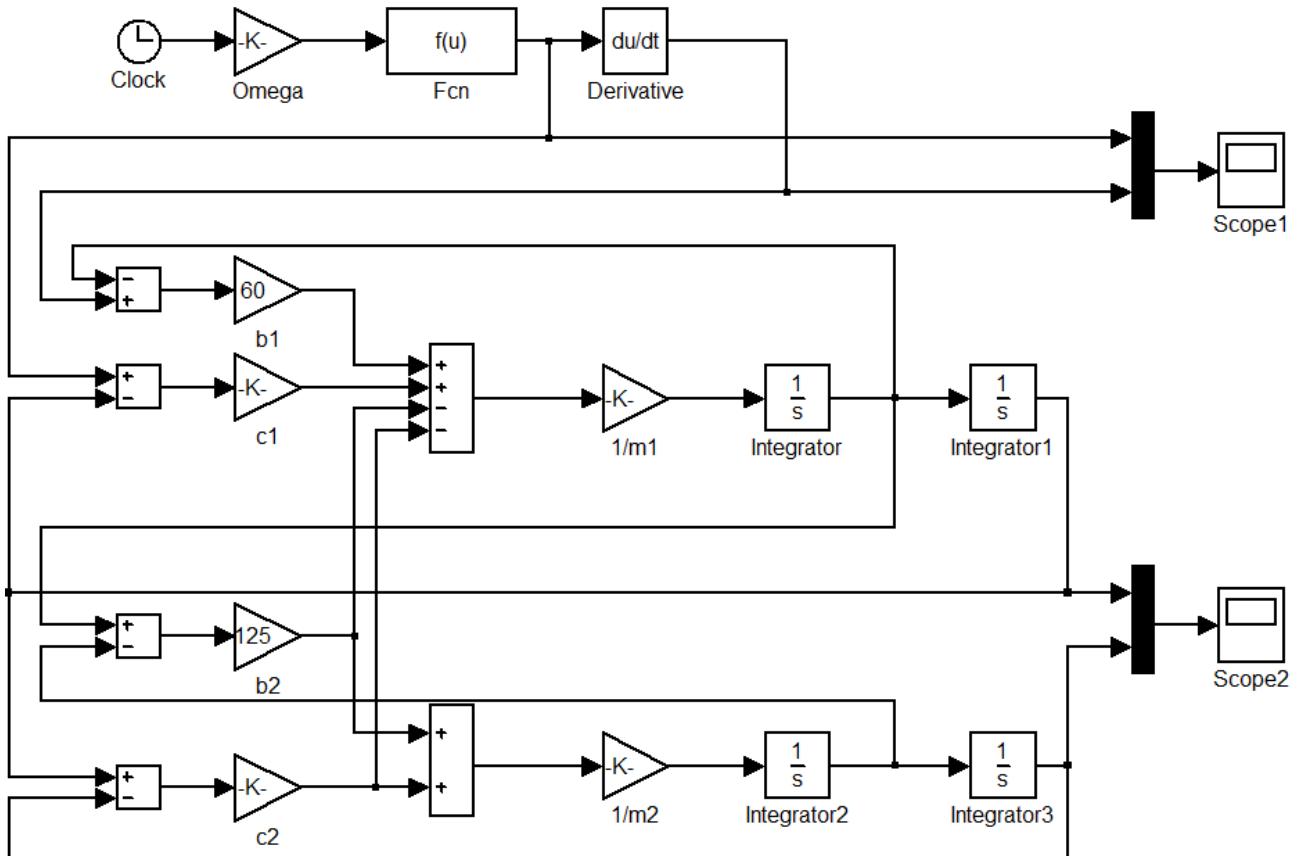


Рис. 3.3. Уравнения колебаний двухмассовой модели, заданные в блочной форме в среде Simulink

В первый элемент *Gain* с названием «Omega» записывается численное значение частоты возмущения, рассчитанное по формуле (3.4). В блок *Fcn* необходимо записать уравнение неровности (3.3) так, как показано на рис. 3.4.

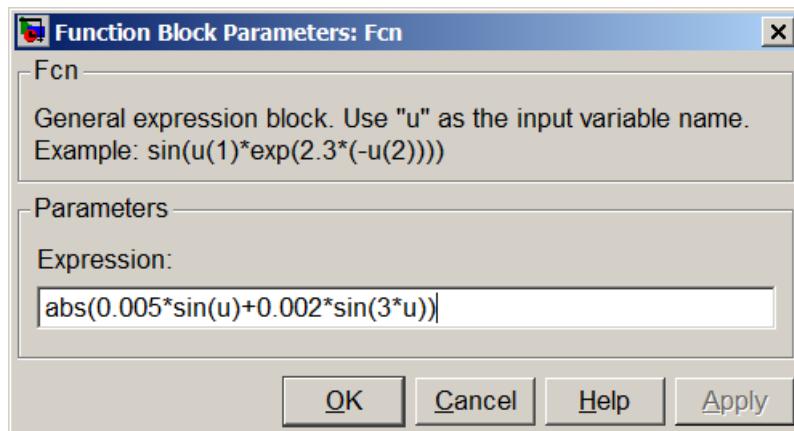


Рис. 3.4. Настройки элемента *Fcn*

В элементы *Gain* с именами «b1», «b2», «c1», «c2», «1/m1», «1/m2» записываются соответствующие значения параметров модели, взятые из табл. 3.1 и 3.2. При этом в последние два элемента значение записывается с дробью аналогично названию.

Таблица 3.1
Параметры расчётной модели

Параметр	Значение
Длина рельсового звена L, м	25
Масса первого тела m_1 , т	8,82
Масса второго тела m_2 , т	из табл.3.2
Жёсткость первого яруса c_1 , кН/м	7000
Жёсткость второго яруса c_2 , кН/м	из табл.3.2
Демпфирование первого яруса b_1 , кН·с/м	60
Демпфирование второго яруса b_2 , кН·с/м	из табл.3.2
Скорость движения V, м/с	25

Таблица 3.2
Варианты для индивидуального задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$m_2, \text{т}$	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
$c_2, \text{кН/м}$	3000	2900	2800	2700	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000	1900	1800	1700
$b_2, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165

После построения модели необходимо задать следующие параметры расчёта: время моделирования 0–10 с; метод расчёта *ode45*. Если модель создана правильно, то в элементах *Scope* должны построиться осциллограммы, аналогичные представленным на рис. 3.5.

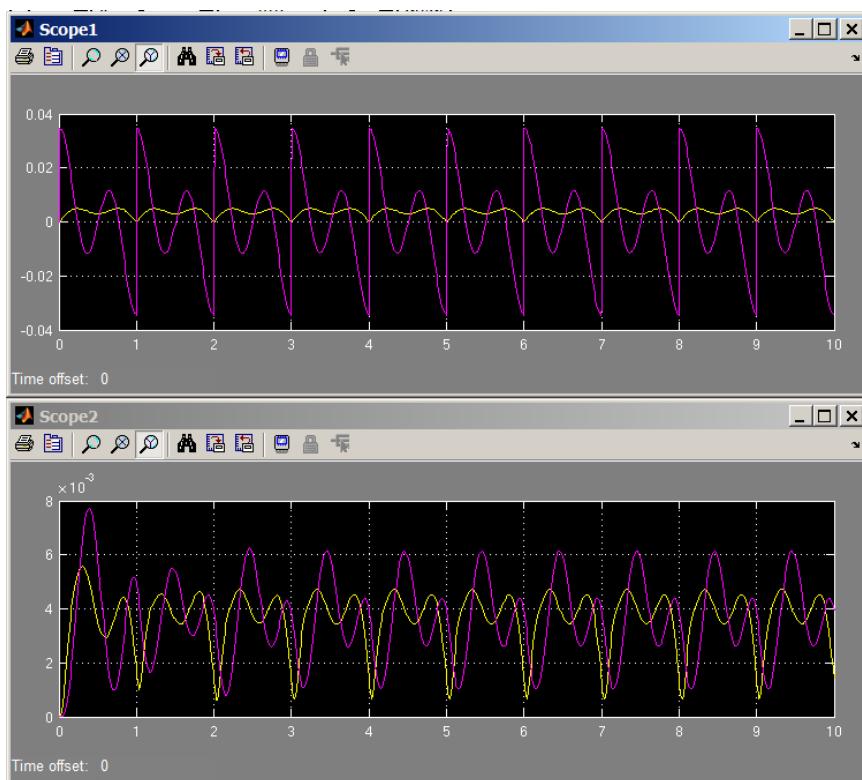


Рис. 3.5. Осциллограммы, построенные элементами *Scope*

На первом осциллографе (Scope1) показаны две осциллограммы: неровность h и первая производная от неровности (скорость изменения неровности) dh/dt . На втором осциллографе (Scope2) также показаны две осциллограммы: перемещение тележки z_1 и перемещение кузова z_2 .

Как видно из осцилограмм, перемещение кузова приблизительно колеблется в координатах от 1 до 6 мм.

Сохранить рисунок схемы и полученные осцилограммы.

2. Дополнить модель схемой определения амплитуды колебаний кузова и произвести её расчёт.

Для выполнения второго пункта необходимо установить время моделирования 0–50 с, а время переключения элемента *Step* 20 с.

Для более точного определения перемещения кузова необходимо дополнить созданную модель схемой расчёта интервала перемещений (амплитуды колебаний) как показано на рис. 3.6.

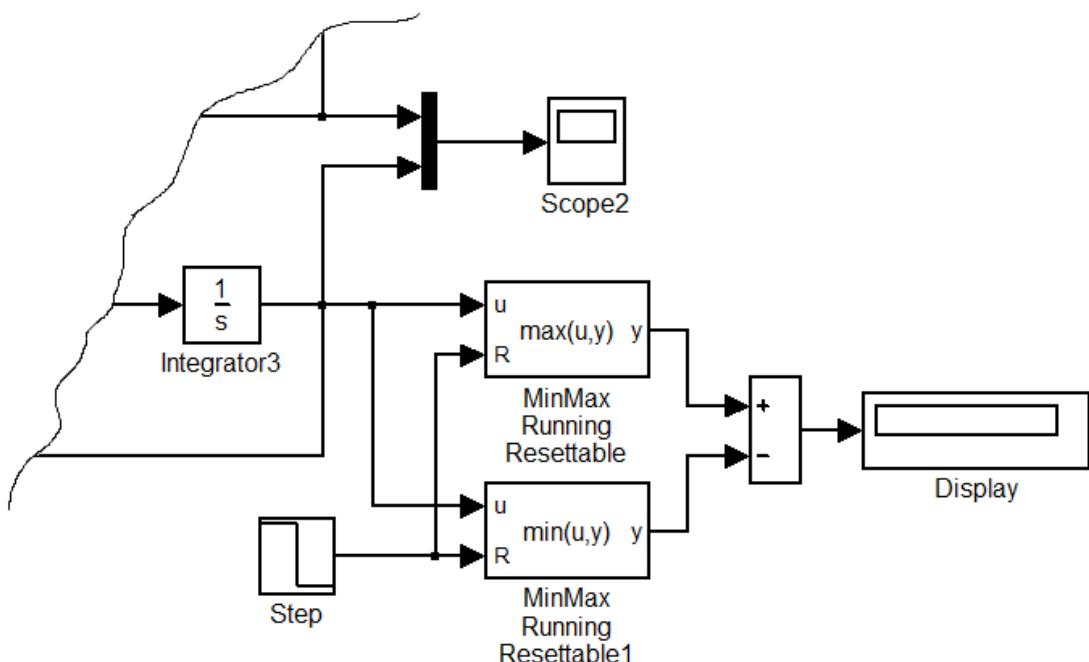


Рис. 3.6. Схема расчёта амплитуды колебаний

Такая схема (рис. 3.6) определяет разницу между максимальным и минимальным значениями координаты перемещения кузова. Параметры блока *Step*: значение до переключения 1; значение после переключения 0; время переключения 10 с. Параметры блока *MinMax Running Resettable*: функция определения максимального значения; начальное значение 0. Параметры блока *MinMax Running Resettable1*: функция определения минимального значения; начальное значение 10.

Если схема создана правильно, то на дисплее должно появиться число, равное амплитуде колебаний.

Далее, изменяя величину скорости (значение ω), заполнить табл. 3.3 и построить по ней график.

Таблица 3.3

Зависимость амплитуды колебаний от скорости движения

V, м/с	4	7	10	12	16	18	20	23	30	40
Амплитуда, мм										

3. Сделать вывод о проделанной работе. Вывод должен отражать зависимость амплитуды колебаний от скорости движения.

Содержание отчёта:

- цель работы;
- введение
- внешний вид модели, созданной в первом пункте (п. 1);
- осциллограммы, полученные при расчёте модели, созданной в первом пункте (п. 1);
- внешний вид модели, созданной во втором пункте (п. 2);
- осциллограммы, полученные при расчёте модели, созданной во втором пункте (п. 2);
- таблица и график зависимости амплитуды колебаний от скорости движения (п. 2);
- вывод.

Контрольные вопросы

1. Каким образом связаны схемы на рис. 3.1 и 3.3?
2. Как функционирует созданная модель?
3. Описание полученных осциллограмм.
4. Описание графика зависимости амплитуды от неровности пути.
5. Какие блоки использовались в работе? Какие они выполняют функции?

Лабораторная работа № 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы: произвести расчёт математической модели двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением [4, 5].

4.1. Теоретическое описание объекта моделирования

Практически на всех отечественных электровозах в качестве тяговых двигателей используются двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением. Основное регулирование их частоты вращения осуществляется изменением питающего напряжения. Однако при увеличении питающего напряжения до максимально возможного, дальнейшее увеличение скорости вращения двигателя осуществляется с помощью уменьшения магнитного потока обмоток возбуждения. На отечественных электровозах для этой цели используют шунтирующие резисторы $R_{ш}$ (резисторы ослабления возбуждения), которые подключаются параллельно обмотке возбуждения ОВ (рис. 4.1).

При включении шунтирующего резистора уменьшается общее сопротивление параллельно включённых ОВ и $R_{ш}$. В результате этого уменьшается ток в обмотке возбуждения ОВ и увеличивается ток в обмотке якоря ОЯ. Таким образом, изменяются скоростная $V(I)$ и тяговая $F(I)$ характеристики двигателя, которые определяются уравнениями:

$$V = \frac{U_d - I \cdot R_d}{C\Phi}, \quad (4.1)$$

$$F = \frac{C\Phi I}{\eta_F},$$

где U_d – напряжение, прикладываемое к зажимам двигателя; I – общий ток двигателя; R_d – сопротивление двигателя; C – постоянная машины; Φ – магнитный поток обмотки возбуждения; η_F – КПД тяговой передачи.

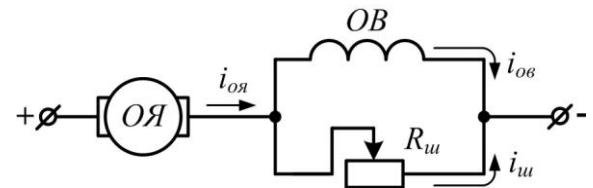


Рис. 4.1. Двигатель с последовательным возбуждением, оборудованный шунтированием обмотки возбуждения резистором

Поскольку в цепи ОВ имеется большая индуктивность, а в цепи шунтирования она отсутствует, то при переходных процессах распределение тока между этими ветвями будет различным. Это является недопустимым при эксплуатации тяговых двигателей. К тому же при кратковременном затухании питающего напряжения (отрыв токоприемника от контактного провода), после восстановления напряжения ток в обмотке возбуждения будет нарастать гораздо медленнее, чем в обмотке шунтирования. Это может вызвать значительное увеличение тока якоря и стать причиной появления кругового огня по коллектору. Для равномерного распределения токов между параллельными ветвями используют индуктивные шунты ИШ, которые подключают последовательно с шунтирующим резистором (рис. 4.2).

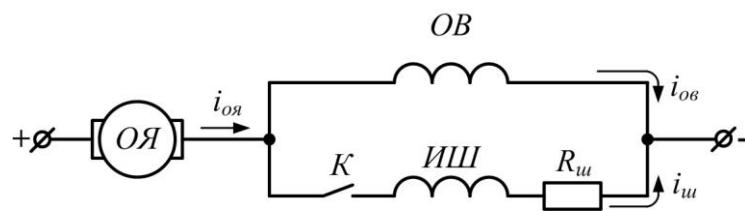


Рис. 4.2. Шунтирование обмотки возбуждения резистором

На представленной схеме (рис. 4.2) цепь ослабления возбуждения состоит из трёх элементов: ключ K , индуктивный шунт ИШ, резистор ослабления возбуждения $R_{ш}$. В этом случае резистор ослабления возбуждения $R_{ш}$ является нерегулируемым, а вводится в цепь двигателя с помощью ключа K .

4.2. Блоки, необходимые для создания модели

Для выполнения лабораторной работы, кроме блоков изученных ранее, потребуются следующие блоки:

- *Demux* – демультиплексор. Распределяет сигналы с одного входа (вектора) на несколько выходов. В настройках блока необходимо задать следующие параметры: количество выходов (Number of outputs); способ отображения (Display option). В последнем параметре можно выбрать один из следующих вариантов: вертикальный узкий прямоугольник чёрного цвета (bar); прямоугольник с белым фоном без отображения меток входных сигналов (none). Внешний вид блока показан на рис. 4.3, а.

- *Ideal Switch* – идеальный ключ. Осуществляет замыкание и размыкание цепей. Имеет следующие входы и выходы: «1» и «2» – силовые контакты, между которыми происходит замыкание или размыкание цепи; «g» – управляющий вход; «m» – измерительный выход. Размыкание ключа происходит при подаче на управляющий вход сигнала, равного нулю, а замыкание – при подаче сигнала, равного 1 или более. Измерительный выход формирует вектор, состоящий из двух сигналов, соответственно: ток, проходящий через силовые контакты, А; напряжение между зажимами силовых контактов, В. Устройство имеет встроенную искрогасящую RC-цепь, включенную параллельно контактам ключа. В настройках блока необходимо задать следующие параметры: сопротивление в замкнутом состоянии (Internal resistance), Ом; начальное значение (Initial state); активное сопротивление искрогасящей цепи (Snubber capacitance), Ом; ёмкостное сопротивление искрогасящей цепи (Snubber capacitance), Ф. Внешний вид блока показан на рис. 4.3, б.

- *DC Machine* – электрическая коллекторная машина постоянного тока. Имеет следующие входы и выходы: «A+» и «A-» – соответственно вход и выход обмотки якоря; «F+» и «F-» – соответственно вход и выход обмотки возбуждения; «TL» – задание момента сопротивления вращению вала якоря; «m» – измерительный выход. Измерительный выход формирует вектор из четырёх сигналов, соответственно: скорость вращения, рад/с; ток якоря, А; ток возбуждения, А; электромагнитный момент, создаваемый якорем, Н·м. В настройках блока необходимо задать следующие параметры: активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря (Armature resistance and inductance), Ом и Гн; активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения (Field resistance and inductance), Ом и Гн; взаимная индуктивность между обмоткой якоря и обмоткой возбуждения (Field-armature mutual inductance), Гн; момент инерции двигателя (Total inertia), кг·м²; коэффициент вязкого трения (Viscous friction coefficient), Н·м·с; реактивный момент сопротивления (Coulomb friction torque), Н·м; начальная скорость вращения якоря (Initial speed), рад/с. Внешний вид блока показан на рис. 4.3, в.

Помимо представленных блоков, в работе используются: *Ground*, *DC Voltage Source*, *Scope*, *Gain*, *Step*, *Current Measurement*, *Series RLC Branch*, *Voltage Measurement*.

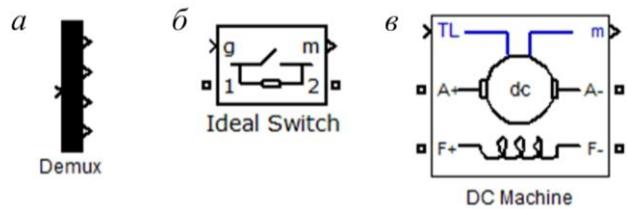


Рис. 4.3. Элементы, необходимые для выполнения лабораторной работы (см. примечание)

Примечание: на рис. 4.3 и рисунках других лабораторных работ внешний вид некоторых элементов взят из программы Matlab 7.11. В более ранних версиях внешний вид блока может не соответствовать внешнему виду, приведённому в работе. Однако функции этих блоков остаются одинаковыми. Поэтому необходимо соединять одноимённые входы и выходы.

4.3. Порядок выполнения работы

1. Создать модель двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением в среде *Simulink*. Произвести её расчёт, сохранить внешний вид и полученные осциллограммы.

На основе рассмотренной теории двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением необходимо создать его модель в среде *Simulink*. Внешний вид такой модели представлен на рис. 4.4.

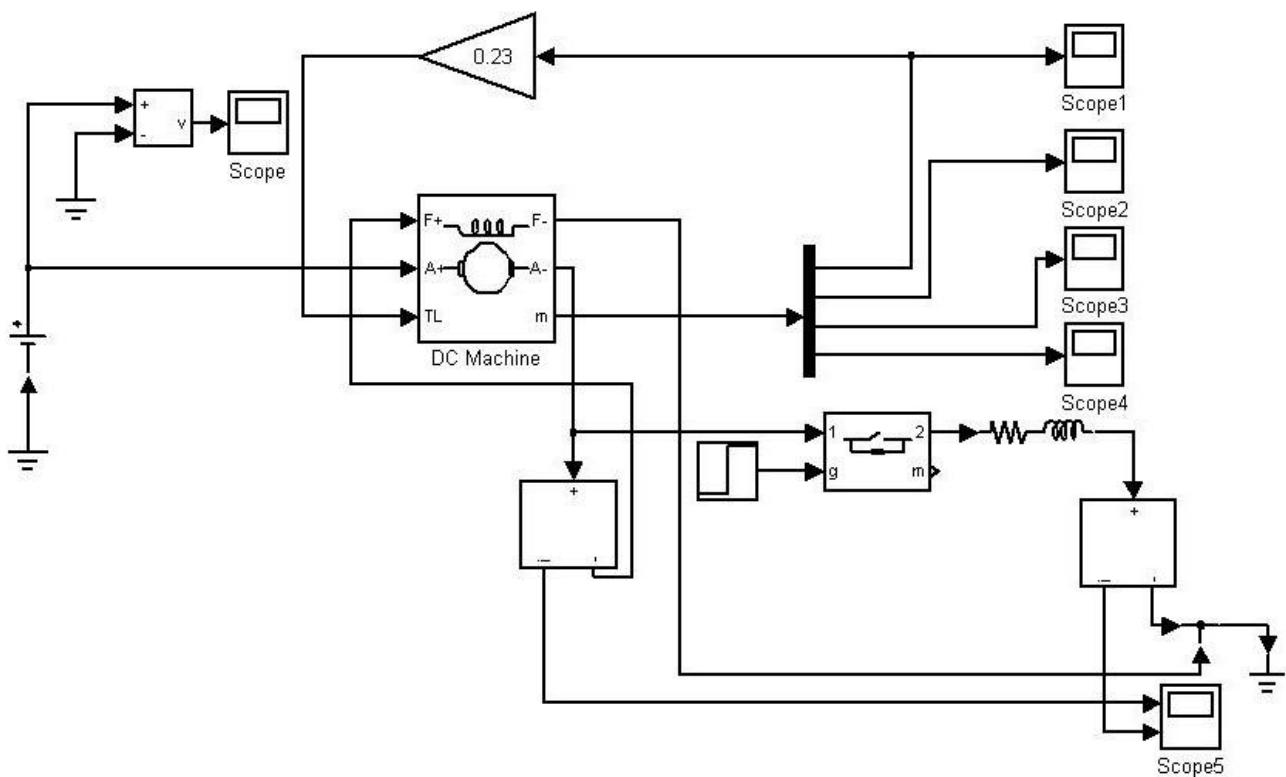


Рис. 4.4. Модель двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, выполненная в Simulink

В представленной модели момент сопротивления вращению на валу прямо пропорционален скорости вращения якоря. Это осуществляется с помощью элемента *Gain*, который соединяет линию связи скорости вра-

щения якоря и вход «TL» блока *DC Machine*. В параметр элемента *Gain* заносится значение 0,23.

Демультиплексор служит для разделения по осциллографам векторного сигнала, формирующегося на выходе «т» машины постоянного тока. Другими словами он разделяет векторный сигнал (см. выше описание блока *DC Machine*) на составляющие, а затем распределяет эти составляющие на соответствующий осциллограф.

Элемент *Ideal Switch* моделирует ключ *K* (рис.4.2). Его управление осуществляется с помощью блока *Step*.

В элемент *DC Machine* необходимо задать параметры, приведённые в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Параметры элемента *DC Machine*

Параметр	Значение
Активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря	0,06727 0,001882
Активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения	30,72 3,166
Взаимная индуктивность между обмоткой якоря и обмоткой возбуждения	0,2641
Момент инерции двигателя	1,019
Коэффициент вязкого трения	0
Реактивный момент сопротивления	26,46
Начальная скорость вращения якоря	1

В элемент *Step* необходимо задать следующие параметры: время переключения 10 с; сигнал на выходе до переключения 0; сигнал на выходе после переключения 1. В элемент *Ideal switch* необходимо задать параметры: шунтирующее сопротивление 1e5 (10^5) Ом; сопротивление в замкнутом состоянии 0,0001 Ом.

Параметры индуктивности индуктивного шунта $L_{ш}$ и сопротивления шунтирующего резистора $R_{ш}$ (Элемент Series RLC Branch) выбираются из табл. 4.2 в зависимости от варианта. Напряжение источника выбирается также из табл. 4.2.

Таблица 4.2
Варианты для индивидуального задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
E , В	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480
$L_{ш}$, Гн	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16
$R_{ш}$, Ом	50	60	70	80	90	100	110	100	90	80	70	60	50	55

Параметры моделирования: время моделирования 0–30 с; метод ode23s.

После расчёта модели должны построиться осциллограммы, аналогичные приведённым на рис. 4.5.

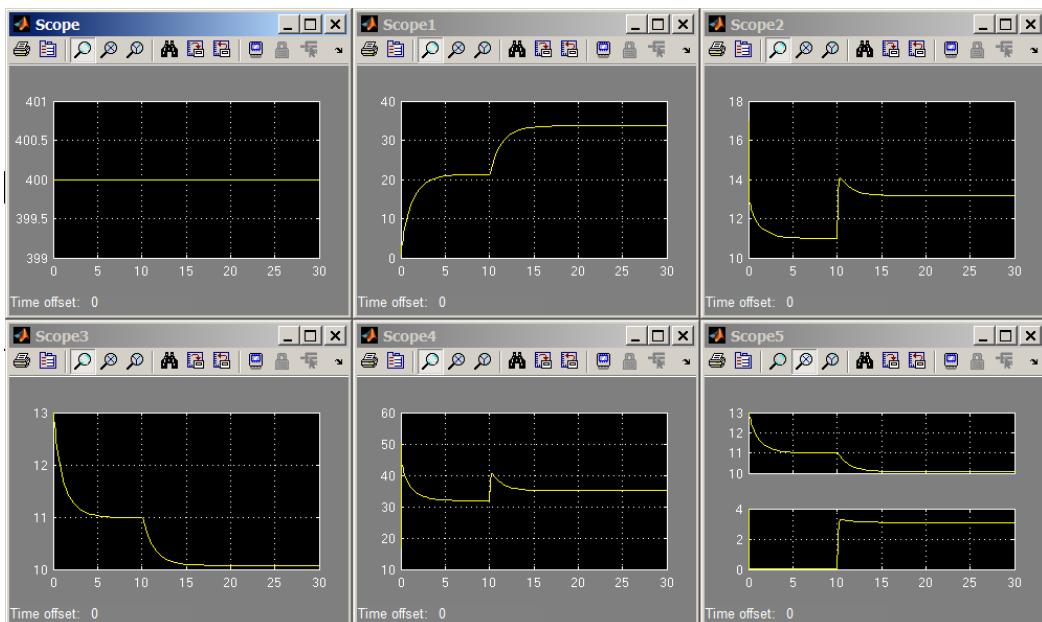


Рис. 4.5. Осциллограммы, полученные в результате расчёта модели

2. Уменьшить напряжение источника питания в два раза и повторить первый пункт. Параметры моделирования и остальных элементов оставить без изменения. Сохранить полученные осциллограммы.

3. Сделать вывод о проделанной работе.

Содержание отчёта:

- цель работы;
- введение;
- внешний вид модели, созданной в первом пункте (п. 1);
- осциллограммы, полученные при расчёте модели, созданной в первом пункте (п. 1);

- осциллограммы, полученные при расчёте модели, созданной во втором пункте (п. 2);
- вывод.

Контрольные вопросы

1. Для чего применяется шунтирование обмотки возбуждения?
2. Как функционирует созданная модель?
3. Описание полученных осциллограмм.
4. Какие блоки использовались в работе? Какие они выполняют функции?
5. Как вычисляется момент сопротивления на валу якоря?

Лабораторная работа № 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы: произвести расчёт математической модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Изменение частоты вращения двигателя осуществляется за счёт уменьшения сопротивления цепи обмотки якоря с помощью пусковых реостатов [4, 5].

5.1. Теоретическое описание объекта моделирования

Одним из главных преимуществ двигателей с независимым возбуждением перед двигателями с последовательным возбуждением является наличие жёсткой характеристики. Как известно, чем жёстче характеристика тягового двигателя на электровозе, тем менее вероятно развитие на нём боксования колёс.

Для питания двигателя с независимым возбуждением необходимо два источника энергии: для цепи обмотки якоря и для цепи обмотки возбуждения. Как правило, регулирование скорости вращения в таких двигателях осуществляется регулированием тока якоря $i_{оя}$, за счёт изменения напряжения, подаваемого на обмотку якоря. Однако при невозможности регулирования питающего напряжения в необходимых пределах, применяют пусковые реостаты $R_{пуск}$ (рис. 5.1).

В такой схеме (рис. 5.1) увеличение тока якоря $i_{оя}$ осуществляется путём уменьшения сопротивления пускового резистора $R_{пуск}$.

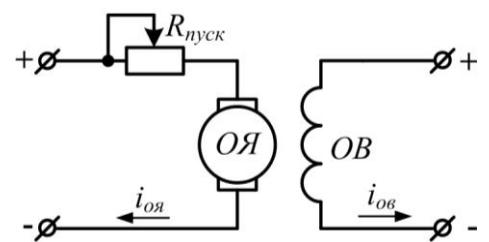


Рис. 5.1. Двигатель с независимым возбуждением, оборудованный пусковым реостатом

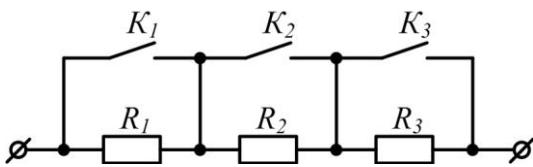


Рис. 5.2. Схема пускового реостата, состоящего из последовательно соединённых резисторов

На практике же изготовление пускового реостата с плавным изменением сопротивления является затруднительным. По этой причине пусковые реостаты представляют собой набор последовательно соединённых резисторов, параллельно которым подключены контакторы. Пример такого пускового реостата показан на рис. 5.2.

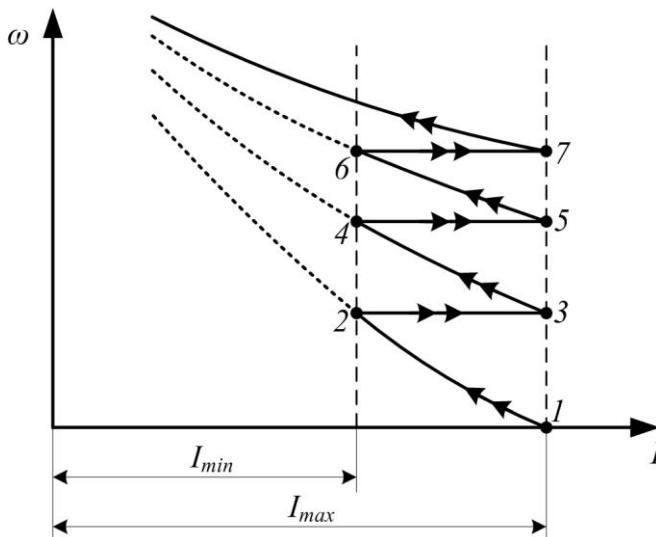


Рис. 5.3. Пусковая диаграмма

При достижении некоторого значения тока, называемого минимальным I_{min} , один из контакторов пускового реостата замыкается, в результате чего сопротивление цепи обмотки якоря уменьшается. В результате этого двигатель переходит на новую скоростную характеристику (точки 3 и 4 рис. 5.3). В дальнейшем при достижении минимального тока будет замыкаться следующий контактор пускового реостата, в результате чего двигатель будет переходить на следующую скоростную характеристику.

Чем больше ступеней имеет пусковой реостат, тем более плавным будет пуск двигателя. При этом сопротивление реостатов должно быть таким, чтобы при переключении контакторов ток якоря не превысил максимальное значение.

Принцип действия пускового реостата (рис. 5.2) можно рассмотреть на примере набора скоростных характеристик, представляющих собой пусковую диаграмму (рис. 5.3). При пуске двигателя все контакторы реостата разомкнуты, соответственно сопротивление его максимально. При включении источника питания цепи обмотки якоря, ток в ней максимальный (точка 1 на рис. 5.3). При увеличении частоты вращения якоря двигателя увеличивается противоэдс, поэтому ток в обмотке якоря $i_{оя}$ уменьшается.

5.2. Блоки, необходимые для создания модели

Для выполнения лабораторной работы, кроме блоков изученных ранее, потребуются следующие блоки:

- *Subsystem* – подсистема. Подсистема это некоторая отдельная Simulink-модель, оформленная в виде отдельного блока. Подсистема является частью основной модели, и расчёт в ней производится совместно с

общей моделью. Другими словами подсистема позволяет более компактно разместить блоки на рабочем окне основной модели. Связь подсистемы с основной моделью осуществляется с помощью входов (Inport) и выходов (Outport). Блок входа находится в библиотеке Sources, а выход – в библиотеке Sinks. На рабочем окне подсистемы блоки входов и выходов копируются так же, как и остальные блоки. Внешний вид блока показан на рис. 5.4, а.

- *Breaker* – выключатель. Имеет следующие входы и выходы: 1 и 2 – силовые контакты, между которыми происходит замыкание или размыкание цепи; с – управляющий вход. Размыкание ключа происходит при подаче на управляющий вход сигнала равного нулю, а замыкание – при подаче сигнала, равного 1 или более. Выключение устройства осуществляется только при уменьшении тока до нуля. Устройство имеет встроенную искрогасящую RC-цепь, включенную параллельно контактам выключателя. В настройках блока необходимо задать следующие параметры: сопротивление в замкнутом состоянии (Breaker resistance), Ом; начальное значение (Initial state); активное сопротивление искрогасящей цепи (Snubber capacitance), Ом; ёмкостное сопротивление искрогасящей цепи (Snubber capacitance), Ф. Внешний вид блока показан на рис. 5.4, б.

- *Terminator* – концевой приемник. Используется для приёма сигнала с неиспользуемого выхода. Внешний вид блока показан на рис. 5.4, д.

- *Bus Bar (thin vert)* – соединитель линий связи. Используется для соединения нескольких входов и/или нескольких выходов. В параметрах задаётся необходимое количество входов и выходов. Внешний вид блока показан на рис. 5.4, е.

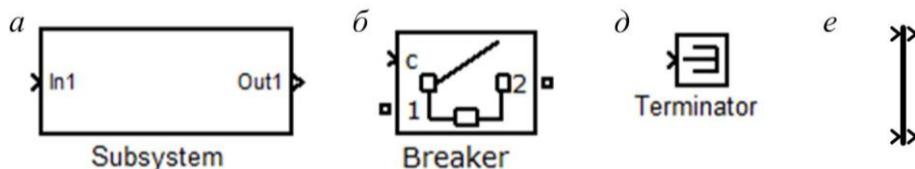


Рис. 5.4. Элементы, необходимые для выполнения лабораторной работы

Помимо представленных блоков, в работе используются: *Ground*, *DC Voltage Source*, *Scope*, *Gain*, *Step*, *Voltage Measurement*, *XY Graph*, *Series RLC Branch*, *Demux*.

5.3. Порядок выполнения работы

1. Создать модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в среде Simulink. Задать в ней необходимые параметры и произвести расчёт модели.

На основе рассмотренной теории двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и пусковым реостатом необходимо создать его модель в среде *Simulink*. Внешний вид такой модели представлен на рис. 5.5.

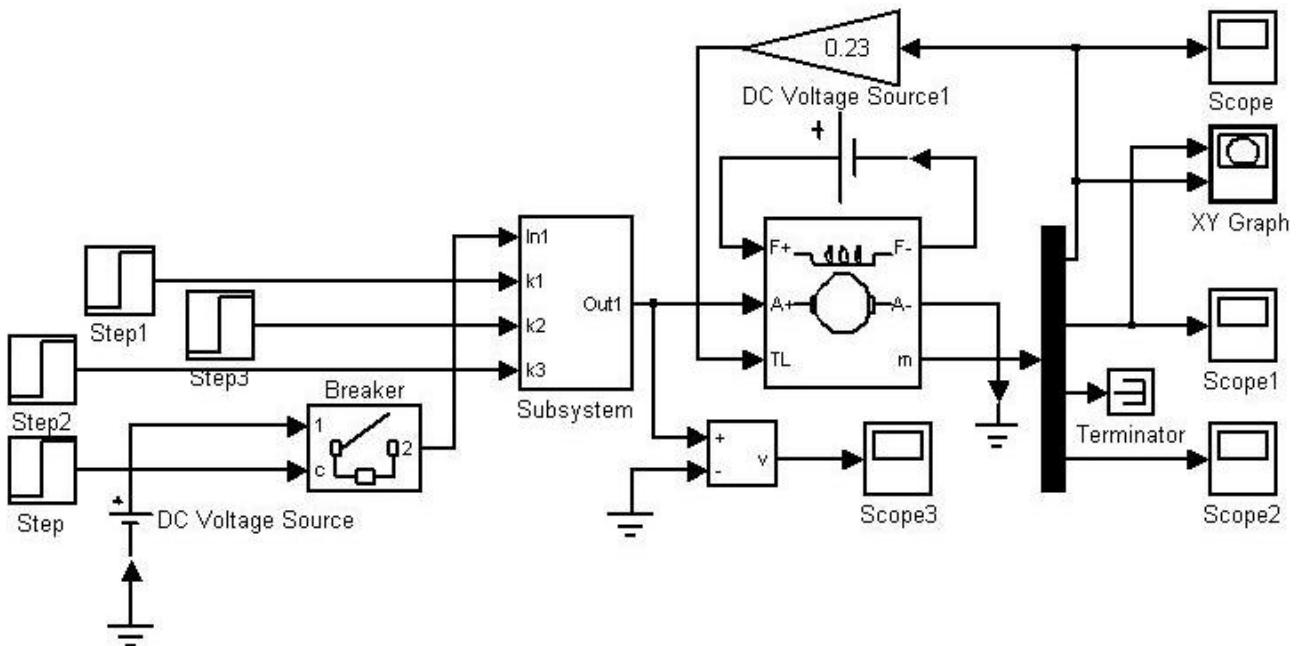


Рис. 5.5. Модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, выполненная в Simulink

Подсистема (блок *Subsystem*) представляет собой пусковой реостат. На рис. 5.6 показана развёрнутая подсистема (модель пускового реостата).

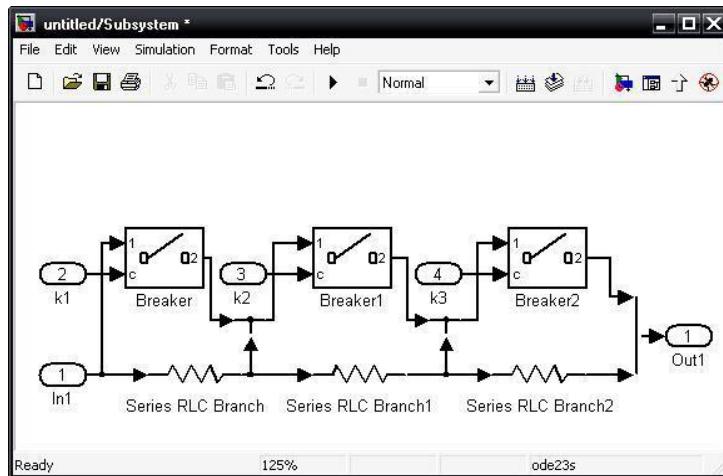


Рис. 5.6. Модель пускового реостата, созданная в подсистеме

При соединении блоков необходимо обращать внимание на название входов и выходов. В блоке *Subsystem* названия входов и выходов соответствуют названиям, заданным на входах и выходах в развёрнутой подсистеме.

Функционирует модель следующим образом. В начальное время замыкается выключатель в основной модели. В результате этого на последовательно соединённые обмотку якоря и пусковой реостат подаётся напряжение источника питания. При достижении тока якоря минимального значения замыкается первый ключ пускового реостата. В результате этого двигатель переходит на следующую скорость характеристику и ток якоря увеличивается. В дальнейшем при достижении током якоря минимального значения будет замыкаться следующий ключ пускового реостата.

Представленная модель двигателя (рис.5.5) функционирует следующим образом. Изначально с выхода блока Step подаётся единичный сигнал и замыкается выключатель, соединяющий источник напряжения и пусковой реостат (элемент Breaker). В результате этого подаётся напряжение на последовательно включенные пусковой реостат и обмотку якоря. Далее в заданное время подаются сигналы блоками Step2, Step3, Step4 через входы подсистемы на выключатели пускового реостата (Breaker, Breaker1, Breaker2). Таким образом, сопротивление пускового реостата ступенчато уменьшается.

В элемент Breaker основной модели задаются следующие параметры: сопротивление в замкнутом состоянии – 0,1; начальное значение – 0; активное сопротивление искрогасящей цепи – $1e6$ (10^6) Ом; ёмкость искрогасящей цепи – inf. Параметры машины постоянного тока соответствуют параметрам машины, рассмотренной в лабораторной работе №4. Метод расчёта должен быть ode23s, время начала моделирования – 0, а время окончания моделирования задаётся индивидуально для каждого студента.

Параметры элементов Breaker, Breaker1, Breaker2, входящих в подсистему: сопротивление в замкнутом состоянии – 0,01 Ом; начальное значение – 0; активное сопротивление искрогасящей цепи – inf; ёмкость искрогасящей цепи – inf. Сопротивление каждого резистора пускового реостата составляет 0,5 Ом.

Время переключения для элемента Step1 задаётся равным 0,2 с. Время переключения элементов Step1, Step2 и Step3 равны, соответственно 5, 11, 20.

Параметры элемента XY Graph: минимальное значение по горизонтальной оси – 0; максимальное значение по горизонтальной оси равно максимальному значению тока якоря, получаемого на соответствующем осциллографе; минимальное значение по вертикальной оси – 0; максимальное значение по вертикальной оси равно максимальному значению частоты оборотов якоря, получаемого на соответствующем осциллографе.

Напряжение источника питания выбирается индивидуально согласно табл. 5.1.

Таблица 5.1
Варианты для индивидуального задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$E, \text{ В}$	340	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480

После создания модели и настройки её параметров необходимо запустить расчёт. Если всё сделано правильно, то элементами Scope построятся осциллограммы, аналогичные приведённым на рис. 5.7.

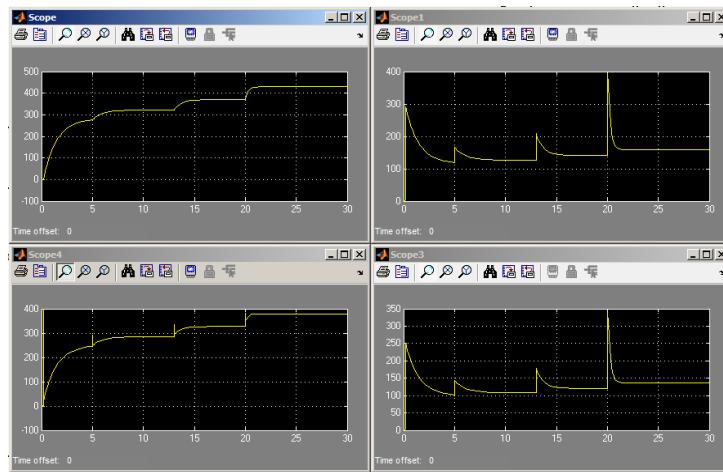


Рис. 5.7. Осциллограммы, полученные в результате расчёта модели

На элементе XY Graph построится график, аналогичный представленному на рис. 5.8.

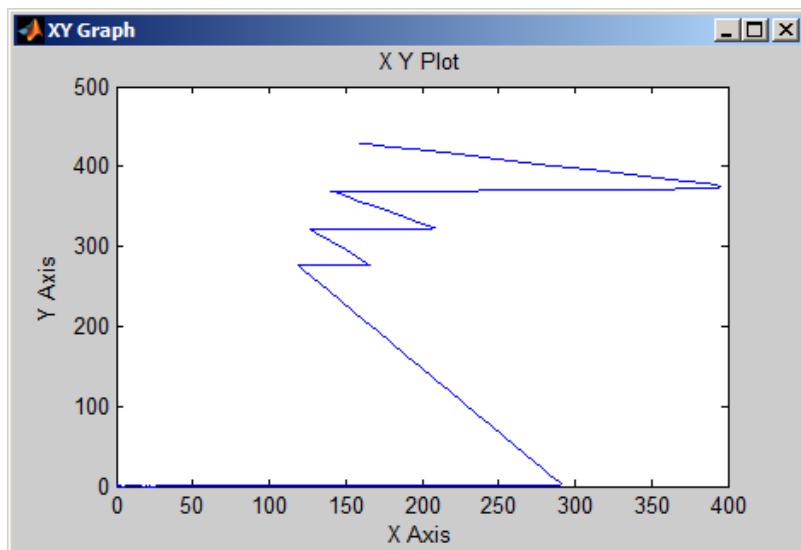


Рис. 5.8. График, построенный элементом XY Graph

На элементе XY Graph построится зависимость тока якоря и скорости вращения вала двигателя. Такая зависимость называется пусковой диаграммой.

2. Откорректировать модель таким образом, чтобы пусковая диаграмма была более идеальной (рис.5.3).

Если на полученной пусковой диаграмме (рис. 5.8), после замыкания каждого из ключей пускового реостата (точки 3, 5, 7 на рис. 5.3), величина тока якоря больше начального максимального значения (точка 1 на рис. 5.3), то необходимо уменьшить сопротивление каждого из резисторов пускового реостата.

Как правило, ток, при котором замыкаются ключи пускового реостата, является неодинаковым. Для устранения этого необходимо изменить время замыкания ключей таким образом, чтобы они переключались при одном и том же токе, равном 50–80 % от максимального значения тока.

После указанных корректировок полученная пусковая диаграмма должна выглядеть аналогично представленной на рис. 5.9.

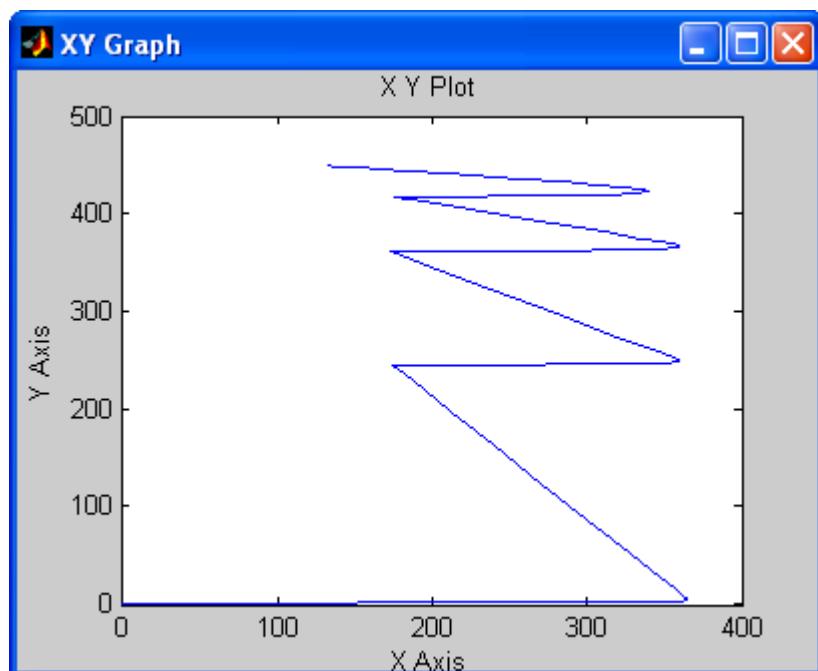


Рис. 5.9. График, построенный элементом XY Graph, после корректировки схемы модели

3. Сделать вывод о проделанной работе. Вывод должен отражать преобразования в схеме, сделанные для получения более идеальной пусковой диаграммы.

Содержание отчёта:

- цель работы;
- введение;
- внешний вид первоначальной схемы модели (п. 1);
- осциллограммы и график, полученные при расчёте первоначальной модели (п. 1);
- осциллограммы и график, полученные при расчёте откорректированной модели (п. 2);
- вывод.

Контрольные вопросы

1. Для чего применяются пусковые реостаты?
2. Как изменяется скоростная характеристика двигателя при уменьшении сопротивления в цепи обмотки якоря?
3. Как функционирует представленная модель?
4. Описание полученных осциллограмм и графика.
5. Какие блоки использовались в работе? Какие они выполняют функции?
6. Как построить график зависимости тока в обмотке якоря от напряжения на зажимах якоря?

Лабораторная работа № 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ЗОННО-ФАЗНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: произвести расчёт математической модели управляемого тиристорного выпрямителя с зонно-фазным регулированием выпрямленного напряжения [5].

6.1. Теоретическое описание объекта моделирования

Управляемые выпрямители с зонно-фазным регулированием напряжения являются основными силовыми преобразователями на таких отечественных электровозах, как ВЛ80Р, ВЛ85, ЭП1в/и, 2ЭС5К и т. д.

В работе необходимо смоделировать упрощённую силовую схему электровоза, содержащую источник высокого напряжения *ИВН* (25 кВ), тяговый трансформатор *ТТ*, выпрямитель *ВИП*, RL-цепь, имитирующую

цепь тяговых двигателей $ТЭД$ и систему управления $СУ$, генерирующую импульсы управления для тиристоров выпрямителя. Принципиальная схема такой модели представлена на рис. 6.1.

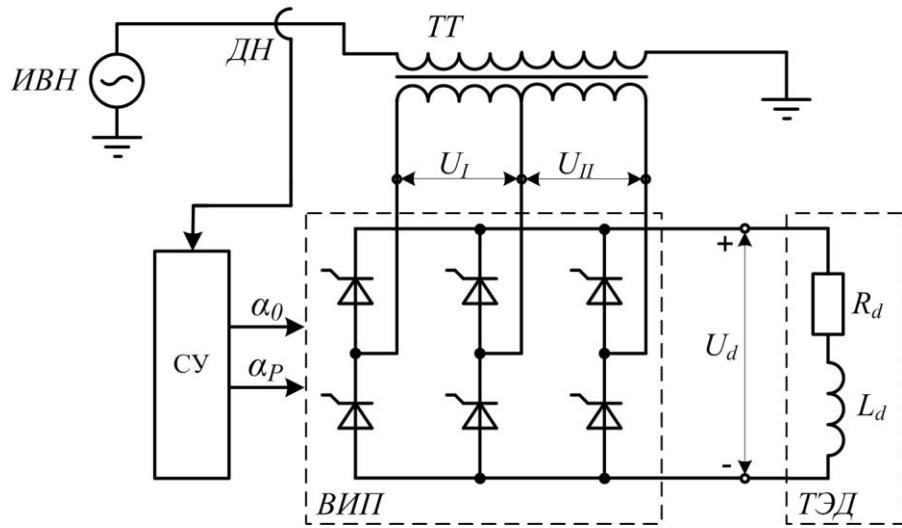


Рис. 6.1. Принципиальная схема электровоза

Функционирует такая схема следующим образом. Напряжение с источника $ИВН$ поступает на первичную обмотку тягового трансформатора TT , который понижает его до необходимого уровня. Ко вторичной обмотке тягового трансформатора TT подключён выпрямитель $ВИП$, к выходу которого подключена цепь тяговых двигателей $ТЭД$. Система управления $СУ$ с помощью датчика напряжения $ДН$ следит за фазой напряжения в сети и в соответствии с ним выдаёт импульсы управления α_0 , α_p , которые открывают тиристоры. В результате открытия тиристоров, на тяговые двигатели подаётся выпрямленное пульсирующее напряжение. Форма напряжения на выходе выпрямителя $ВИП$ представлена на рис. 6.2.

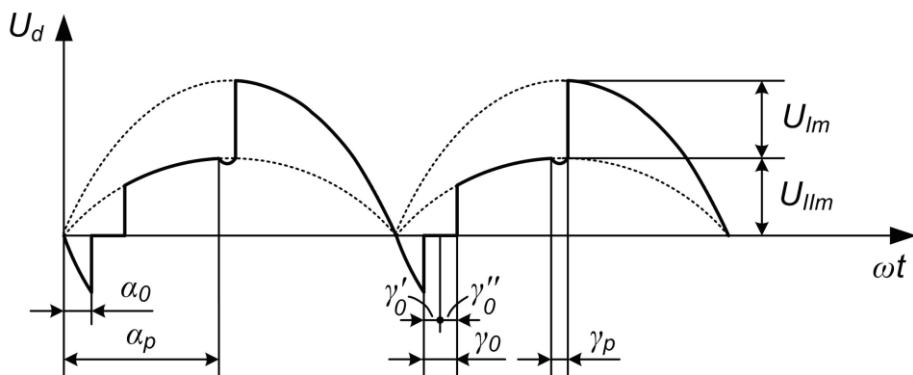


Рис. 6.2. Форма напряжения на выходе выпрямителя при зонно-фазном регулировании напряжения

На рис. 6.2 принятые следующие обозначения: α_0 , α_p – углы регулирования; γ_0 , γ_p – углы коммутации; U_{I_m} , U_{II_m} – соответственно амплитудное значение напряжения первой и второй секции вторичной обмотки тягового трансформатора.

На рис. 6.3 представлены диаграммы, поясняющие принцип формирования импульсов управления.

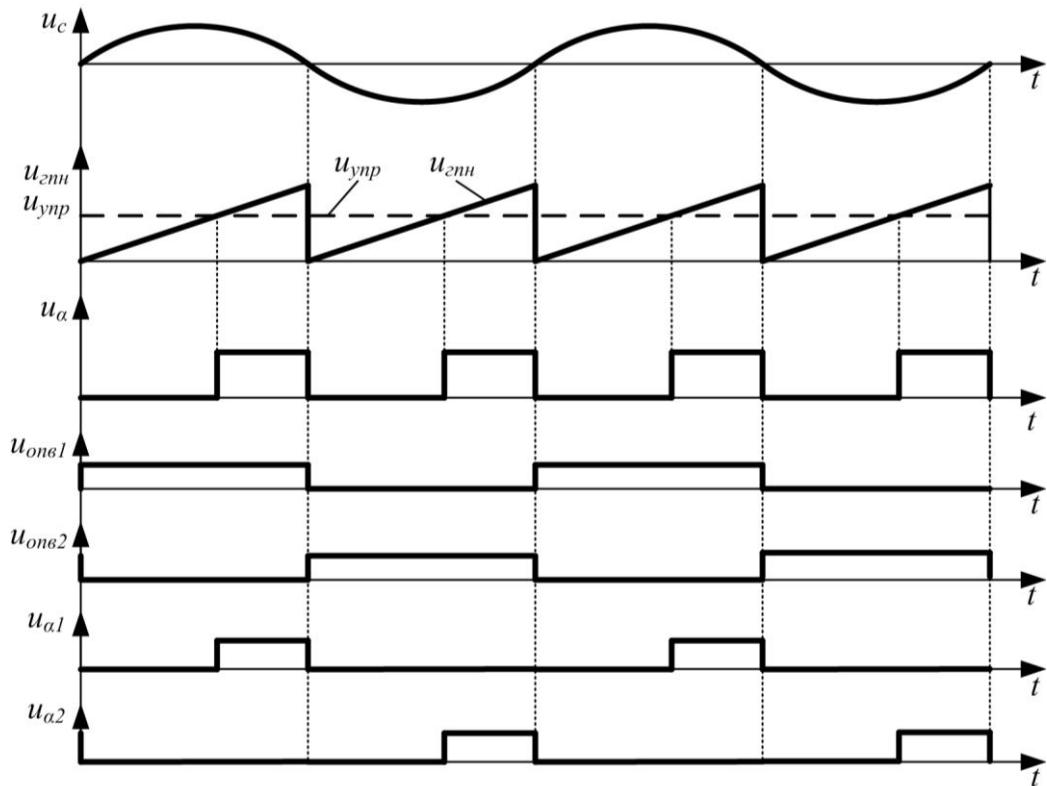


Рис. 6.3. Диаграммы, поясняющие принцип формирования импульсов управления

Импульсы управления формируются следующим образом. Сигнал о напряжении сети u_c поступает на вход системы управления. В системе управления СУ формируется пилообразный сигнал u_{gpn} , фаза которого совпадает с фазой питающего напряжения u_c . Сигнал сравнивается с сигналом управления u_{upr} . Когда сигнал u_{gpn} становится больше сигнала u_{upr} , логическими элементами формируется сигнал u_α , являющийся углом регулирования для тиристоров. Далее этот сигнал надо распределить по диагональным группам тиристоров в соответствии с фазой питающего напряжения. Это осуществляется благодаря сигналам u_{onb1} и u_{onb2} . На первую

группу тиристоров импульсы попадают в первый полупериод питающего напряжения (сигнал $u_{\alpha 1}$), а на вторую группу – во второй полупериод (сигнал $u_{\alpha 2}$).

6.2. Блоки, необходимые для создания модели

Для выполнения лабораторной работы, кроме блоков изученных ранее, потребуются следующие блоки:

- *Linear Transformer* – линейный трансформатор. Представляет собой модель двух или трёх обмоточного трансформатора. При этом нелинейность сердечника не учитывается. Для получения трёхобмоточного трансформатора необходимо в настройках блока поставить галочку рядом с параметром *Three windings transformer*, а для получения двухобмоточного трансформатора – убрать. В параметрах блока также необходимо задать следующие основные параметры: номинальная полная мощность и номинальная частота (*Nominal power and frequency*), ВА Гц; параметры первой обмотки (*Winding 1 parameters*) – действующее значение напряжения обмотки В, активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки; параметры второй обмотки (*Winding 2 parameters*) – действующее значение напряжения обмотки В, активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки; параметры третьей обмотки (*Winding 3 parameters*) – действующее значение напряжения обмотки В, активное сопротивление (о.е.) и индуктивность рассеяния (о.е.) обмотки; сопротивление цепи намагничивания и индуктивность цепи намагничивания (*Magnetization resistance and reactance*), о.е. Если в одной строке записывается несколько значений, то разделять их следует с помощью пробела или запятой. Внешний вид блока показан на рис. 6.4, а.

- *Thyristor* – тиристор. В упрощённой форме моделирует полупроводниковый прибор – тиристор. Модель состоит из последовательно включенных резистора, индуктивности, источника постоянного напряжения и ключа. При положительном напряжении на тиристоре и наличии положительного сигнала на управляющем электроде происходит замыкание ключа, и тиристор считается открытым. Размыкание ключа (закрытие тиристора) выполняется при снижении тока, протекающего через тиристор, до нуля. Устройство имеет встроенную демпфирующую RC-цепь, включен-

ную между анодом и катодом. В настройках блока необходимо задать следующие параметры: активное сопротивление во включенном состоянии (Resistance Ron), Ом; индуктивное сопротивление во включенном состоянии (Inductance Lon), Гн; падение напряжения в прямом направлении (Forward voltage Uf), В; начальное значение катодного тока (Initial current Ic), А; активное сопротивление демпфирующей цепи (Snubber resistance Rs), Ом; ёмкостное сопротивление демпфирующей цепи (Snubber capacitance Cs), Ф. Внешний вид блока показан на рис. 6.4, б.

• *Hit Crossing* – индикатор пересечения. На выходе создаёт единичный сигнал, когда входной сигнал становится равным заданному значению. В момент равенства входного сигнала заданному значению блок вырабатывает единичный сигнал длительностью в один шаг модельного времени. В настройках блока необходимо задать значение сигнала, достижение которого (пересечение с которым) на выходе требуется определить (Hit crossing offset). Также в настройках необходимо задать направление пересечения входным сигналом заданного значения (Hit crossing direction): возрастание (rising); убывание (falling); любое направление (either). Внешний вид блока показан на рис. 6.4, в.

• *Compare To Zero* – определитель значения входного сигнала относительно нуля. На выходе создаёт единичный сигнал, когда входной сигнал удовлетворяет заданному логическому условию относительно нуля. Логическое условие задаётся в настройках блока. Внешний вид блока показан на рис. 6.4, г.

• *Relay* – реле. Используется для реализации релейной нелинейности. В настройках блока необходимо задать следующие параметры: значение входного сигнала, при котором реле переходит во включенное состояние (Switch on point); значение входного сигнала, при котором реле переходит в выключенное состояние (Switch off point); величина на выходе реле при включенном состоянии (Output when on); величина на выходе реле при выключенном состоянии (Output when off). Внешний вид блока показан на рис. 6.4, д.

• *AND* – логический элемент «И». На выходе создаёт единичный сигнал если на входах элемента сигналы равны единице и более (функция логического элемента «И»). В настройках можно изменять логическое условие и количество входов. Внешний вид блока показан на рис. 6.1, е.

- *Sign* – определитель знака входного сигнала. Если входной сигнал больше нуля, то на выходе формируется сигнал, равный «1», а если входной сигнал меньше нуля, то формируется сигнал, равный «-1». Внешний вид блока показан на рис. 6.4, жс.

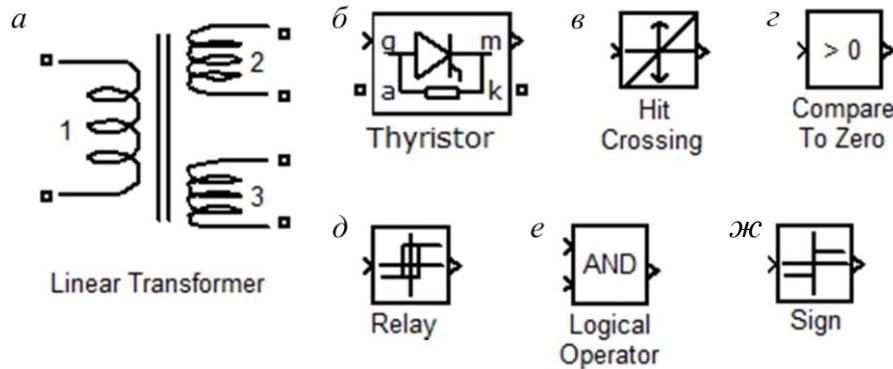


Рис. 6.4. Схемы элементов, необходимых для выполнения лабораторной работы

Помимо представленных блоков, в работе используются: *Ground*, *Scope*, *Gain*, *Step*, *Voltage Measurement*, *Current Measurement*, *XY Graph*, *Series RLC Branch*, *Constant*, *Sum*, *Integrator*, *AC Voltage source*, *Sum*, *Integrator*, *AC Voltage Source*.

6.3. Порядок выполнения работы

1. Создать модель упрощенной силовой схемы электровоза. Сохранить внешний вид схемы модели и подсистем в отчёте.

Внешний вид модели представлен на рис.6.5.

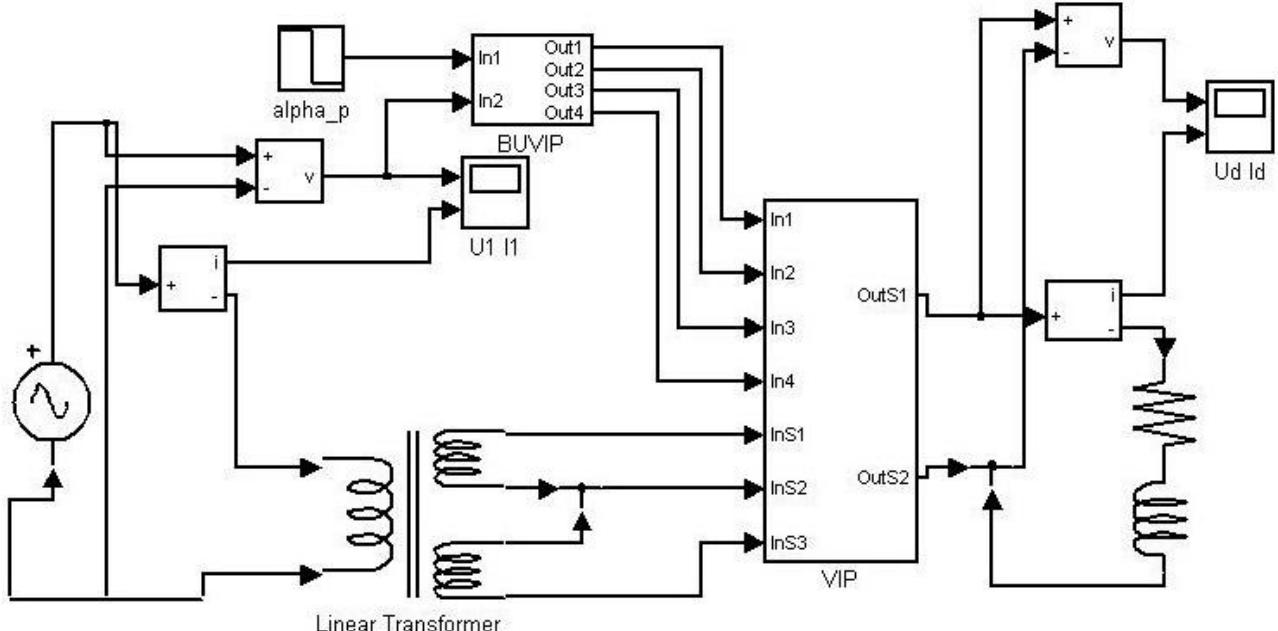


Рис. 6.5. Упрощённая модель электровоза с зонно-фазным регулированием напряжения

Внешний вид подсистем BUVIP и VIP представлены на рис. 6.6 и 6.7.

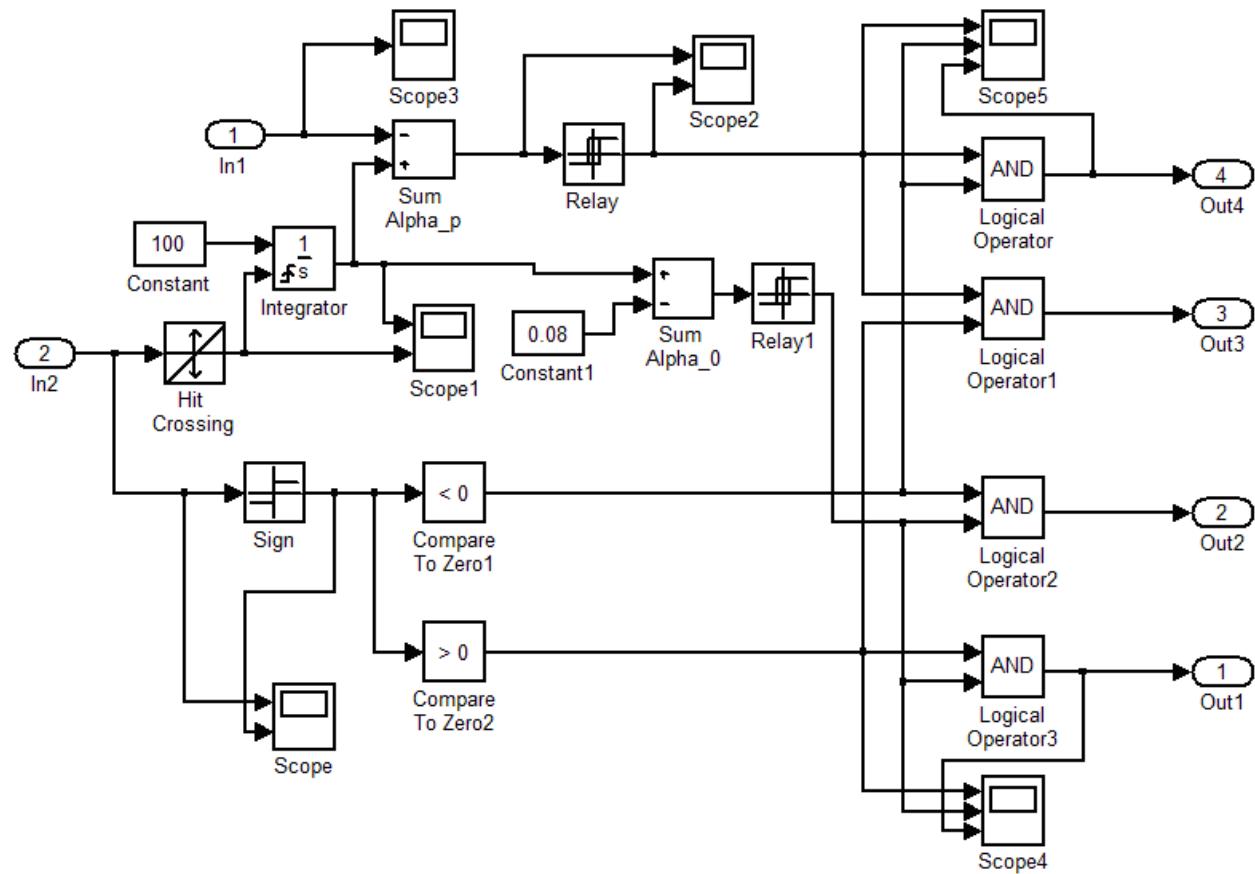


Рис. 6.6. Внешний вид подсистемы BUVIP

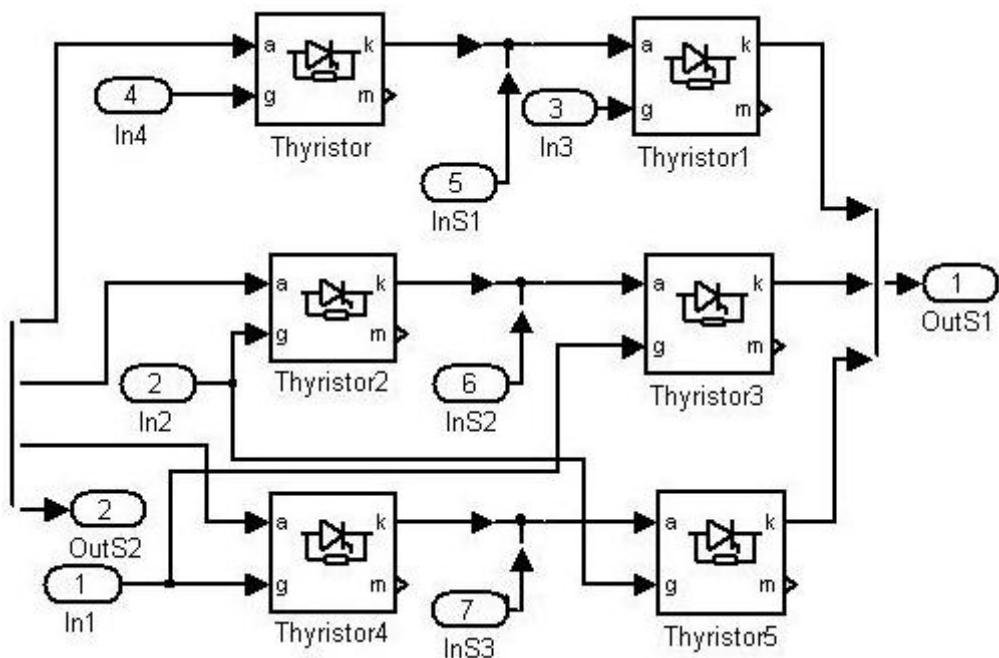


Рис. 6.7. Внешний вид подсистемы VIP

Представленная модель работает следующим образом. Первичная обмотка тягового трансформатора (Linear Transformer) питается от источника с амплитудным напряжением 35250 В, а к двум секциям вторичной обмотки подключен тиристорный мост (VIP). К выходу тиристорного моста подключена активно-индуктивная нагрузка (Series RLC Branch), имитирующая тяговые двигатели.

Тиристорный мост управляет с помощью системы управления (BUVIP), которая работает следующим образом. Датчик напряжения в основной модели формирует сигнал, равный напряжению источника питания. Этот сигнал поступает на второй вход системы управления (In2) и далее на индикатор пересечения и на определитель знака входного сигнала. С выхода индикатора пересечения сигнал поступает на сбрасывающий вход интегратора. На интегрирующий вход интегратора поступает постоянный сигнал, соответственно на выходе интегратора сигнал будет увеличиваться с постоянной скоростью. Сигналы с индикатора пересечения необходимы для обнуления выходного сигнала интегратора. Поскольку индикатор пересечения выдаёт сигнал каждые 0,01 с (полупериод синусоиды 50 Гц), то на выходе интегратора формируется пилообразный сигнал с шагом 0,01 с и амплитудой, равной «1». Этот пилообразный сигнал поступает на два сумматора. Первый сумматор (Sum Alpha_p) служит для определения угла регулирования α_p , а второй сумматор (Sum Alpha_0) – для угла регулирования α_0 .

В первом сумматоре происходит вычитание сигнала, полученного из внешнего входа In1, из пилообразного сигнала. Например, если входной сигнал равен 0,5, то на выходе первого сумматора появится пилообразный сигнал, смещённый вниз по горизонтальной оси на 0,5. К выходу первого сумматора подключено первое реле (Relay), которое выдаёт на выходе «1» если входной сигнал становится больше нуля и выдаёт «0» если входной сигнал меньше «-0,01». А поскольку на вход реле поступает пилообразный сигнал с периодом 0,01 с, минимальным значением «-0,5», и максимальным значением «0,5», то на выходе реле будет положительный единичный сигнал с момента времени 0,005 с (входной сигнал реле становится больше нуля) до 0,01 с (входной сигнал реле становится меньше «-0,01»). Аналогичный процесс будет повторяться каждый полупериод. Сигнал с выхода первого реле будет являться углом регулирования α_p . Этот угол регулируется с помощью сигнала, поступающего с внешнего входа In1.

Функция второго сумматора и второго реле аналогична первому сумматору и первому реле. Отличие лишь заключается в том, что во втором сумматоре из «пицы» вычитается постоянный сигнал, создаваемый блоком Constant1 и равный «0,08». Сигнал с выхода второго реле будет являться углом регулирования α_0 . Этот угол регулируется с помощью сигнала, поступающего с внешнего блока Constant1.

Определитель знака входного сигнала и следующие за ним элементы служат для распределения сигналов управления (углы регулирования) по полупериодам питающего напряжения между плечами тиристорного моста. Происходит это следующим образом. На выходе определителя знака входного сигнала в первый полупериод сетевого напряжения формируется сигнал, равный «-1», а во второй полупериод – сигнал, равный «-1». Далее этот сигнал поступает на первый и второй элементы – определители входного сигнала относительно нуля: Compare To Zero 1 и Compare To Zero 2. На выходе элемента Compare To Zero 1 в первый полупериод сетевого напряжения формируется сигнал, равный «1», а во второй полупериод – сигнал, равный нулю. На выходе элемента Compare To Zero 2 в первый полупериод сетевого напряжения формируется сигнал, равный нулю, а во второй полупериод – сигнал, равный «1». Далее в соответствии с полупериодом при помощи логических элементов сигналы распределяются по соответствующим выходам системы управления.

2. Задать параметры расчёта модели и запустить расчёт. Сохранить полученные осциллограммы

Источник напряжения должен генерировать напряжение амплитудой 35,25 кВ, с частотой 50 Гц и фазой, равной нулю. Параметры тягового трансформатора и тиристора приведены соответственно в табл. 6.1 и 6.2. Параметры RL-элементов, имитирующих тяговые двигатели, составляют 1 Ом и 3 мГн.

Таблица 6.1
Параметры блока Linear transformer

Параметр	Значение
Номинальная полная мощность и номинальная частота	75e3 60
Параметры первой обмотки	14.4e3 0,01 0,03
Параметры второй обмотки	180 0,02 0
Параметры третьей обмотки	360 0,02 0
Сопротивление и индуктивность цепи намагничивания	50 50

Таблица 6.2
Параметры блока Thyristor

Параметр	Значение
Активное сопротивление во включенном состоянии	0,001
Индуктивное сопротивление во включенном состоянии	0
Падение напряжения в прямом направлении	0,8
Начальное значение катодного тока	0
Активное сопротивление демпфирующей цепи	500
Ёмкостное сопротивление демпфирующей цепи	$250e^{-9}$

Параметры элемента источника ступенчатого сигнала (Alpha_p): время переключения 0,02 с; значение сигнала до переключения – 2; значение сигнала после переключения выбирается согласно варианту из табл. 6.3 в строке « $u_{\text{упр}}$ ».

Таблица 6.3
Варианты для индивидуального задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$u_{\text{упр}}$	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9

Настройки элементов системы управления. Индикатор пересечения: значение сигнала, достижение которого на входе требуется определить – 0; направление пересечения входным сигналом заданного значения – любое направление. Реле: значение входного сигнала, при котором реле переходит во включенное состояние, – 0; значение входного сигнала, при котором реле переходит в выключенное состояние, – –0,01; величина на выходе реле при включенном состоянии – 1; величина на выходе реле при выключенном состоянии – –1.

Параметры расчёта модели: время моделирования 0–0,2 с; метод ode23s.

Если модель создана правильно, то должны построиться осцилограммы, аналогичные представленным на рис. 6.8, 6.9. На полученных осцил-

лограммах необходимо изменить масштаб таким образом, чтобы на нём изображались только последние два периода сетевого напряжения (рис. 6.8, 6.9).

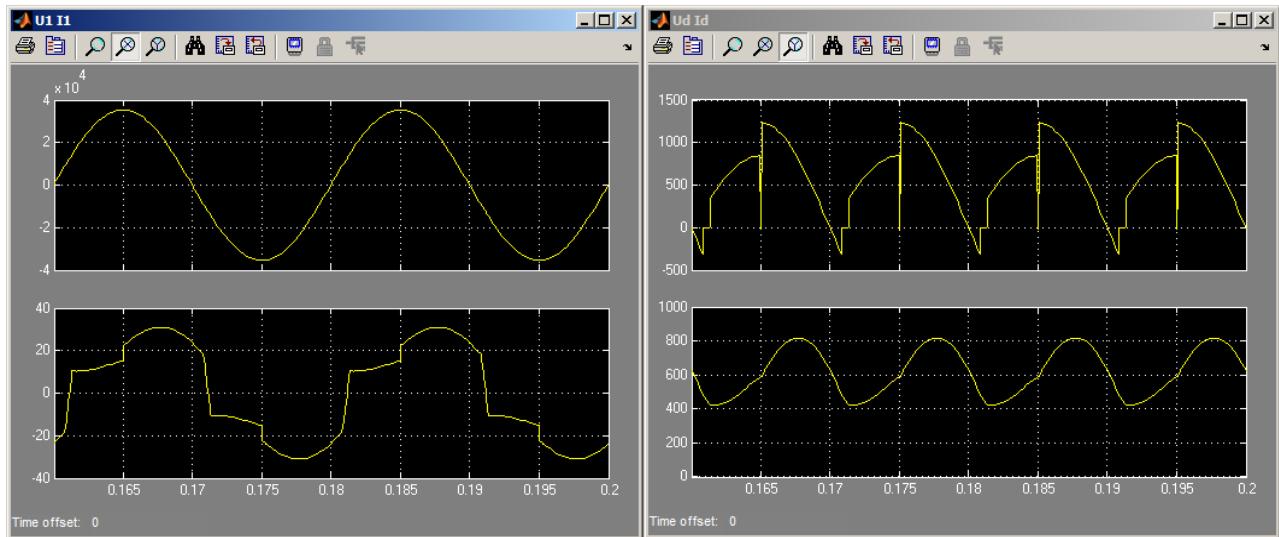


Рис. 6.8. Осциллограммы, построенные в основной модели

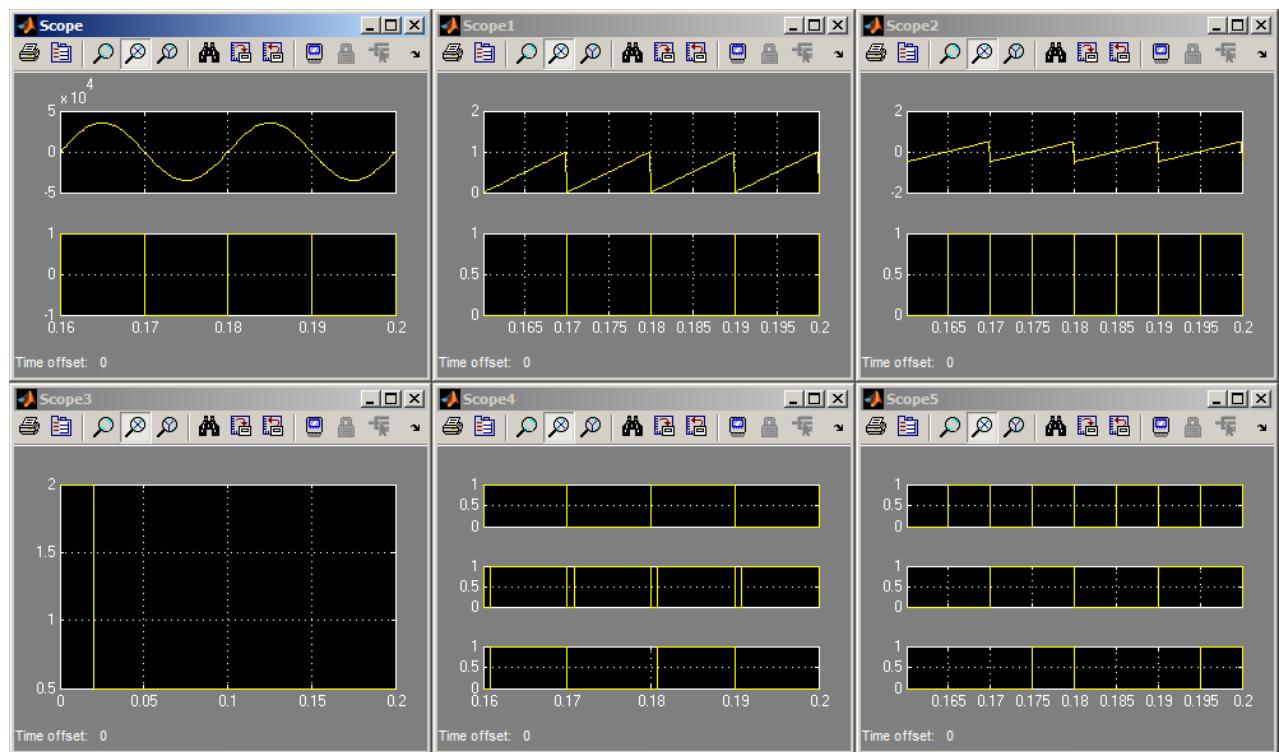


Рис. 6.9. Осциллограммы, построенные в модели управляющей системы

3. Сделать вывод о проделанной работе.

Содержание отчёта:

- цель работы;
- введение;
- внешний вид модели и подсистем (п. 1);
- осциллограммы, полученные при расчёте модели (п. 2);
- вывод.

Контрольные вопросы

1. Как функционирует система управления выпрямителем?
2. Как изменяется угол управления тиристорами α_0 и α_P ?
3. Как функционирует представленная модель?
4. Описание полученных осциллограмм.
5. Какие блоки использовались в работе? Какие они выполняют функции?
6. По каким цепям замыкаются переменный и постоянный токи?
7. Как вычисляется момент сопротивления на валу якоря?

Лабораторная работа № 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОГО ИНВЕРТОРА ТОКА

Цель работы: произвести расчёт зависимого инвертора тока, инвертирующего ток, генерируемый машиной постоянного тока (генератором), в цепь переменного тока [6].

7.1. Теоретическое описание объекта моделирования

Зависимые инверторы тока применяются на таких отечественных электровозах, как ВЛ80Р, ВЛ85, ЭП1в/и, 2ЭС5К. Они используются для рекуперации энергии движения в режиме электрического торможения. При переходе в такой режим тяговые машины (двигатели) переключаются на независимое возбуждение. При этом обязательным условием является смена полярности обмоток возбуждения тяговой машины.

В работе необходимо создать модель инвертора тока с тяговой машиной, работающей в режиме генератора. Принципиальная схема такого инвертора представлена на рис. 7.1.

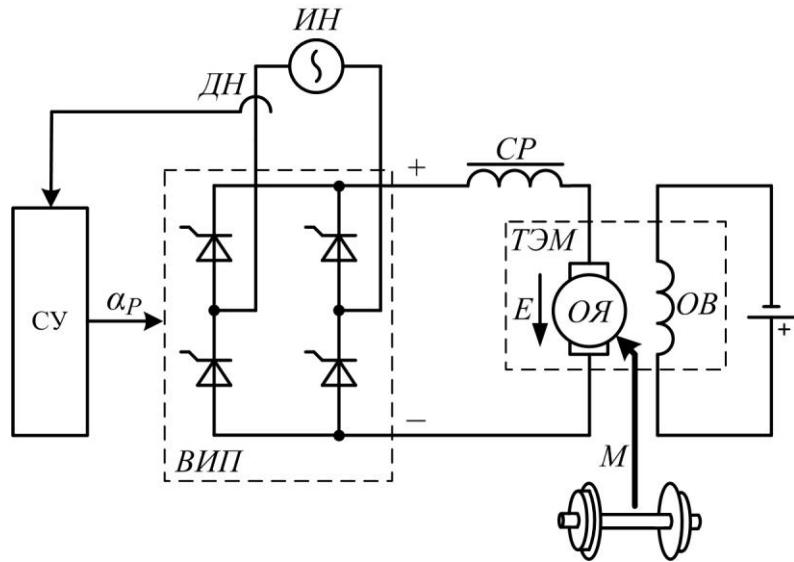


Рис. 7.1. Принципиальная схема электровоза в режиме рекуперации

Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза при рекуперативном торможении является зависимым инвертором. Он осуществляет инвертирование постоянного тока тяговых двигателей в цепь переменного тока (питающую сеть).

Функционирует схема следующим образом. На спуске сила гравитации заставляет поезд скатиться вниз. В результате этого поезд приводится в движение, и на осях электровоза создаётся момент силы M . Этот момент заставляет вращаться якорь тяговой электрической машины ТЭМ. Поскольку обмотка возбуждения этой машины ОВ питается от независимого источника, то на зажимах обмотки якоря образуется эдс E . Система управления формирует импульсы управления в зависимости от фазы переменного напряжения. Фаза переменного напряжения определяется с помощью датчика напряжения.

Под действием эдс якоря по цепи обмотки якоря и открытым тиристорам начинает протекать ток. Тиристоры выпрямителя открываются в конце каждого полупериода таким образом, что направление эдс обмотки якоря совпадает с направлением эдс цепи переменного тока (вторичной обмотки возбуждения). Поскольку к концу полупериода этот ток не уменьшается до нуля (условие закрытия тиристоров), то он продолжает протекать по той же цепи в следующем полупериоде. А поскольку в сле-

дующем полупериоде эдс цепи переменного тока имеет уже обратное направление, то это будет означать то, что ток обмотки якоря передаётся в цепь переменного тока (режим инвертирования). К концу следующего полупериода подаются импульсы управления на следующие диагональные тиристоры, что приводит к их открытию и закрытию других. Дальнейшие процессы повторяются.

В работе для наглядности исследуется работа инвертора на первой зоне регулирования. На этой зоне напряжение на входе инвертора (зажимы постоянного тока) имеет форму, представленную на рис. 7.2.

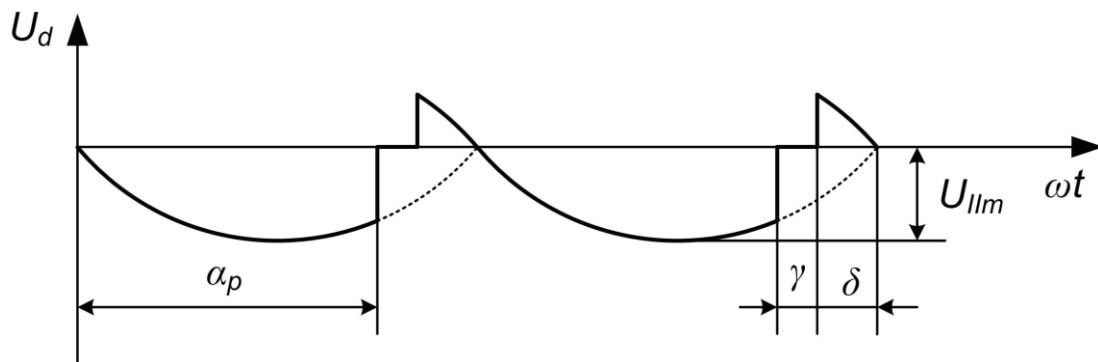


Рис. 7.2. Напряжение на входе инвертора на первой зоне регулирования

На рис. 7.2 приведены следующие обозначения: α_p – угол регулирования; γ – угол коммутации; δ – угол запаса инвертора; U_{llm} – амплитудное значение напряжения секции вторичной обмотки тягового трансформатора, к которой подключен инвертор.

7.2. Блоки, необходимые для создания модели

Для выполнения лабораторной работы, кроме блоков изученных ранее, потребуются следующие блоки:

• *Pulse Generator* – генератор прямоугольных импульсов. В настройках блока необходимо задать следующие параметры: амплитуда импульсов (Amplitude); период импульсов (Period), с; ширина импульсов (Pulse Width), в процентах от периода; задержка по фазе (Phase delay), с. Внешний вид блока показан на рис. 7.3.

Помимо представленных блоков, в работе используются: *Ground*, *Scope*, *Gain*, *Voltage Measurement*, *Terminator*, *DC Machine*, *Subsystem*, *AC Voltage Source*, *Current Measurement*, *Series RLC Branch*, *Constant*, *Sum*, *Demux*, *Compare To Zero*, *And*, *Bus Bar (Thin Vert)*.

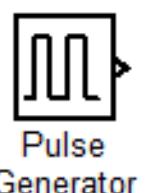


Рис. 7.3.
Внешний
вид эле-
мента
*Pulse
Generator*

7.3. Порядок выполнения работы

1. Создать упрощенную модель электровоза в режиме рекуперации. Сохранить внешний вид схемы в отчёте.

Модель инвертора с тяговой машиной, работающей в режиме генератора, представлена на рис. 7.4.

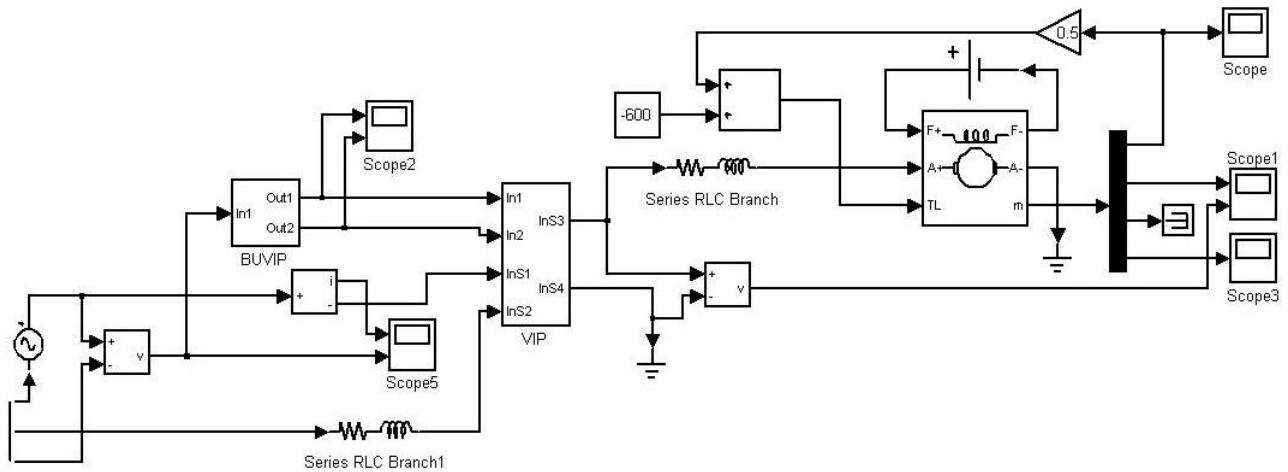


Рис. 7.4. Внешний вид инвертора с тяговой машиной, работающей в режиме генератора

Внешний вид подсистемы BUVIP представлен на рис. 7.5, а подсистемы VIP – на рис. 7.6.

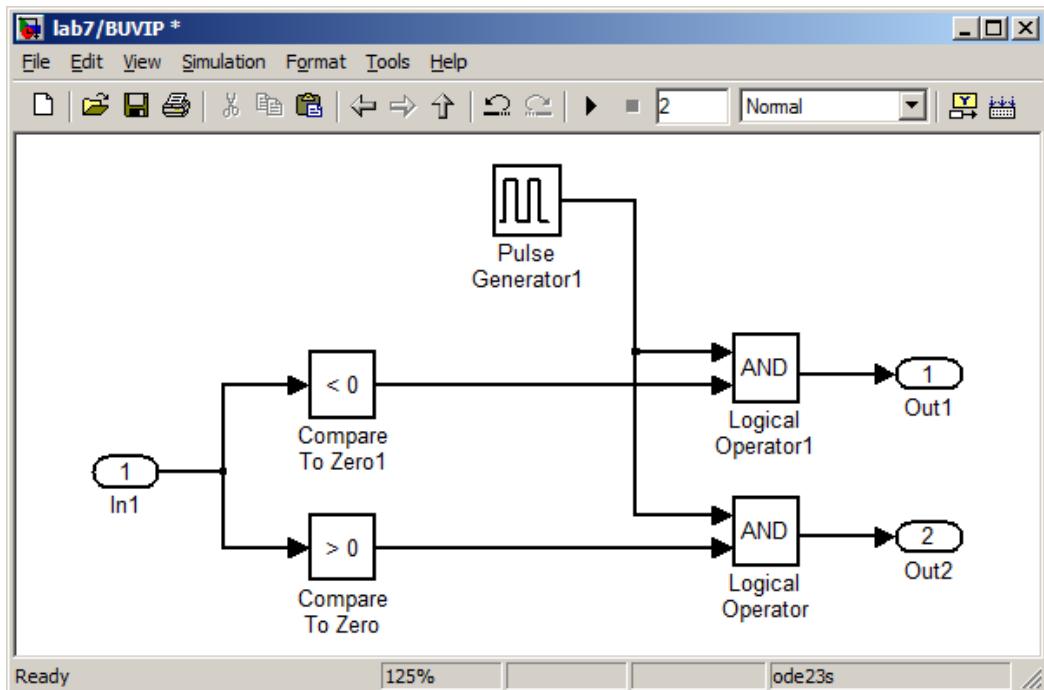


Рис. 7.5. Внешний вид подсистемы VIP

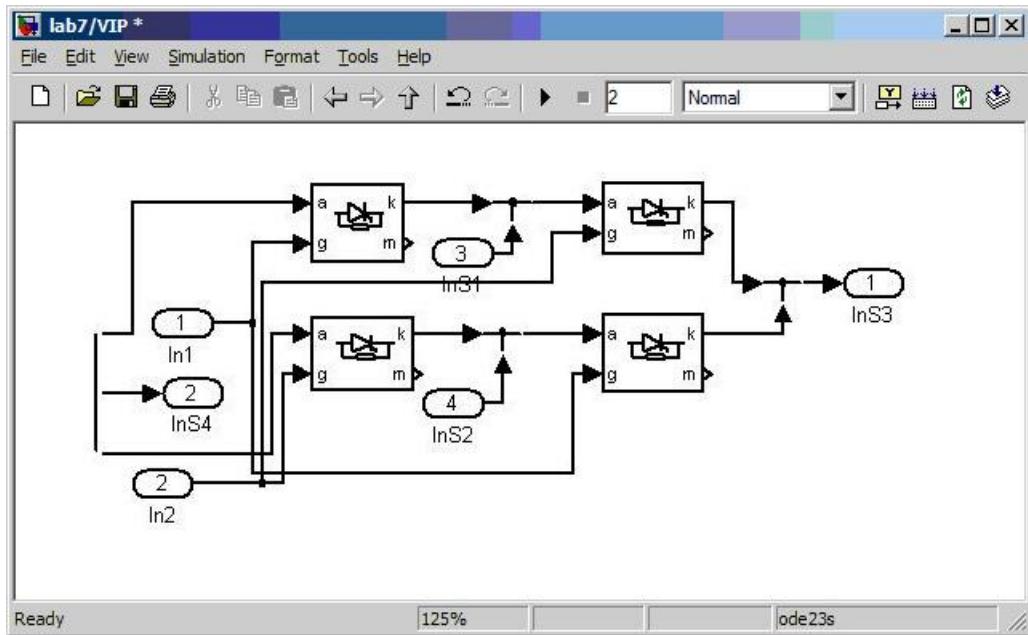


Рис. 7.6. Внешний вид подсистемы VIP

Функционирует модель следующим образом. Питание обмоток машины постоянного тока осуществляется отдельным источником постоянного напряжения, подключенного обратной полярностью (по сравнению с двигателями, рассмотренными в предыдущих лабораторных работах). Момент сопротивления на валу машины образуется с помощью суммирования постоянного момента, создаваемого блоком Constant1, и динамического момента, создаваемого вращением машины и задаваемого с помощью обратной связи от частоты оборотов вала через элемент Gain. Постоянным моментом на реальном электровозе является потенциальная энергия при движении поезда на склоне. В работе значение постоянного момента составляет «-600». Под действием внешнего момента якорь машины начинает вращаться. Благодаря наличию тока в обмотке возбуждения, а соответственно и магнитного потока, на зажимах якоря возникает эдс.

Тиристорный мост управляется с помощью системы управления BUVIP. Система управления распределяет импульсы управления (углы регулирования α_p) с генератора прямоугольных импульсов по соответствующим диагональным тиристорам в соответствии с полупериодом переменного напряжения. Под воздействием углов регулирования тиристоры начинают открываться в заданные моменты времени, осуществляя инвертирование тока машины постоянного тока в цепь переменного тока.

2. Задать параметры расчёта модели и запустить расчёт. Сохранить полученные осциллограммы.

Параметры тиристора и машины постоянного тока в работе принять равными параметрам, принятым в лабораторной работе № 6.

В настройках источника переменного напряжения необходимо задать следующие параметры: амплитуда генерируемого напряжения – выбирается согласно варианту из табл. 7.1 (строка $U_{\text{амп}}$); фаза – 0; частота – 50 Гц. Сопротивление цепи переменного тока составляет 1 мОм; 0,5 мГн.

Таблица 7.1

Варианты для индивидуального задания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$U_{\text{амп}}, \text{В}$	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575
$U_{\text{возб}}, \text{В}$	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425

В блок Pulse Generator1 необходимо задать параметры: амплитуда импульсов – 1; период импульсов – 0,02 с; ширина импульсов – 10; задержка по фазе – 0,018 с. В блок Pulse Generator» необходимо задать параметры: амплитуда импульсов – 1; период импульсов – 0,02 с; ширина импульсов – 10; задержка по фазе – 0,008 с.

Параметры сопротивлений в цепи постоянного тока (элемент Series RLC Branch1) составляют 5 Ом и 10 мГн. Напряжение питания обмоток возбуждения выбирается согласно варианту из табл. 7.1 (строка $U_{\text{возб}}$).

Параметры расчёта модели: время моделирования 0–2 с; метод ode23s.

Если все параметры заданы правильно, то должны построиться осциллограммы, аналогичные представленным на рис. 7.7. Так же как и в лабораторной работе № 6, на некоторых полученных осциллограммах необходимо изменить масштаб таким образом, чтобы на нём изображались только последние два периода сетевого напряжения (рис. 7.7).

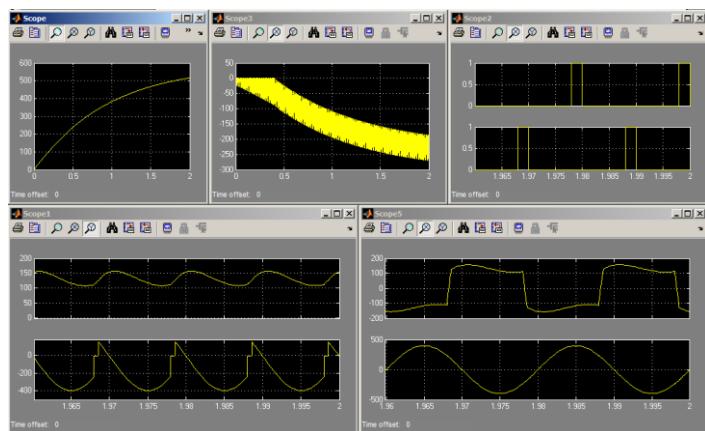


Рис. 7.7. Осциллограммы, полученные в результате расчёта модели

3. Сделать вывод.

Содержание отчёта:

- цель работы;
- введение;
- внешний вид модели и подсистем (п. 1);
- осциллограммы, полученные при расчёте модели (п. 2);
- вывод.

Контрольные вопросы

1. Как функционирует система управления инвертором?
2. Как осуществляется инвертирование тока обмотки якоря?
3. Как функционирует представленная модель?
4. Описание полученных осциллограмм.
5. Какие блоки использовались в работе? Какие они выполняют функции?
6. Как вычисляется момент сопротивления на валу?
7. Что такое постоянный и динамический моменты на валу?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008 – 288 с.
2. Виртуальная лаборатория математического моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.mathmod.narod.ru/>
3. Черных, И. В. «Simulink: Инструмент моделирования динамических систем». Консультационный центр MATLAB компании Softline [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://matlab.exponenta.ru/>
4. Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины: лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардонов. – СПб. : КОРОНА прнт, 2003. – 256 с.
5. Плакс, А. В. Системы управления электрическим подвижным составом : учебник для вузов ж.-д. транспорта / А. В. Плакс. – М. : Маршрут, 2005. – 360 с.
6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л. А. Бессонов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 2002. – 638 с.

Учебное издание

Кабалык Юрий Сергеевич

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Методическое пособие

Редактор *А.А. Иванова*
Технический редактор *С.С. Заикина*

План 2012 г. Поз. 1.18. Подписано в печать 18.04.2012.
Уч.-изд. л. 2,0. Усл. печ. л. 4,0. Зак. 145. Тираж 50 экз. Цена 240 р.

Издательство ДВГУПС
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.