

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

**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Институт инновационных технологий
Кафедра “Автотранспортная и техносферная безопасность”

Сабуров Павел Сергеевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Методические указания к лабораторным работам

Владимир - 2016.

УДК 004.94

ББК 32.97

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и электронные системы автомобилей» Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых
Веселов О.В.

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Математическое моделирование» для студентов ВлГУ обучающихся по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность» / Сост. П.С. Сабуров., Владим. гос. ун-т., Владимир, 2013. – с.

Подготовлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Математическое моделирование», содержат методические указания по выполнению лабораторных работ, список рекомендуемой литературы. Приведены варианты заданий и исходных данных для моделирования, определено содержание работы. Предусматривается построение математических моделей в программах MatLab, GPSS World. Даются развернутые методические указания по выполнению всех этапов работы. Некоторые разделы иллюстрируются примерами. Приведены рекомендации по оформлению работы и форме представления материала.

Предназначены для подготовки бакалавров по направлению 280700 «Техносферная безопасность» Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых.

УДК 004.94

ББК 32.97

© Владимирский государственный университет имени
А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ)

Оглавление

Лабораторная работа №1. Знакомство с Matlab. Основные инструментарии Simulink.

Лабораторная работа №2. Библиотека SimPowerSystems. Моделирование электрической принципиальной схемы.

Лабораторная работа №3. Моделирование работы электродвигателя.

Лабораторная работа №4. Построение SPS-моделей с полупроводниковыми элементами.

Лабораторная работа №5. Анализ динамических свойств устройств силовой электроники во временной области.

Лабораторная работа №6. Система имитационного моделирование GPSS World.

Лабораторная работа №7. Моделирование одноканальных разомкнутых СМО с простейшими потоками заявок.

Лабораторная работа №8. Моделирование одноканальных безприоритетных систем.

Лабораторная работа №9. Моделирование одноканальных разомкнутых СМО с равномерными потоками заявок.

Лабораторная работа №10. Моделирование многоканальных систем.

Лабораторная работа №11. Моделирование многоканальных разомкнутых СМО с простейшими потоками заявок.

Лабораторная работа №13. Моделирование приоритетных систем с пуассоновским потоками заявок.

Лабораторная работа №13. Моделирование многоканальных разомкнутых СМО со смешанными потоками заявок.

Аннотация

Данные методические указания предназначены для студентов II, III курсов, обучающихся по дисциплине “Математическое моделирование. В методических указаниях изложено описание программ MatLab и GPSS World, описание библиотек Simulink и SomPowerSystems, разобраны примеры, а так же даны варианты заданий для выполнения лабораторных работ.

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.

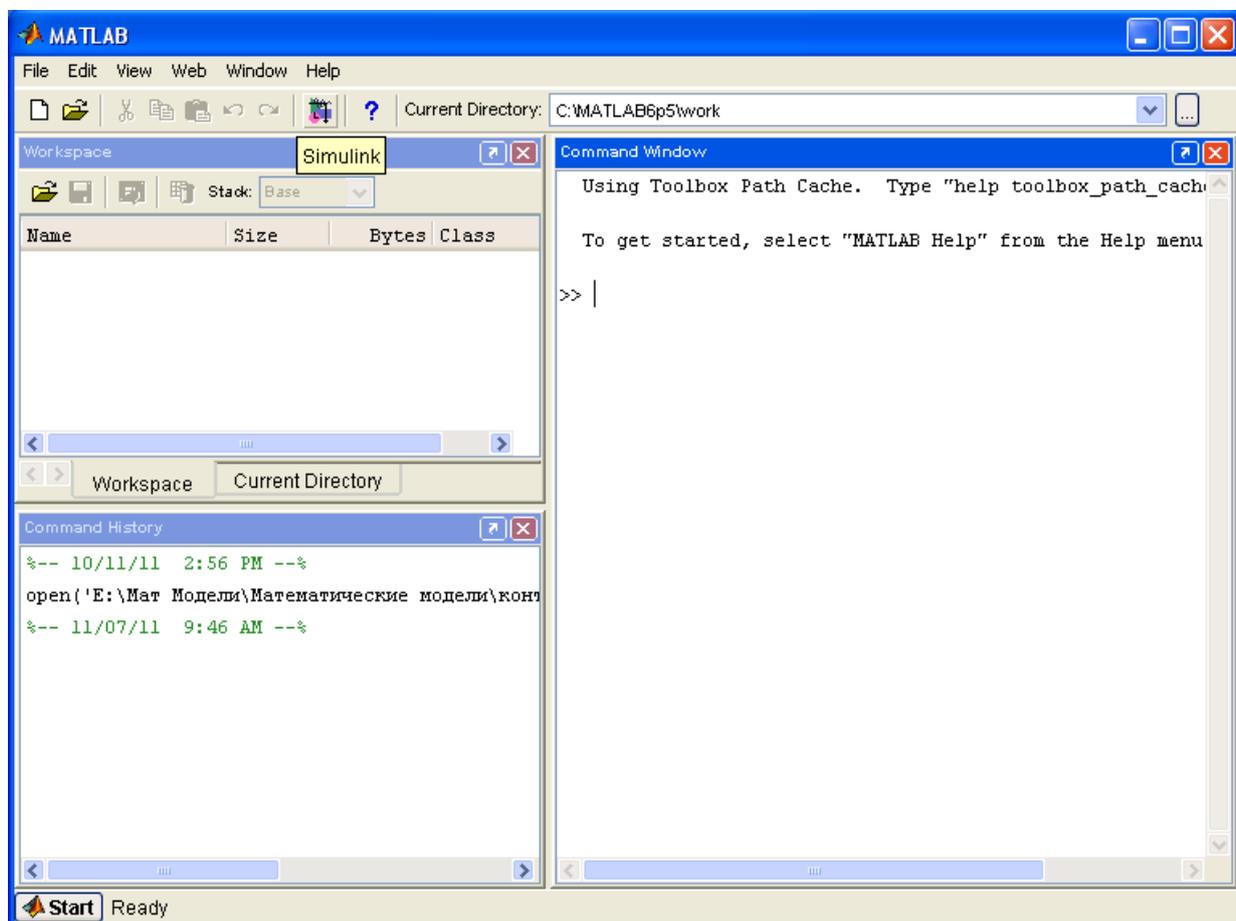


Рис.1.1. Окно программы Matlab

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.

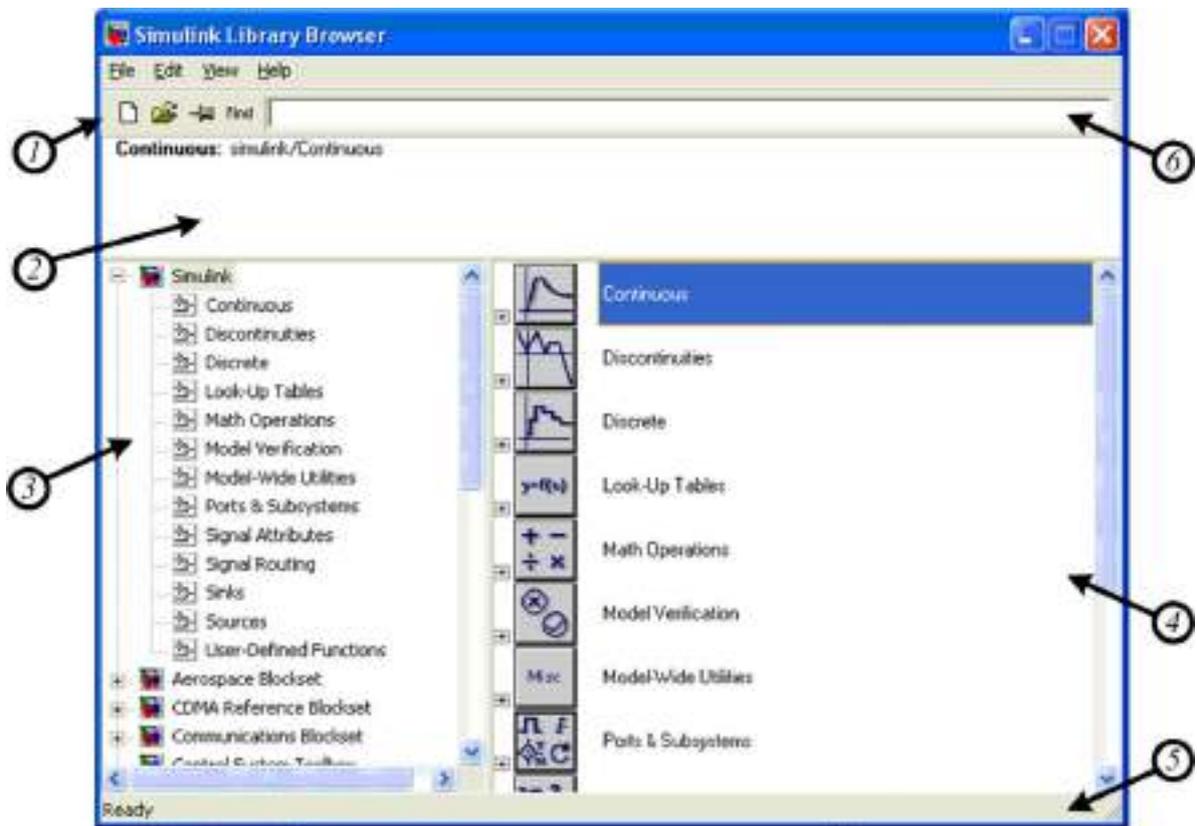


Рис. 1.2. Внешний вид обозревателя окна библиотеки: 1 – панель инструментов с кнопками наиболее часто используемых команд; 2 – окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном разделе библиотеки и блоке; 3 – список разделов библиотеки; 4 – список вложенных блоков или разделов библиотеки. 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

этом 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 бло-

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.

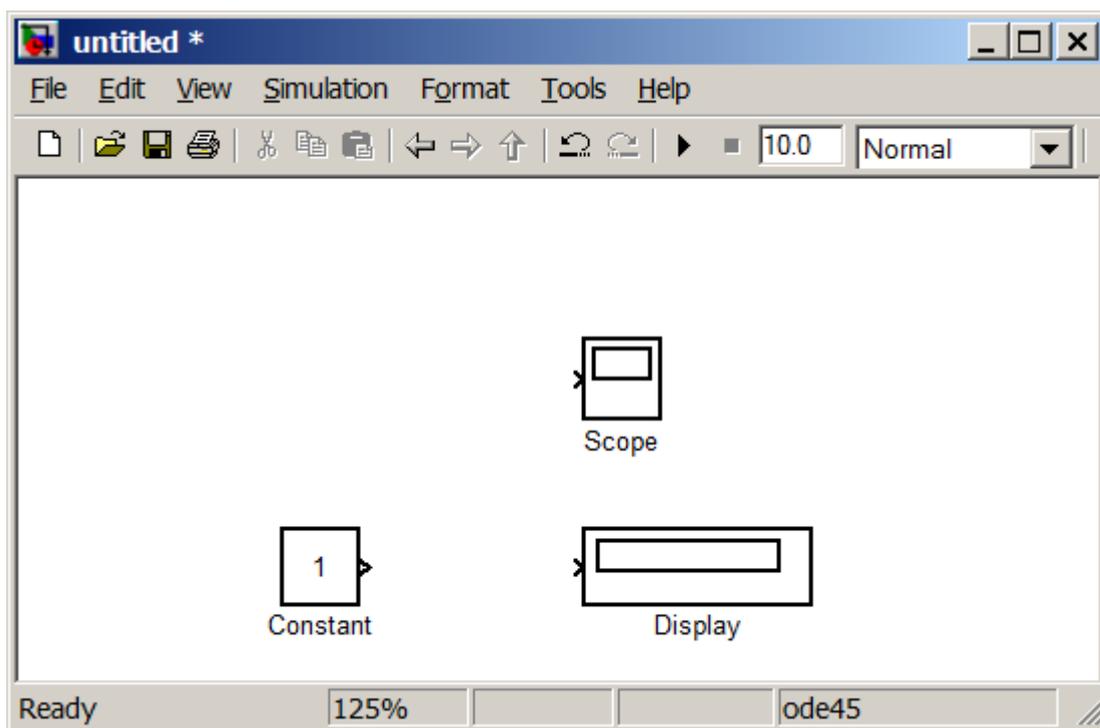


Рис. 1.3. Окно модели с блоками

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.

Ну рис. 1.4 показано окно модели с соединёнными блоками.

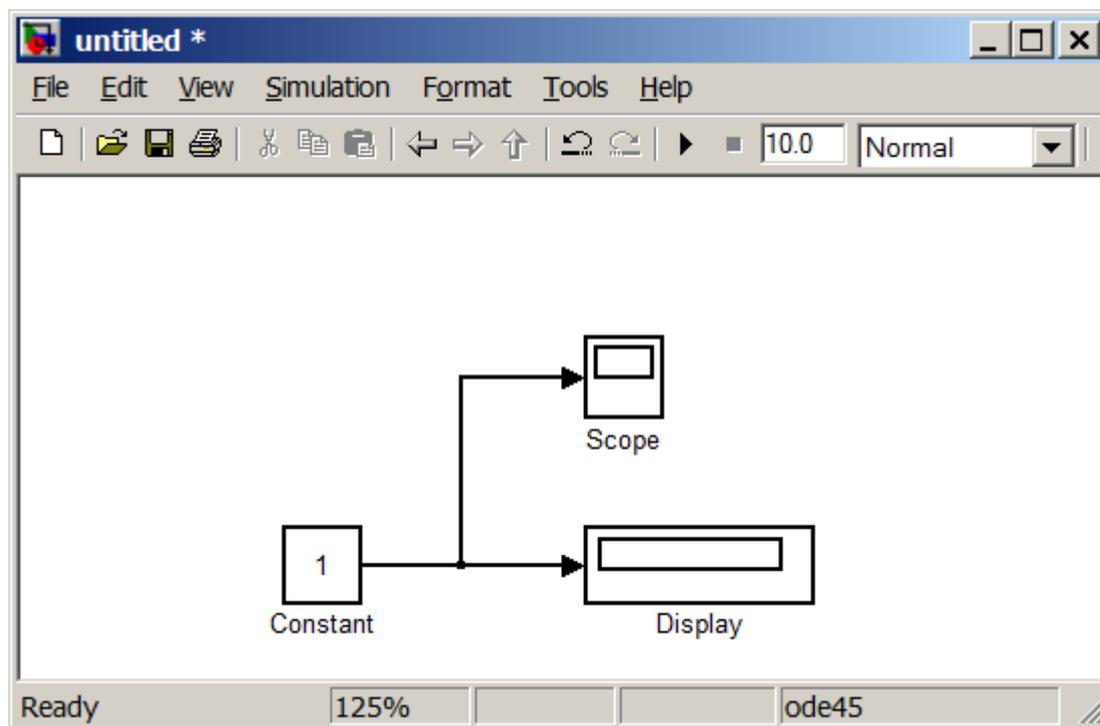


Рис.1.4. Окно модели с соединёнными блоками

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.

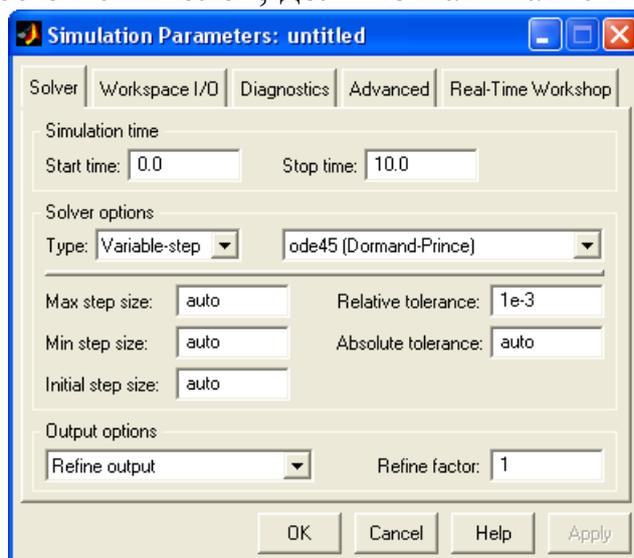


Рис. 1.5. Вид окна настройки параметров расчёта

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-Кутты 4-го и 5-го порядка;

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

ode113 – многошаговый метод Адамса-Башворта-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-Кутты 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.

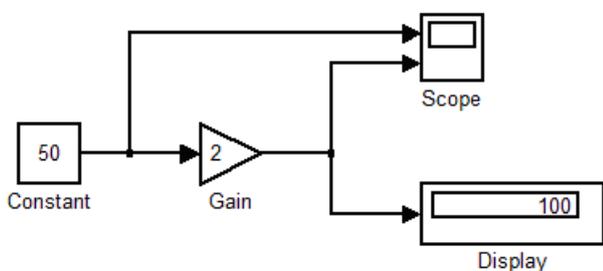


Рис. 1.6. Модель умножения числа (после проведения моделирования)

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 множитель. 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 нажать 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.

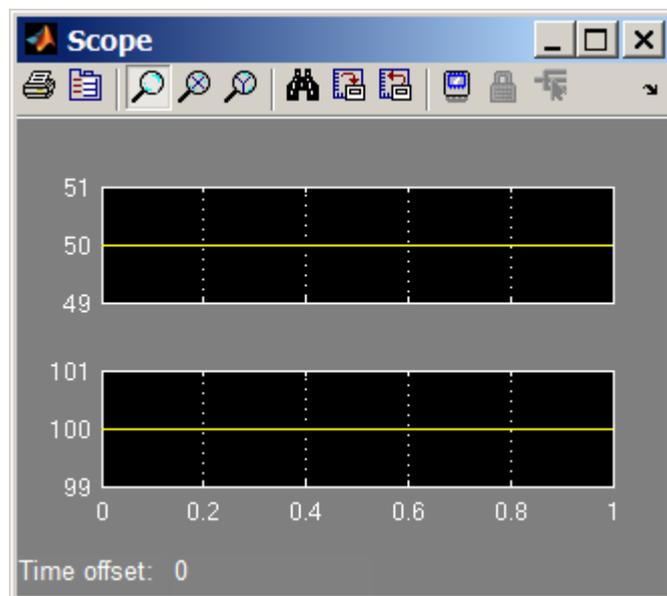


Рис. 1.7. График, построенный элементом *Scope*

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, а.

- *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*.

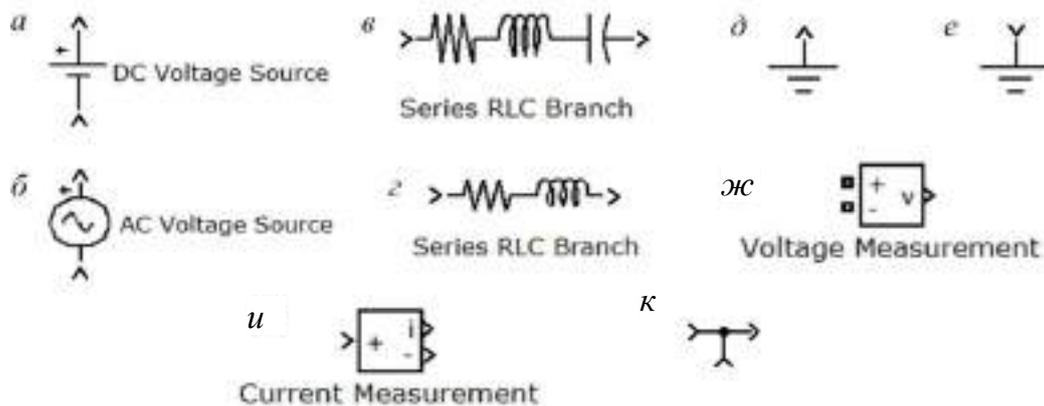


Рис. 1.8. Элементы, необходимые для создания моделей электрических цепей

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*.

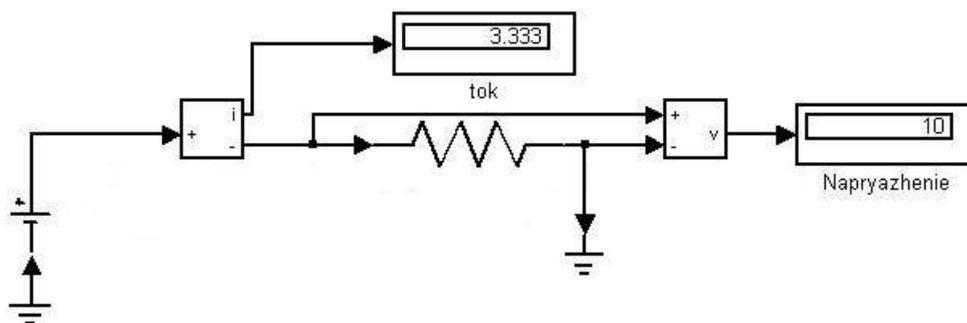


Рис. 1.9. Модель простой электрической цепи постоянного тока

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

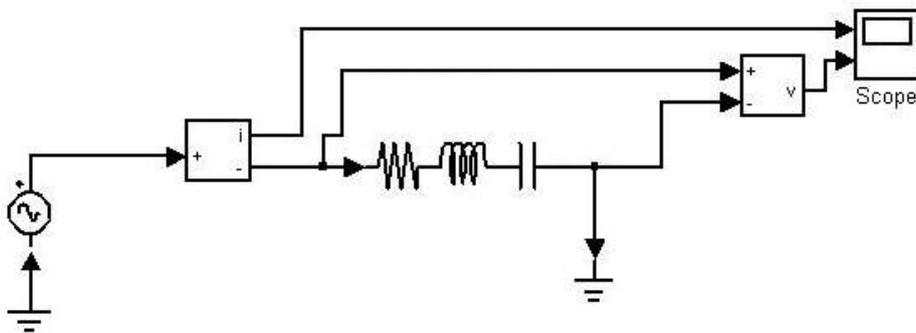
Правильность расчёта составленной модели (рис. 1.9) можно проверить с помощью закона Ома:

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

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 сопротивление. 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.

а



б

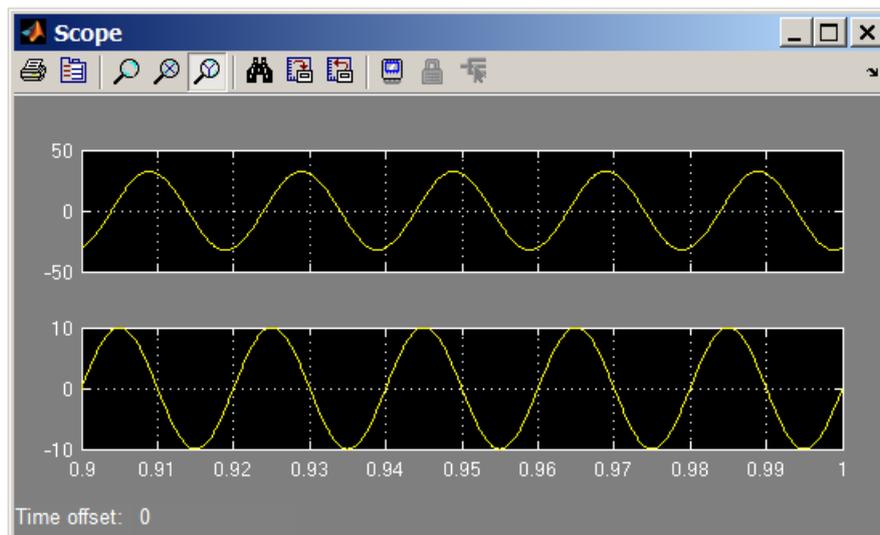


Рис. 1.10. Модель простой электрической цепи переменного тока (а) и результаты её расчёта на осциллографе (б)

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

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{Z} = \frac{10}{0,1 + \frac{1}{j314,16 \cdot 0,15} + j314,16 \cdot 0,001} = 10,437 - j30,574 = 32,3e^{-71,2} \text{ А.}$$

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.

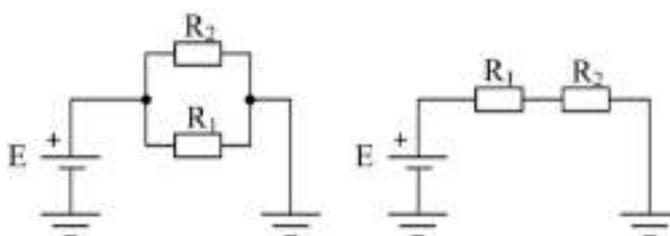


Рис. 1.11. Электрические схемы постоянного тока для индивидуальной работы

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 |

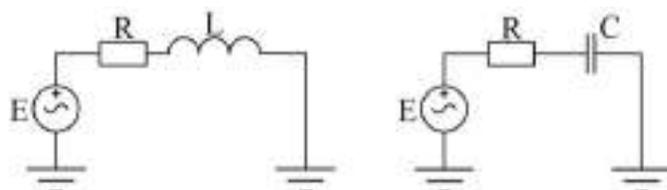


Рис. 1.12. Электрические схемы переменного тока для индивидуальной работы

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);

Лабораторная работа №2 «Библиотека SimPowerSystems. Моделирование электрической принципиальной схемы»

Назначение и особенности пакета SimPowerSystems

Пакет SimPowerSystems (в версии MATLAB 6.1 и ранее — Power System Blockset) содержит набор блоков для построения виртуальных моделей электротехнических устройств и устройств силовой электроники. Используя библиотеки Simulink и SimPowerSystems, а также применяя функции и команды MATLAB, пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и изучать их частотные свойства, оценивать динамические параметры и осуществлять гармонический анализ токов и напряжений.

Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что при моделировании сложных систем силовой электроники можно использовать функции охватывающие (отражающие функции S-блоков), виртуальные (из элементов или SPS-блоков) и структурируемые модели. Так, силовой блок полупроводникового преобразователя электрической энергии строится на основе виртуальных блоков SimPowerSystems, а система управления — с помощью функциональных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы без электрической схемы. Такой подход значительно упрощает саму модель и, как следствие, повышает скорость ее работы. Важно заметить, что библиотека SimPowerSystems имеет относительно большое количество блоков, а также дает возможность создавать новые подсистемы из блоков, имеющихся в библиотеке, и привлекать функции MATLAB. Все это значительно расширяет возможности SimPowerSystems при использовании его совместно с Simulink.

Построение SPS-моделей мало отличается от построения S-моделей. Для их создания необходимо открыть окно модели и свою библиотеку и путем перетаскивания («drag-and-drop» — «перетаски и оставь») составить модель из блоков с выполнением соединений между ними. В то же время в создании SPS-моделей имеется свой специфика.

1. Входы и выходы SPS-блоков (в SimPowerSystems версии 2.3 и более ранних) критичны к направлению тока, а соединительные линии между блока-

ми являются аналогами электрических проводов, по которым ток протекает в определенном направлении (по стрелкам).

2. При подключении к соединительным линиям можно использовать правую кнопку мыши (ПКМ), но при условии учета направления протекания тока. Если соединение из-за указанных направлений невозможно (стрелки направлены навстречу), то для выполнения соединения необходимо приложить специальные блоки — соединители, находящиеся в разделе Connectors библиотеки SPS.

3. Непосредственное соединение друг с другом блоков из библиотеки Simulink и блоков из библиотеки SimPowerSystems недопустимо. Передать сигнал от S-блока к SPS-блоку можно через управляемые источники тока или напряжения, а в обратную сторону — через измерители тока или напряжения.

4. В виртуальных моделях обязательно задаются начальные условия либо с помощью специального блока Powergui, либо с помощью функции powerinit.

5. При анализе виртуальных моделей совместно с функциональными моделями целесообразно использовать следующие решатели дифференциальных уравнений (см. урок 1):

- **ode15s** — полый многошаговый жесткий метод переменного порядка (от 1 до 5) для жестких систем;

- **ode23s** — модифицированный метод Рунге-Кутты с постоянным шагом и фиксированным порядком точности, предназначенный для интегрирования умеренно жестких систем при низких требованиях к точности, но имеющий обычно большую скорость, чем **ode15s**;

- **ode23t** — метод трапеций с разностными уравнениями для умеренно жестких систем, обладающий повышенной скоростью интегрирования;

- **ode23tb** — модифицированный метод трапеций в начале решения и метод, использующий обратное дифференцирование на последующих этапах; имеет более высокую точность при той же скорости интегрирования, чем **ode23t**.

Выбор решателя осуществляется по результатам сравнения эффективности работы указанных выше решателей в процессе моделирования после запуска конкретной модели с учетом удовлетворительной скорости решения и получаемой картины процессов (отсутствие необъяснимых выбросов или разрывов на переменных диаграммах). Как правило, устанавливаемой по умолчанию решатель `ode15` использовать для анализа SPS-моделей нежелательно по причине его неуместно медленной работы — эта рекомендация дается самим пакетом при запуске модели.

Состав библиотеки SimPowerSystems

Откроем окно MATLAB, а из него кнопкой  — окно обозревателя библиотеки Simulink Library Browser (рис. 1). Завернем в левой части окна открывшееся дерево Simulink, щелкнув левой кнопкой мыши (ЛКМ) по значку , а затем откроем дерево SimPowerSystems щелчком по значку  в третьем по строке — правую часть окна.

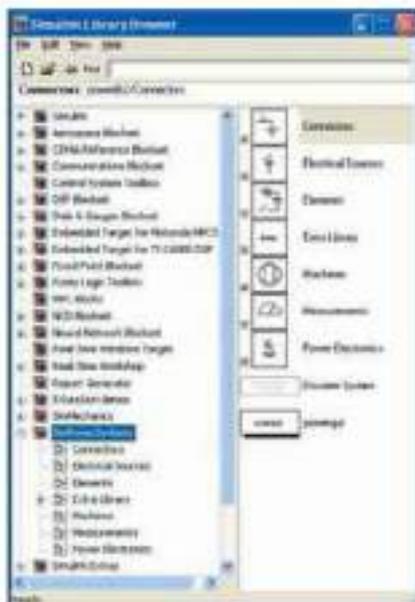


Рис. 1. Окно обозревателя библиотеки Simulink с открытым деревом SimPowerSystems

Из рис. 1 видно, что библиотека SimPowerSystems имеет следующие основные разделы:

1. Connectors — соединители.
2. Electrical Sources — источники электрической энергии.
3. Elements — электротехнические элементы.
4. Extra Library — дополнительные электротехнические устройства.
5. Machines — электрические машины.
6. Measurements — измерительные и контрольные устройства.
7. Power Electronics — устройства силовой электроники.

Кроме того, в этом окне имеются блок `Powergui` для проведения анализа свойств исследуемой модели. На основе блоков из пере-

численных разделов имеется возможность создавать виртуальные модели довольно сложных устройств силовой электроники.

Источники электрической энергии (Electrical Sources)

В этот раздел входит неуправляемые и управляемые источники электрической энергии (рис. 2).

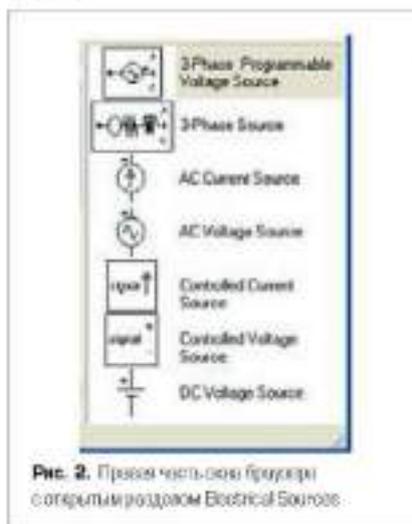
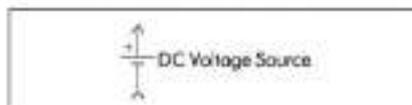


Рис. 2. Правая часть окна обозревателя с определенным разделом Electrical Sources

Идеальный источник постоянного напряжения (DC Voltage Source)



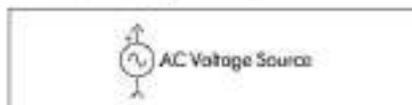
Получение постоянного по уровню напряжения.

Параметры блока (окно для настройки параметров блока вызывается двойным щелчком ЛКМ мыши по пиктограмме блока): *Amplitude (V)* — амплитуда (В). Задается уровень выходного напряжения источника. *Magnitude* — измеряемые переменные. Задаются переменные, передаваемые для измерения в блок `Multimeter` или для наблюдения с помощью блока `Scope`. Значение параметра выбирается из списка:

- *None* — переменные не отображаются;
- *Voltage* — отображается выходное напряжение источника.

Поскольку блок является идеальным источником напряжения, то его внутреннее сопротивление является нулевым.

Идеальный источник переменного напряжения (AC Voltage Source)



Получение синусоидального напряжения с постоянной амплитудой.

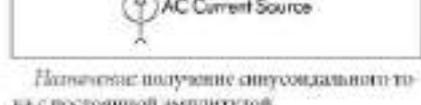
Параметры блока: *Peak Amplitude (V)* — амплитуда (В). Задается амплитуда выходного напряжения источника. *Phase (deg)* — фаза (град). Устанавливается начальная фазовый сдвиг. *Frequency (Hz)* — частота (Гц).

Задается частота переменного напряжения источника. *Sample time* — шаг дискретизации. С помощью этого параметра задается шаг дискретизации по времени выходного напряжения источника при создании дискретных моделей. *Measurements* — измеряемые переменные. Задаются переменные, передаваемые для измерения в блок `Multimeter` или для наблюдения с помощью блока `Scope`. Значение параметра выбирается из списка:

- *None* — переменные не отображаются;
- *Voltage* — отображается выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения и имеет нулевое внутреннее сопротивление.

Идеальный источник переменного тока (AC Current Source)



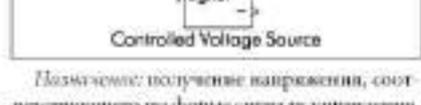
Получение синусоидального тока с постоянной амплитудой.

Параметры блока: *Peak Amplitude (A)* — амплитуда (А). Задается амплитуда выходного тока источника. *Phase (deg)* — фаза (град). Устанавливается начальная фазовый сдвиг. *Frequency (Hz)* — частота (Гц). Задается частота переменного тока источника. *Sample time* — шаг дискретизации. С помощью этого параметра задается шаг дискретизации по времени выходного тока источника при создании дискретных моделей. *Measurements* — измеряемые переменные. Задаются переменные, передаваемые для измерения в блок `Multimeter` или для наблюдения с помощью блока `Scope`. Значение параметра выбирается из списка:

- *None* — переменные не отображаются;
- *Current* — отображается выходной ток источника.

Блок является идеальным источником тока и имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление.

Управляемый источник напряжения (Controlled Voltage Source)



Получение напряжения, соответствующего по форме сигналу управления.

Параметры блока: *Initialize* — инициализация. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами — амплитудой, фазой и частотой. *Source type* — тип источника. Тип источника указывается при необходимости инициализации источника. Если инициализация источника не задается, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- *AC* — источник переменного напряжения;
- *DC* — источник постоянного напряжения. *Initial amplitude (V)* — начальная амплитуда (В). Устанавливается начальное значение выходного напряжения источника. Параметр доступен, если задана инициализация источ-

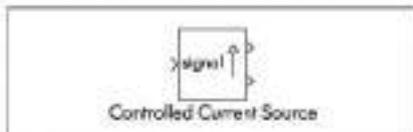
ника, *Phase (deg)* — начальная фаза (град). Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного напряжения. *Initial frequency (Hz)* — начальная частота (Гц). Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного напряжения. *Measurements* — измеряемые переменные. Задается переменные, передаваемые для измерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значение параметра выбирается из списка:

- *None* — переменные не отображаются;
- *Voltage* — отображается выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения и имеет нулевое внутреннее сопротивление.

Управляемый источник тока (Controlled Current Source)

Назначение: источник напряжения, соответствующего по форме сигналу управления.



Параметры блока: *Initialize* — инициализация. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами — амплитудой, фазой и частотой. *Source type* — тип источника. Тип источника указывается после инициализации источника. Если инициализация источника не задается, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- *AC* — источник переменного тока;
- *DC* — источник постоянного тока.

Initial amplitude (A) — начальная амплитуда (А). Устанавливается начальное значение выходного тока источника. Параметр доступен, если задана инициализация источника. *Phase (deg)* — начальная фаза (град). Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного тока. *Initial frequency (Hz)* — начальная частота (Гц). Параметр доступен, если источник инициализируется как источник переменного тока. *Measurements* — измеряемые переменные. Задается переменные, передаваемые для измерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значения параметра выбираются из списка:

- *None* — переменные не отображаются;
- *Current* — отображается выходной ток источника.

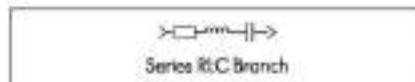
Блок является идеальным источником тока и имеет бесконечное внутреннее сопротивление.

Трехфазный источник напряжения **3-Phase Source** и трехфазный программируемый источник напряжения **3-Phase Programmable Voltage Source** предназначены для получения соответственно трехфазного напряжения и трехфазного напряжения с программируемыми во времени изменениями амплитуды, фазы, частоты и гармонического состава. Параметры указанных двух источников не приводятся, а будут рассмотрены по мере необходимости.

Электротехнические элементы (Elements)

Папки рамки всех элементов этого раздела библиотеки представлены в окне **Library: powerlib2/Elements** (рис. 3, выделена стрелкой ПКМ по строке **Elements** дерева **SimPowerSystems**) или в правой части окна обозревателя **Simulink Library Browser** (эта конфигурация раздела не приводится, так как все элементы разместить в окне одновременно не удается из-за ограниченности площади окна). В разделе содержатся основные электротехнические элементы: магнитосвязанные цепи, трансформаторы и т. п.

Последовательная RLC-цепь (Series RLC Branch)



Назначение: модель цепи из резистора, индуктивности и конденсатора, соединенных последовательно.

Параметры блока: (окно настройки параметров блока выделено двойным щелчком ЛКМ по пиктограмме блока): *Resistance R (Ohms)* — сопротивление (Ом). Величина активного сопротивления. Для того чтобы исключить резистор из цепи, значение сопротивления в окне параметров блока нужно задать равным нулю. При этом на пиктограмме блока резистор отображаться не будет. *Inductance L (H)* — индуктивность (Гн). Величина индуктивности. Для исключения индуктивности из цепи ее значение следует задать в окне параметров блока равным нулю. При этом на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет. *Capacitance C (F)* — емкость (Ф). Величина емкости. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости следует задать равным *inf* (бесконечность). При этом конденсатор на пиктограмме блока отображаться не будет. *Measurements* — измеряемые переменные.

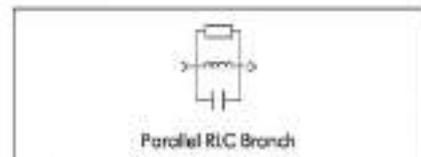
Задается переменные, передаваемые для измерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значение параметра выбирается из списка:

- *None* — нет переменных для отображения;
- *Branch voltage* — напряжение на элементах цепи;
- *Branch current* — ток цепи;
- *Branch voltage and current* — напряжение и ток цепи.

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

- *I* — ток цепи;
- *U* — напряжение цепи.

Параллельная RLC-цепь (Parallel RLC Branch)



Назначение: модель цепи из резистора, индуктивности и конденсатора, соединенных параллельно.

Параметры блока: *Resistance R (Ohms)* — сопротивление (Ом). Величина активного сопротивления. Для исключения резистора из цепи значение сопротивления в окне параметров блока нужно задать равным *inf* (бесконечность). При этом на пиктограмме блока резистор отображаться не будет. *Inductance L (H)* — индуктивность (Гн). Величина индуктивности. Для исключения индуктивности из цепи ее значение следует задать в окне параметров блока *inf* (бесконечность). При этом на пиктограмме блока индуктивность отображаться не будет. *Capacitance C (F)* — емкость (Ф). Величина емкости. Для исключения конденсатора из цепи значение емкости следует задать равным нулю. При этом конденсатор на пиктограмме блока отображаться не будет. *Measurements* — измеряемые переменные. Задается переменные, передаваемые для из-

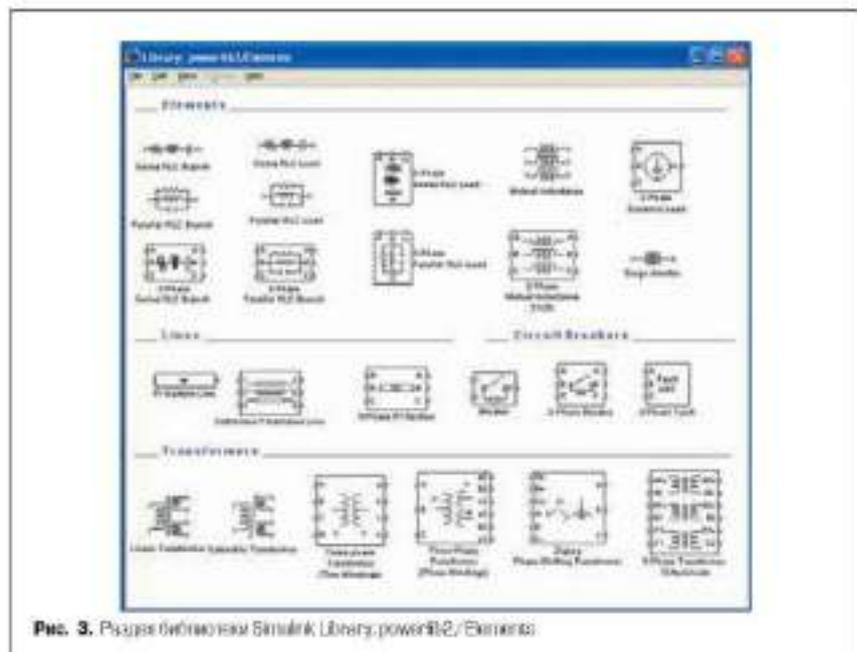


Рис. 3. Папка библиотеки Simulink Library: powerlib2/Elements

мерения в блок **Multimeter** или для наблюдения с помощью блока **Scope**. Значение параметра выбирается из списка:

- **Name** — нет переменных для отображения;
- **Branch voltage** — напряжение на заданных цепях;
- **Branch current** — ток цепи;
- **Branch voltage and current** — напряжение и ток цепи.

Образованная ссылка в блоке **Multimeter** присваивается обозначению:

- **I_b** — ток цепи;
- **U_b** — напряжение цепи.

Такие блоки, как последовательный RLC-цепь **Series RLC Load** и параллельный RLC-цепь **Parallel RLC Load**, являются расширением выше описанных блоков, а их описание дается в условиях параметров. Параметры этих цепей задаются через мощность элементов при номинальном напряжении и частоте. Остальные блоки будут рассмотрены ниже по мере необходимости.

Измерительные и контрольные устройства (Measurements)

Пиктограммы блоков для выполнения измерительных и контрольных функций расположены в разделе **Measurements** (рис. 4), открываемом ДКМ путем активизации одноименной строки в дереве **SimPowerSystems**.

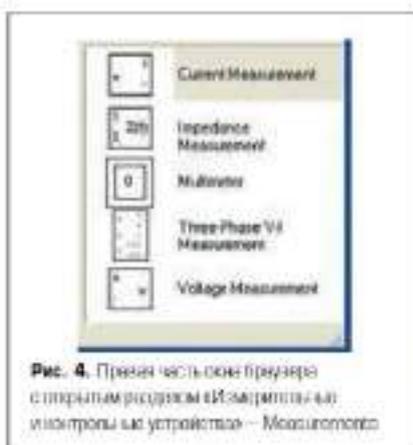
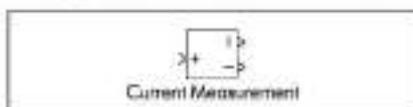


Рис. 4. Правая часть окна браузера с пиктограммами (Измерения) и контрольные устройства — Measurements

Измерение тока (Current Measurement)



Назначение: измеряет мгновенное значение тока, протекающего через соединительную линию (провод). Выходным сигналом блока является сигнал, который может использоваться любым Simulink-блоком.

Параметры блока: *Output signal* — выходной сигнал. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен только тогда, когда с помощью блока **Powergui** установлен режим расчета на переменном токе (**Phasor simulation**). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- **Magnitude** — амплитуда (скалярный сигнал);
- **Complex** — комплексный сигнал;
- **Real-Imag** — вектор, состоящий из двух элементов — действительной и мнимой составляющих сигнала;

● **Magnitude-Angle** — вектор, состоящий из двух элементов — амплитуды и аргумента сигнала.

Измеритель напряжения (Voltage Measurement)

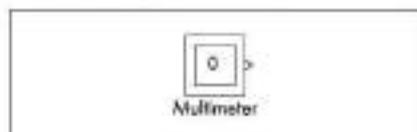


Назначение: измеряет мгновенное значение напряжения между двумя узлами цепи. На выходе блока имеется сигнал, который может использоваться любым блоком из Simulink.

Параметры блока: *Output signal* — выходной сигнал. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен только тогда, когда с помощью блока **Powergui** установлен режим расчета на переменном токе (**Phasor simulation**). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- **Magnitude** — амплитуда (скалярный сигнал);
- **Complex** — комплексный сигнал;
- **Real-Imag** — вектор, состоящий из двух элементов — действительной и мнимой составляющих сигнала;
- **Magnitude-Angle** — вектор, состоящий из двух элементов — амплитуды и аргумента сигнала.

Мультиметр (Multimeter)



Назначение: измеряет токи и напряжения блоков библиотеки **SimPowerSystem**, для которых в их окне настроек параметров устанавливается параметр **Measurements** — «измеряемые переменные» (рис. 5).

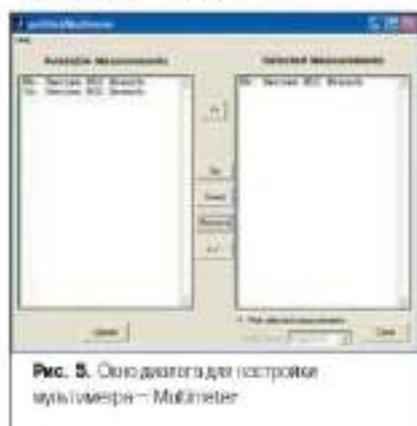


Рис. 5. Окно диалогов для устройств мультиметра — Multimeter

Параметры блока: *Available Measurements* — переменные (в левом окне), доступные для измерения. Это токи и напряжения блоков схемы, для которых в окне настроек параметров блока установлен параметр **Measurements** (измеряемые переменные). Обозначение списка переменных можно выпустить с помощью клавиши **Update**, но предварительно надо внести изменения в окне настроек параметров блока. *Selected Measurements* — измеряемые переменные (в правом окне). Указываются переменные, которые будут передаваться на вы-

ход блока **Multimeter**. Для управления списком измеряемых переменных можно использовать следующие клавиши (между скобками):

- **>>** — добавить выделенную переменную в правый список;
- **Up** — передвинуть вверх выделенную переменную в правом списке;
- **Down** — передвинуть вниз выделенную переменную в правом списке;
- **Remove** — удалить выделенную переменную из правого списка;
- **+/-** — изменить знак выделенной переменной.

Output signal — выходной сигнал. Вид выходного сигнала блока. Выбор значения параметра возможен при условии, что с помощью блока **Powergui** установлен режим расчета на переменном токе (**Phasor simulation**). В этом случае значение параметра выбирается из списка:

- **Magnitude** — амплитуда (скалярный сигнал);
- **Complex** — комплексный сигнал;
- **Real-Imag** — вектор, состоящий из двух элементов — действительной и мнимой составляющих сигнала;
- **Magnitude-Angle** — вектор, состоящий из двух элементов — амплитуды и аргумента сигнала.

Блок может использоваться для измерения напряжений и токов вместо обычных измерителей — **Current Measurement** и **Voltage Measurement**. Выходным сигналом блока является вектор всех сигналов, соответствующих измеряемым переменным. Другие измерители, пиктограммы которых располагаются в этом разделе, будут рассмотрены ниже по мере необходимости.

Пиктограммы блоков остальных трех разделов библиотеки **SimPowerSystems** приведены на рис. 6 (раздел «Устройства силовой электроники» — **Power Electronics**), рис. 7 (раздел «Электрические машины» — **Machines**) и рис. 8 (раздел «Соединители» — **Connectors**).

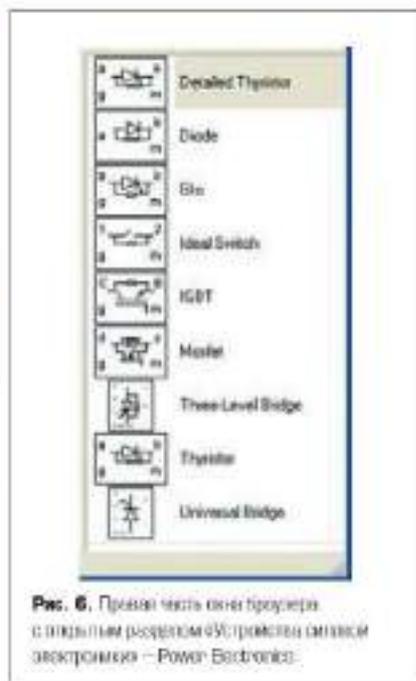


Рис. 6. Правая часть окна браузера с пиктограммами (Устройства силовой электроники) — Power Electronics

Построение SPS-моделей

Предemonстрируем порядок действий при построении SPS-модели. Вызывается два окна: окно обозревателя библиотеки **Simulink Library Browser** (рис. 1) и через **File/New/Model** — окно модели. Расположим окна рядом на рабочем столе.

Пример 1. Выполнить модель реального двигателя постоянного напряжения и измерить его входное и выходные напряжения.

Исходные данные для модели: питающее постоянное напряжение 10 В; коэффициент усиления Σ ; входное сопротивление двигателя 20 Ом.

В левой части окна обозревателя открываем дерево **Simulink**, открываем дерево **SimPowerSystems** и активируем строку дерева **Electrical Sources** (источники электрической энергии). В правой части окна обозревателя открывается этот раздел **Electrical Sources** (рис. 2). С помощью ЛКМ перетаскиваем пиктограмму источника постоянного напряжения **DC Voltage Source** в окно модели (рис. 9а). Действуя аналогично, в окно модели поме-

щаем перетаскиваем две пиктограммы последовательной RLC-цепи **Series RLC Branch** (раздел **Elements**), две пиктограммы измерителя напряжения **Voltage Measurement** (раздел **Measurements**) и две пиктограммы **Display** из раздела **Sinks** (приведем и измеритель сигнала), но уже из библиотеки **Simulink**. Заметим, что у двух одинаковых пиктограмм названия отличаются наличием номера 1 (рис. 9а).

Для удобства соединения повернем на плоскости пиктограмму блока **Series RLC Branch 1** на угол 90° . Для этого ПКМ активируем указатель пиктограмму, по тапикающему месту поочередно выполним действия **Format/Rotate Block** и в результате осуществим ее поворот на указанный угол по часовой стрелке (опция **Flip-Block** обеспечивает разворот пиктограммы на 180°). После поворота пиктограмма оказывается «сплюснутой», так как ее горизонтальный размер преобразуется в вертикальный. Нужные размеры пиктограммы настраиваются после ее активации растягиванием за нижний правый угол ЛКМ после превращения указателя в двунаправленную стрелку.

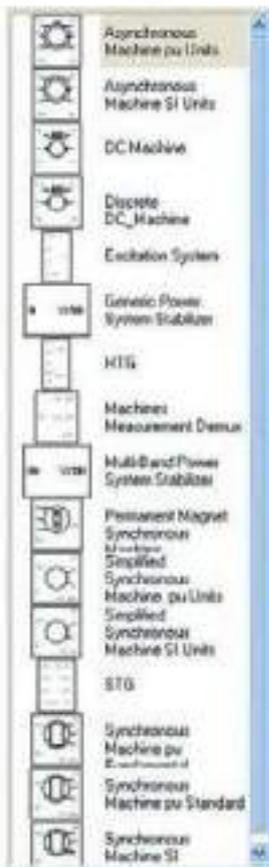
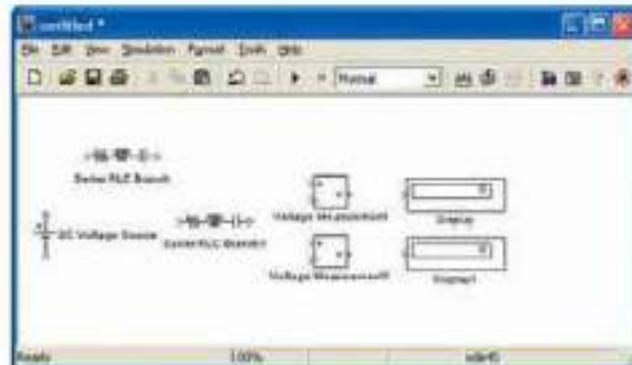


Рис. 7. Правая часть окна браузера с открытым разделом «Электрические машины — Machines»

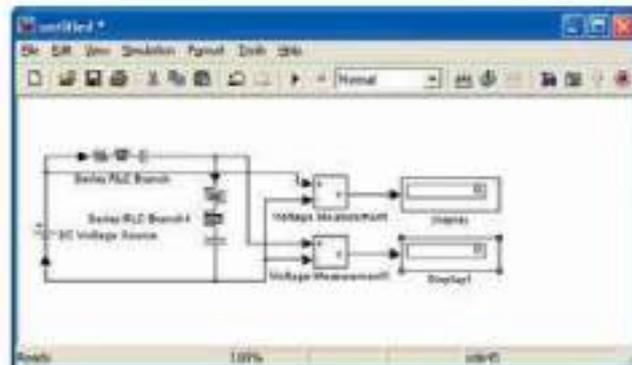


Рис. 8. Правая часть окна браузера с открытым разделом «Соединители — Connectors»

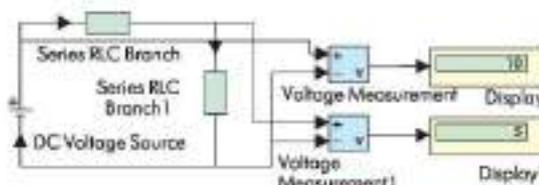
Теперь приведем несколько относительно простых примеров построения моделей из блоков библиотеки **SimPowerSystems**.



а)



б)



в)

Рис. 9. Подготовка блоков (а), их соединение друг с другом (б) и SPS-модель после настройки и запуска (в)

Теперь поочередно производятся соединения. Для этого к выходу амперограммы добавляется указатель, который превращается в крест. Нажимаем ЛКМ, а получаемую линию протягиваем до входа подключаемой амперограммы. После отпущения ЛКМ на конце соединительной линии (на входе соседней амперограммы) образуется стрелка (рис. 9б). Напомним, что отключением от соединительного провода выполняется с помощью ПКМ. Измеритель напряжения **Voltage Measurement** подключается параллельно участку, на котором производится измерение.

Следующий этап — настройка блоков. Начнем с блока **Series RLC Branch**. Щелчком дважды по амперограмме этого блока — и появится окно для настройки его параметров (рис. 10а). Устанавливаем значения сопротивления резистора 10 Ом, индуктивности — 0 Гн и емкости конденсатора — inf (бесконечность), а в текстовом окне оставляем строку None, так как прибор **Multimeter** не используется. Закрываем окно кнопкой **Ok**, и на амперограмме исчезает изображение индуктивности и емкости (рис. 9в). Аналогично настраиваем блок **Series RLC Branch 1**, установив такие же значения всех параметров.

Настройка блока **DC Voltage Source** выполняется в установке в вызванном окне настройки параметров значения напряжения (в нашем примере равного 10 В, рис. 10б). При измерении постоянного напряжения блок **Voltage Measurement** не требует настройки, а в блоке **Display** при необходимости увеличим число значащих цифр в получаемом результате следует вызвать окно настройки параметров и заменить в его выпадающем меню **Format** короткий формат **Short** на длинный формат **Long**. Оставим формат **Short**. После запуска модели, которая достаточно проста и по этой причине нет смысла заменять `reset` на `0d45`

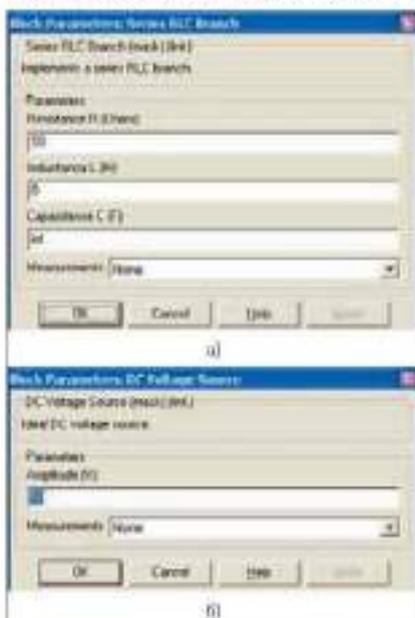


Рис. 10. Окно настройки параметров последовательной RLC-цепи **Series RLC Branch** (а) и источника постоянного напряжения **DC Voltage Source** (б)

на более быстрый, получаем результат — напряжение на входе делителя 10 В и на выходе — 5 В (рис. 9в).

Пример 2. Производим моделирование передаточного процесса в интегрирующей RL-цепи с измерением ее тока и напряжения на выходе (на резисторе).

Исходные данные для модели: питающее постоянное напряжение 50 В; для RL-цепи сопротивление резистора 4 Ом, индуктивность катушки 0,5 Гн.

В соответствии с порядком, изложенным выше, соберем схему (рис. 11а), в которой напряжение питания 50 В (источник **DC Voltage Source**), сопротивление резистора 4 Ом, индуктивность 0,5 Гн в блоках **Series RLC Branch** устанавливаются в соответствующих окнах параметров. Отметим две особенности построенной модели. Первая состоит в применении измерителя тока **Current Measurement**, который включается последовательно с нагрузкой так, чтобы измеряемый ток входил в «+» и выходил из «-». К сигнальному выходу `i` этого блока подключен вход осциллографа **Scope**. Вторая особенность заключается в том, что выходное напряжение снимается с резистора RL-цепи. Но подключиться в средней точке последовательной цепи (точка внутри блока) не представляется возможным. По этой причине приходится использовать два блока **Series RLC Branch**, в первом из которых оставлен только резистор, а во втором — индуктивность.

Постоянная времени RL-цепи $\tau = L/R = 0,125$ с, и поэтому время моделирования должно составлять более 0,675 с (свыше 5 τ). Выбирается это время (см. урок 1) в окне модели через меню **Simulation/Simulation Parameters**. Открывается окно **Simulation Parameters** и в нем задается время **Stop time** равным 1 с.

Сохраним модель в окне модели через меню **File/Saveas...** под названием **DC_Regim_Perechod1**, которое автоматически присваивается окну модели (рис. 11а). Для установки начальных условий используем функцию `powerinit`. У этой функции возможные варианты записи аргумента находятся в справке (команда `help powerinit`). Для задания нулевых начальных условий в командном окне наберем команду `powerinit('DC_Regim_Perechod1','reset')`, в которой в качестве аргумента заносится название модели в кавычках: `'DC_Regim_Perechod1'` и команда обозначения начальных условий `'reset'` также в апострофах. Команда выполняется при нажатии на клавиатуре клавиши **Enter**, и начальные условия становятся нулевыми. После запуска процесса моделирования и после двойного щелчка ПКМ по амперограмме **Scope** получим две осциллограммы (рис. 11б и 11в). Первая соответствует классическому нарастающему току цепи, а вторая — напряжению на резисторе. Уместно напомнить, что она осциллограмм следует настроить выбором соответствующего масштаба по вертикальной оси (см. урок 1). Для этого щелчком ПКМ в поле осциллограммы, выберем в контекстном меню команду **Axis properties...** (свойства осей), а затем в появившемся окне **'Scope' properties: axis 1** (свойства графика) установить максимальное и минимальное значения по оси координат Y.

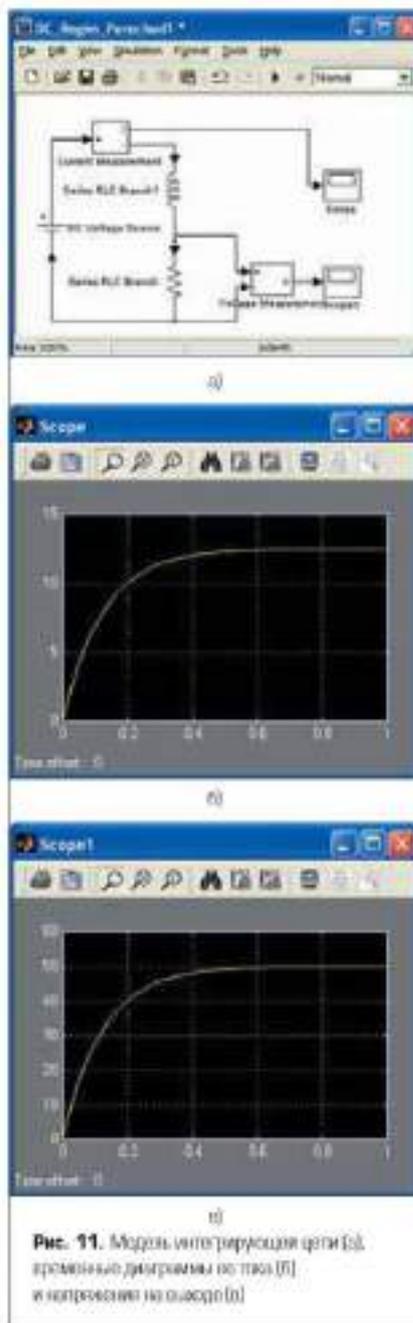


Рис. 11. Модель интегрирующей цепи (а), правильно диммированная по току (б) и напряжению на выходе (в)

Предположим, при наборе команды `powerinit` в командном окне MATLAB произведена ошибка в виде замены буквы `n` на `m`, то есть `powerimnt`. Команда не будет выполнена и в командном окне появится запись:

```
?? Undefined function or variable 'powerimnt'
(известная функция или переменная 'powerimnt').
```

Если функция набрана правильно, но не заданы аргументы, то запись будет другой:

```
?? Error using => powerinit
Not enough input arguments.
```

(Ошибка пользователя, недостаточное количество аргументов.)

О наличии ошибок в схеме модели в командном окне также появляется сообщение. Например, в рассматриваемой схеме отсутствует

вует соединение выхода измерителя тока **Current Measurement** с входом осциллографа **Scope**. В этом случае появится два сообщения:

Warning: Output port 1 of block 'DC_Breaker_FreelockScope' is not connected.
Warning: Input port 1 of block 'DC_Breaker_FreelockScope' is not connected.

(Предупреждение: Выходный порт 1 блока '...' не подключен).

Таким образом, MATLAB выполняет проверку правильности набора команд и сообщает пользователю об имеющихся ошибках с обязательным визуальным строком с трех знаков вопроса. Аналогично проверяется правильность собранных схем, а в окне дается сообщение. Любые оставшиеся при наличии ошибок комментируются. По этой причине следует при всяких неожиданных остановках смотреть сообщения в командном окне.

Пример 3. Произвести моделирование прерывистого режима работы RL-цепи при питании переменным напряжением.

Исходные данные для модели: постоянное напряжение переменного тока с амплитудой 100 В и частотой 50 Гц; прерывистый режим с периодом 0,15 с при относительной длительности импульсов 70% и фазовом сдвиге 0,02 с (указанные данные приведены в виду, удобному для настройки генератора); параметры RL-цепи — сопротивление 0,5 Ом и индуктивность 0,01 Гн. В модели в качестве прерывателя используется блок **Breaker** (раздел элементов **Elements** библиотеки **SimPowerSystem**).

Составленная модель (рис. 12а) содержит источник переменного напряжения **AC Voltage Source** (блок настройки параметров на рис. 12б), генератор прямоугольных импульсов **Pulse Generator** (блок настройки параметров на рис. 12в), блок **Breaker** (блок настройки параметров на рис. 12г). Также в нее входит уже знакомые нам измеритель тока **Current Measurement**, два осциллографа **Scope** и блок **Series RLC Branch**, настройку параметров которых мы уже рассматривали выше. Напомним, что индустриальный **Pulse Generator** находится в разделе **Sources** библиотеки **Simulink**.

Основная трудность при подготовке модели состоит в ее настройке, а именно: выбор решателя, определение шага дискретизации и модельного времени **Stop time**. Хотя эти настройки уже выполнялись, сделаем все операции еще раз. В окне модели через меню **Simulation/Simulation Parameters** открываем окно **Simulation Parameters**. Как и рекомендовалось выше, выберем решатель **ode15s**. Считаем, что для наблюдения достаточно двух периодов низкочастотной составляющей сигнала во 0,15 с, то есть **Stop time** равно 0,3 с. Высокочастотная составляющая сигнала имеет период 0,02 с, и для него следует задать хотя бы 10 отсчетов, выбрав шаг дискретизации **Max step size** равным 0,002 с. После запуска модели получим вращающиеся диаграммы процессор изменения тока в RL-цепи и сигнала на выходе генератора **Pulse Generator** (рис. 12д и 12е).

Теперь приведем кратко информацию о блоке выключателя переменного тока **Breaker**, моделирующем устройство выключе-

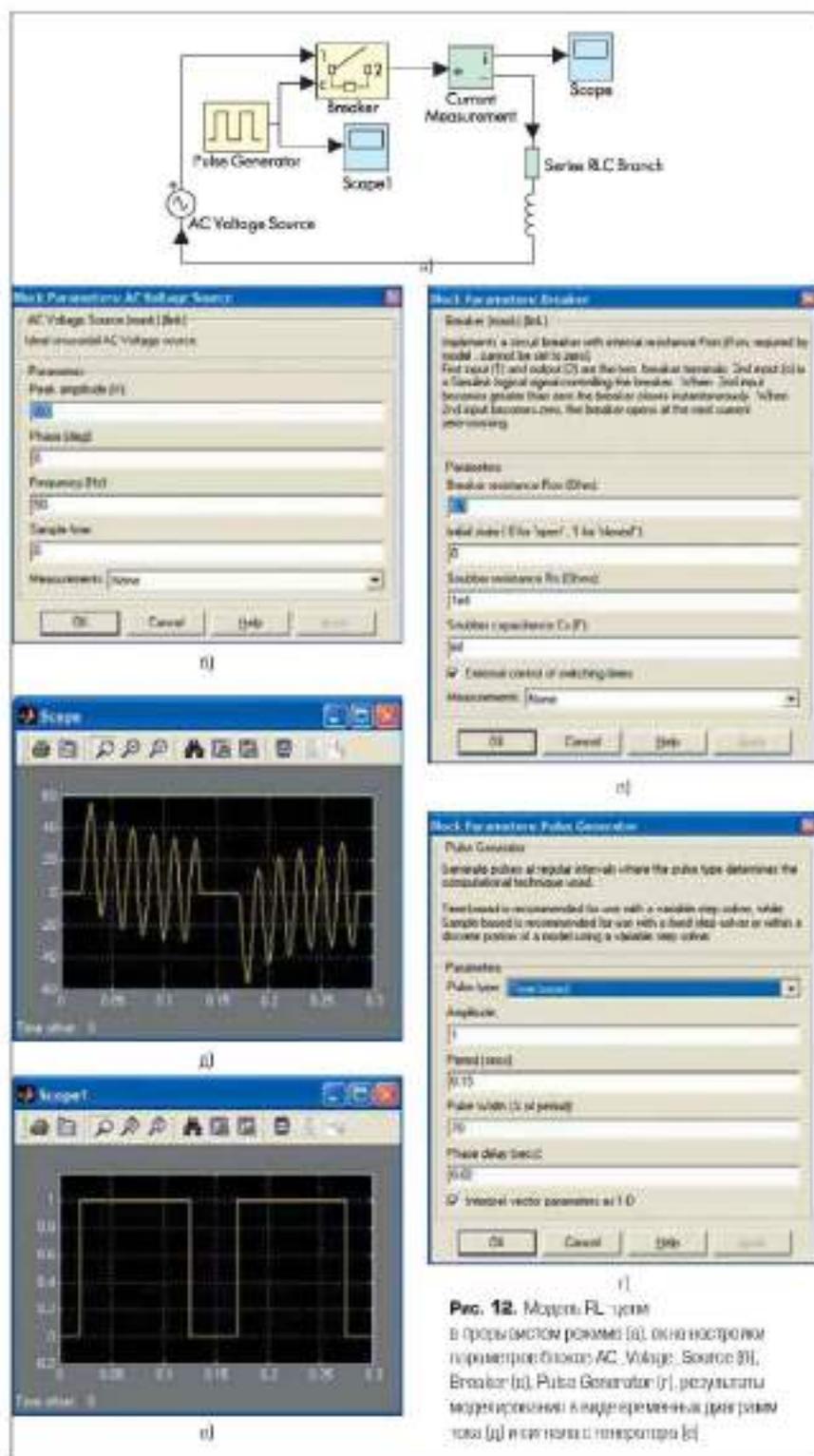


Рис. 12. Модель RL-цепи в прерывистом режиме (а); окно настройки параметров блока **AC Voltage Source** (б), **Breaker** (в), **Pulse Generator** (г); результаты моделирования в виде диаграммы (д) и осциллографа (е)

ния выключения переменного тока. Управляется он внешним входным единичным сигналом или от встроенного таймера. Команда на выключение соответствует спаду сигнала на нулевой уровень, но при этом выключение устройства осуществляется только при уменьшении тока в силовой цепи до нуля (рис. 12д). Устройство снабжено искрогасящей RC-цепью, подключаемой параллельно контактам выключателя и называемой **Snubber**.

Откроем окно настройки параметров.

Параметры блока (рис. 12в): **Breaker resistance Rbc (Ohm)** — сопротивление выключателя в замкнутом состоянии (Ом). **Initial state (0 for 'open', 1 for 'closed')** — начальное состояние выключателя (0 — разомкнут, 1 — замкнут). **Snubber resistance Rs (Ohm)** — сопротивление искрогасящей цепи (Ом). **Snubber capacitance Cs (F)** — емкость искрогасящей цепи (Ф). **Switching time (s)** — время срабатывания выключателя (с). Параметр задается в виде вектора, каждая составляющая которого опреде-

дает моменты времени срабатывания выключателя. Например, при разомкнутом начальном состоянии ключа значение параметра заданное вектором [0,005 0,01 0,02 0,03], означает, что замыкание ключа будет выполняться в моменты времени 0,005 с и 0,02 с, а размыкание — в моменты времени 0,01 с и 0,03 с. *Sample time of the internal timer T₀* — шаг дискретизации встроенного таймера. *External control of switching times* — внешнее управление временем срабатывания. При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключа, а нулевой уровень является командой на размыкание ключа, при этом разрыв цепи восстанавливается при достижении током нулевого уровня. *Measurements* — измерения переменных. Значения параметров выбираются из списка:

- *None* — нет переменных для отображения;
- *Branch voltage* — напряжение на заданных элементах;
- *Branch current* — ток элемента;
- *Branch voltage and current* — напряжение и ток элемента.

В соответствии с приведенными рекомендациями выполнена настройка параметров блока *Breaker* (см. рис. 12в). Особенность выбора параметров элементов включившей цепи состоит в том, чтобы исключить появление колебаний тока в RL-цепи на интервале, когда ключ разомкнут.

Пример 4. Произвести моделирование интегратора на RC-цепи при воздействии импульсного напряжения прямоугольной формы, имеющего постоянную составляющую.

Исходные данные для модели: импульсное напряжение на входе с амплитудой 50 В и частотой 60 Гц; постоянная составляющая 15 В; параметры интегратора — емкость 0,01 Ф, сопротивление параллельного резистора 25 Ом, сопротивление последовательного резистора 1 Ом.

В модели используются генераторы прямоугольных импульсов *Signal Generator* и постоянного напряжения *Constant* (раздел *Sources*) и сумматор *Sum* (раздел *Math Operations*) библиотеки *Simulink*, управляемый источник напряжения *Controlled Voltage Source* (раздел *Electrical Sources*), два блока *Parallel RLC Branch* (раздел *Elements*), измеритель напряжения *Voltage Measurement* (раздел *Measurements*) библиотеки *SimPowerSystems*, известный читателю измерительный блок *Scope* и новый — мультиплексор *Mux* (раздел *Signal Routing*) библиотеки *Simulink*. Соединение указанных блоков выполнено в соответствии со схемой на рис. 13а, но имеется одна особенность — подключение блока *Parallel RLC Branch* к источнику *Controlled Voltage Source*. Поскольку оказалось, что надо соединить в одну точку два провода со стрелками навстречу друг другу, что недопустимо, то пришлось использовать соединитель типа *L connector* (раздел *Connectors*).

Настройка параметров во всех диалоговых окнах осуществлена в соответствии со схемами, приведенными на рис. 13. Установка параметров бло-

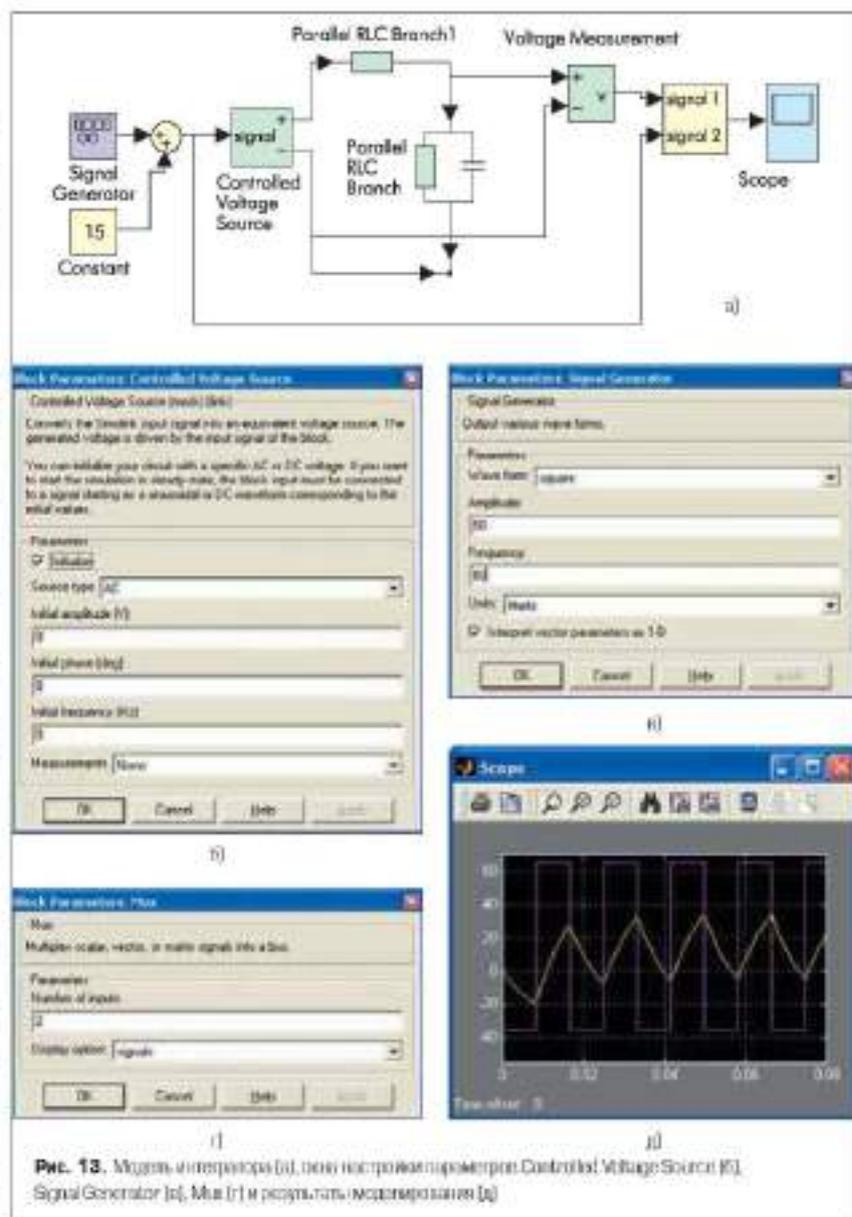


Рис. 13. Модель интегратора (а), окна настройки параметров *Controlled Voltage Source* (б), *Signal Generator* (с), *Mux* (д) и результат моделирования (е)

ка *Controlled Voltage Source* не вызывает трудностей (рис. 13б). У генератора *Signal Generator* выставляется форма сигнала прямоугольная (square), амплитуда 50 В, частота 60 Гц (рис. 13с). У мультиплексора *Mux* выставляется число входов *Number of inputs* — 2 и способ отображения *Display option* — *signals*, тогда получим пиктограмму в виде прямоугольника с белым фоном и отображением меток входных сигналов, которую надо растянуть до приемлемых размеров (рис. 13г). У блока *Sum* основные настройки — число входов со знаками 1+1.

Длительность процесса моделирования *Stop times* выбирается 0,08 с, и максимальный шаг дискретизации *Max step size* — 0,001 с. Результат моделирования после запуска модели представлен на рис. 13д. За счет мультиплексора входные сигналы объединяются в вектор, что позволяет вывести на экран осциллографа сразу два сигнала, наложенных друг на друга. Видно, что переходный процесс, обусловленный наличием постоянной составляющей, заканчивается на это-

ром периоде прямоугольных импульсов, а выходные треугольные импульсы имеют нелинейный характер нарастания и спада напряжения.

Для демонстрации использования различных типов соединителей из раздела *Connectors* построены две модели (рис. 14), аналогичные модели, приведенной на рис. 13а. Соединитель первого типа *T connector* (на рис. 14а он выделен в результате активации четырьмя маркерами), предназначен для соединения двух входящих и одного выходящего проводов и отличается от использованного выше соединителя *L connector*, осуществляющего соединение двух входящих проводов. Второй вариант соединителя реализован на блоках нейтраль *Neutral* (рис. 14б). Блок позволяет соединять несколько электрических узлов без видимых линий связи (проводов) при условии, что их номера, устанавливаемое в окне настройки параметров, одинаковы. Работа же всех трех указанных моделей протестирует аналогично.

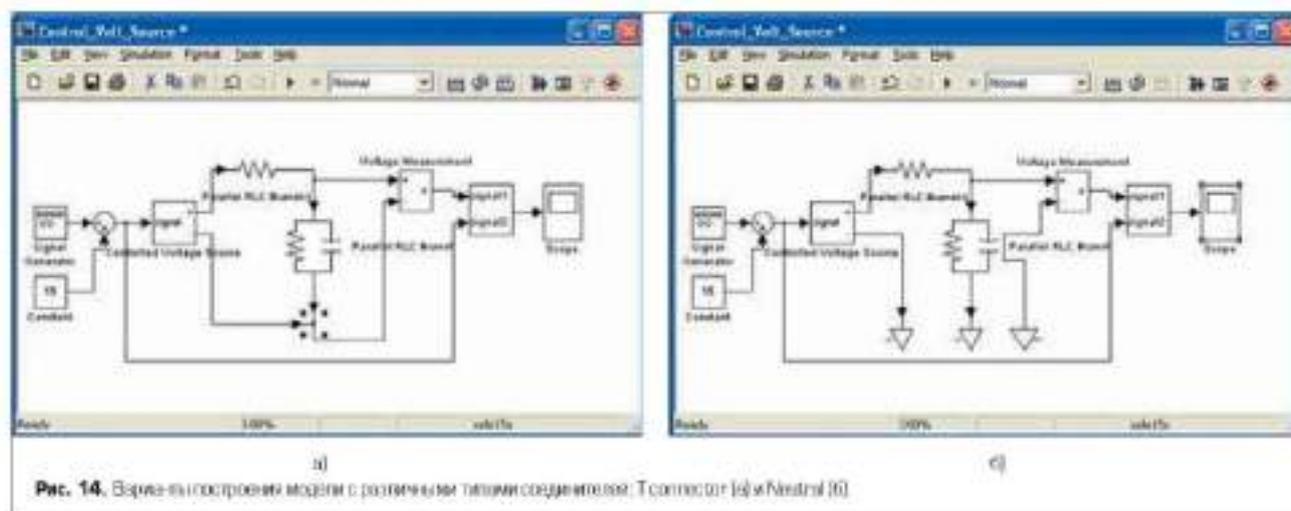


Рис. 14. Взаимно эквивалентные модели с различными типами соединителей: T-connection (a) и Neutral (b)

Подведем итоги урока 2:

1. Пакет *SimPowerSystems* обладает библиотекой, состоящей из 7 разделов, включающих:
 - источники электрической энергии в виде генераторов тока и напряжения;
 - пассивные и активные (управляемые) элементы;
 - средства измерения и контроля;
 - различные дополнительные устройства.
2. Наборы блоков из библиотек *Simulink* и *SimPowerSystems* являются основой для построения моделей устройств, состоящих из цепей, включающей в себя пассивные и активные элементы и источники энергии, но системы управления на базе функцио-

- нальных блоков и из системы контроля, включающей средства измерения.
3. При соединении пассивных и активных элементов, источников и измерителей необходимо учитывать направление тока в соединительных проводах и при отсутствии возможности их соединения применять специальные соединители — коннекторы (*Connectors*).
 4. Созданная SPS-модель при запуске включает необходимость составления и решения дифференциальных уравнений цепи, что существенно упрощает процесс моделирования.
 5. Настройка блоков SPS-модели осуществляется через специализированный установочный ди-

- алог параметров и дополнительно включает задание начальных условий (значений тока и напряжения).
6. Настройка процесса моделирования заключается в выборе решателя дифференциальных уравнений и расчете максимального шага дискретизации и времени моделирования с учетом минимальной и максимальной частот анализируемых сигналов.
 7. Программа MATLAB автоматически выполняет проверку набираемых в командном окне команд и собираемых в окне модели схем, выявляет допущенные пользователем ошибки и автоматически сообщает о характере выявленных ошибок, что существенно облегчает процесс настройки моделей. ■

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).

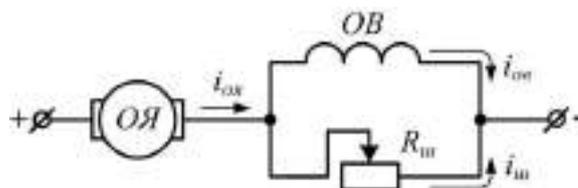


Рис. 4.1. Двигатель с последовательным возбуждением, оборудованный шунтированием обмотки возбуждения резистором

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:

$$V = \frac{U_{д} - I \cdot R_{д}}{C\Phi}; \quad (4.1)$$
$$F = \frac{C\Phi I}{\eta_F},$$

где $U_{д}$ – напряжение, прикладываемое к зажимам двигателя; I – общий ток двигателя; $R_{д}$ – сопротивление двигателя; C – постоянная машины; Φ – магнитный поток обмотки возбуждения; η_F – КПД тяговой передачи.

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).

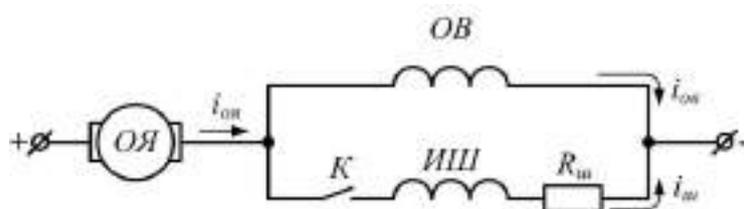


Рис. 4.2. Шунтирование обмотки возбуждения резистором

На представленной схеме (рис. 4.2) цепь ослабления возбуждения состоит из трёх элементов: ключ К, 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 К.

4.2. Блоки, необходимые для создания модели

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

- *Demux* – демультимплексор. 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.

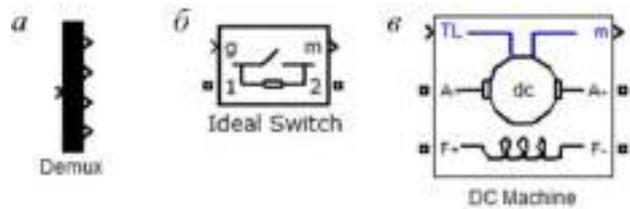


Рис. 4.3. Элементы, необходимые для выполнения лабораторной работы (см. примечание)

- *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.*

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.

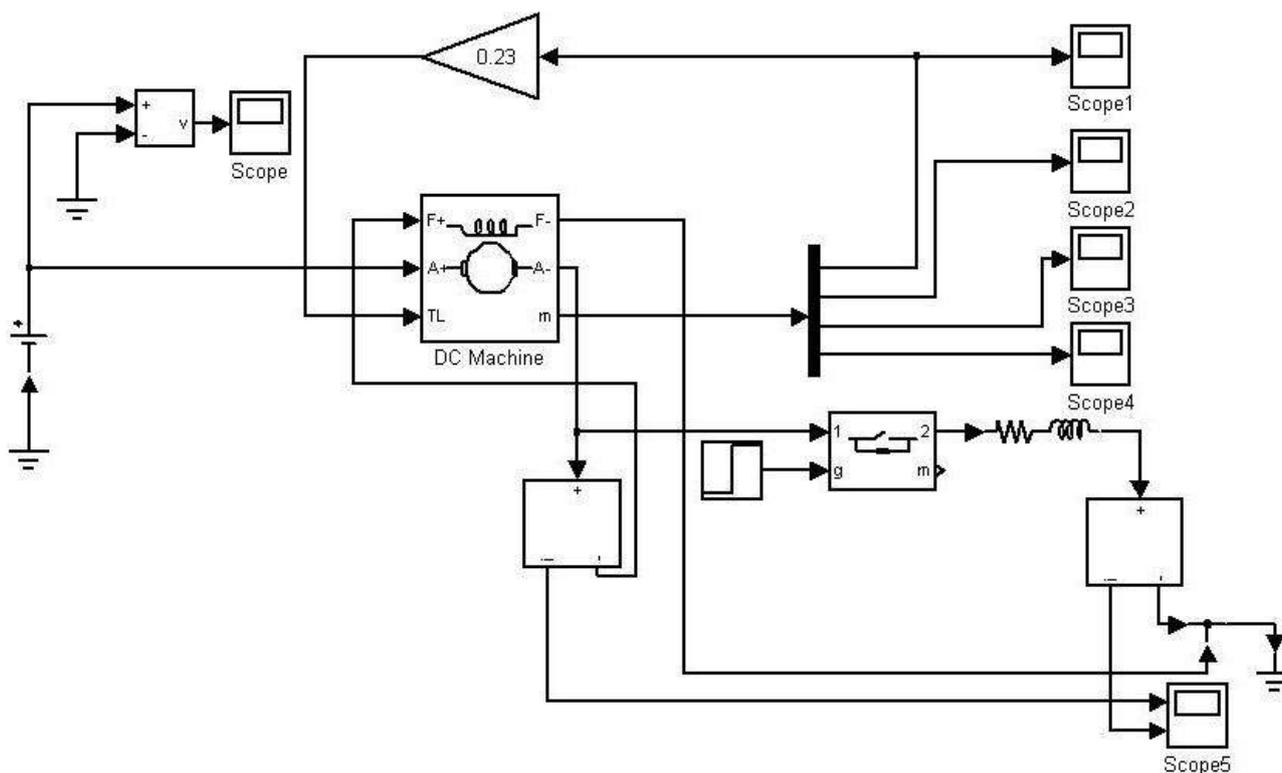


Рис. 4.4. Модель двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, выполненная в *Simulink*

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.

Демультимплексор служит для разделения по осциллографам векторного сигнала, формирующегося на выходе «m» 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_{III} и сопротивления шунтирующего резистора R_{III} (Элемент *Series RLC Branch*) выбираются из табл. 4.2 в зависимости от варианта. Напряжение источника выбирается также из табл. 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_{III} , Гн | 9,5 | 10 | 10,5 | 11 | 11,5 | 12 | 12,5 | 13 | 13,5 | 14 | 14,5 | 15 | 15,5 | 16 |
| R_{III} , 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.

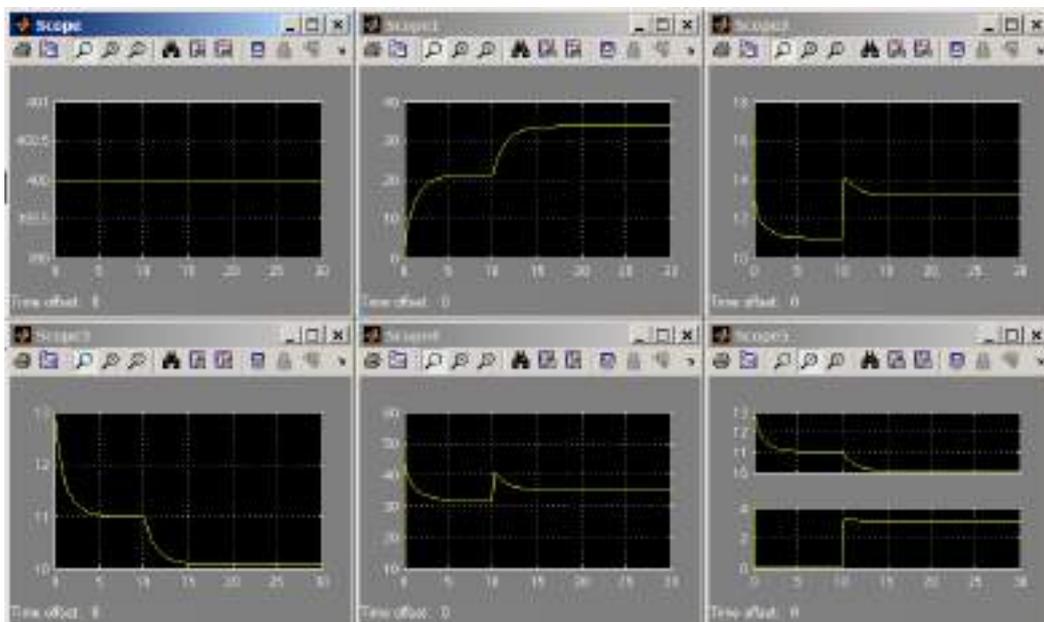


Рис. 4.5. Осциллограммы, полученные в результате расчёта модели

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).

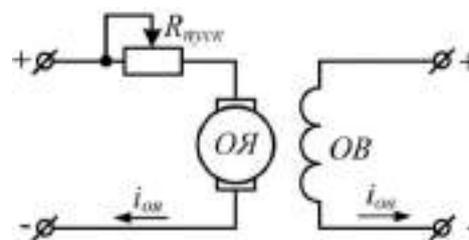


Рис. 5.1. Двигатель с независимым возбуждением, оборудованный пусковым реостатом

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

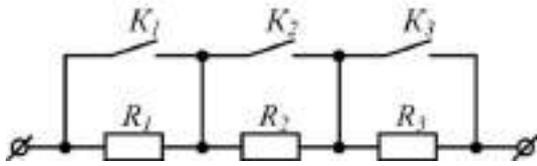


Рис. 5.2. Схема пускового реостата, состоящего из последовательно соединённых резисторов

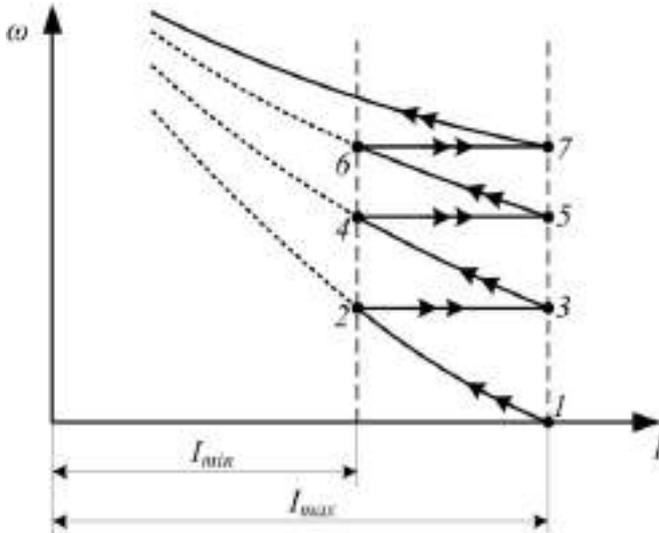


Рис. 5.3. Пусковая диаграмма

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.

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

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.

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 $i_{\text{оя}}$ уменьшается.

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; *c* – 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 saracitance), Ом; ёмкостное сопротивление искрогасящей цепи (Snubber saracitance), 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.

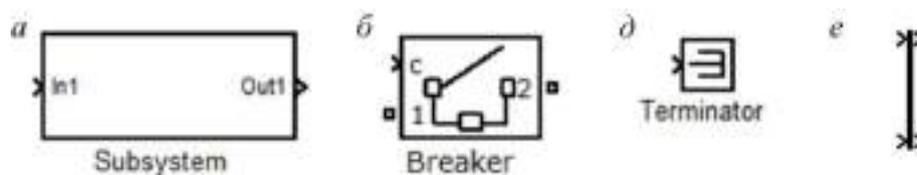


Рис. 5.4. Элементы, необходимые для выполнения лабораторной работы

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.

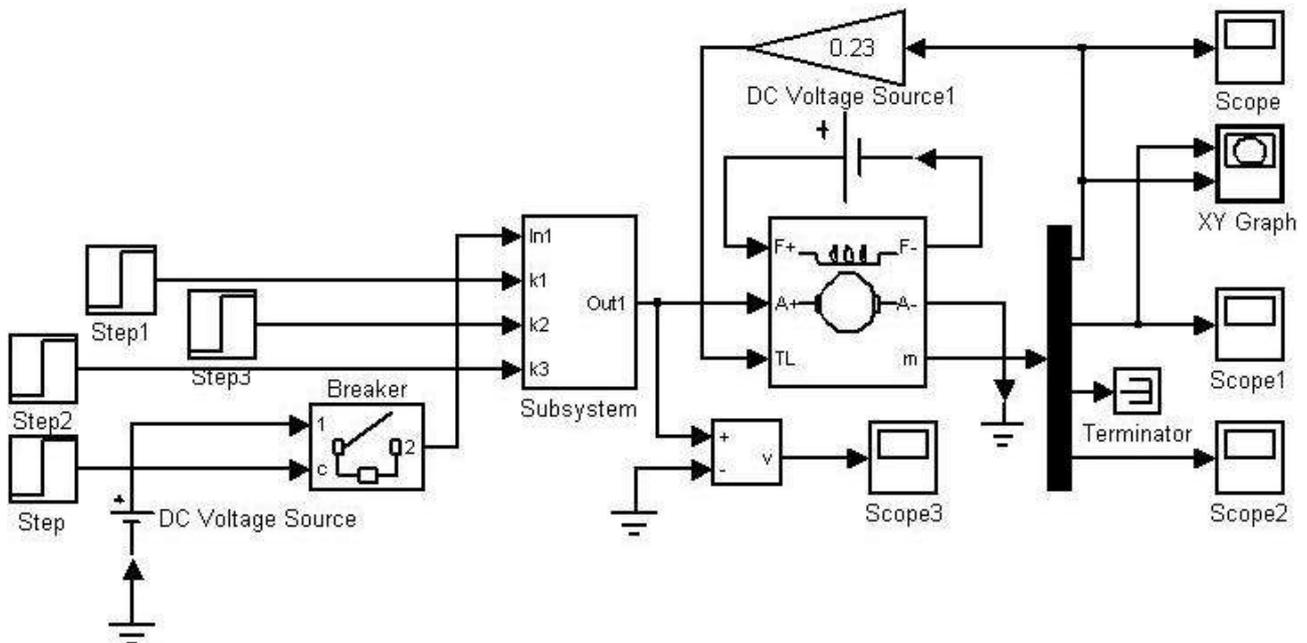


Рис. 5.5. Модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, выполненная в Simulink

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

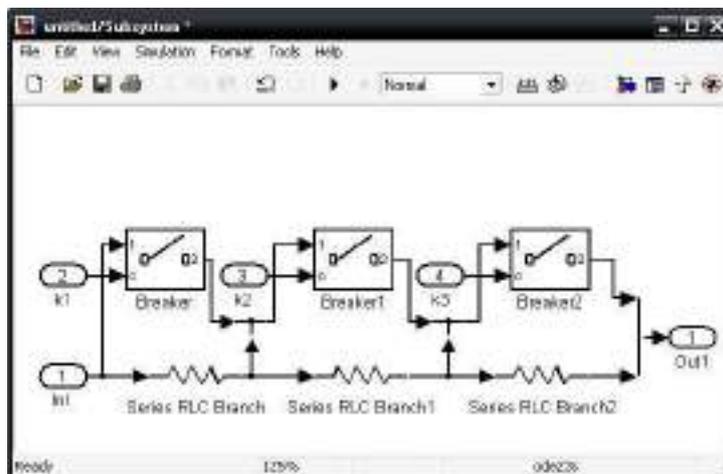


Рис. 5.6. Модель пускового реостата, созданная в подсистеме

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 скоростную 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.

Варианты для индивидуального задания

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $E, В$ | 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 Score построятся осциллограммы, аналогичные приведённым на рис. 5.7.

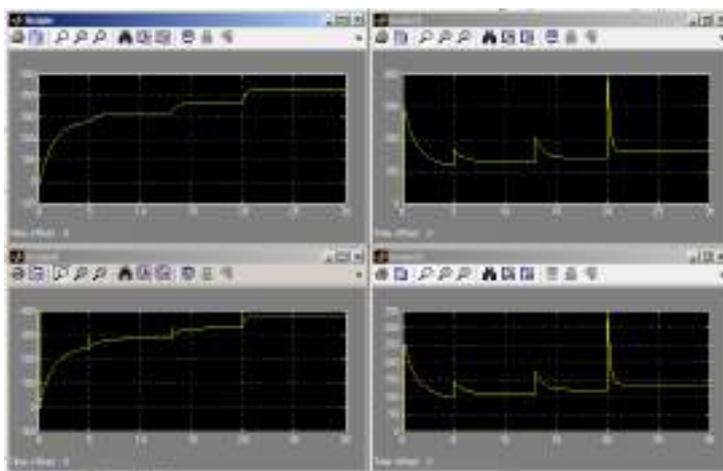


Рис. 5.7. Осциллограммы, полученные в результате расчёта модели

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

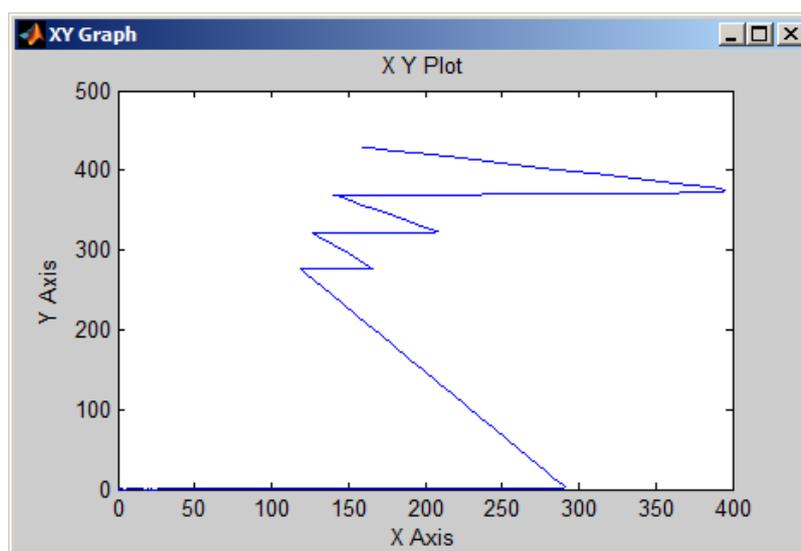


Рис. 5.8. График, построенный элементом XY Graph

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.

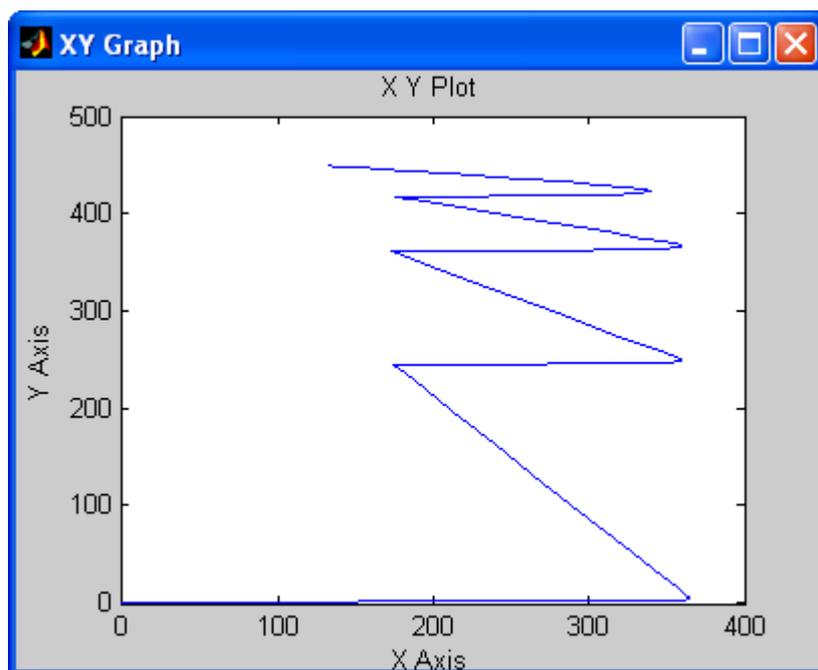


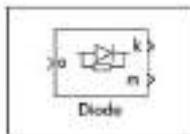
Рис. 5.9. График, построенный элементом XY Graph, после корректировки схемы модели

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

Лабораторная работа №5 «Построение SPS-моделей с полупроводниковыми элементами.»

Устройства силовой электроники Power Electronics

В данном разделе библиотеки SimPowerSystems содержатся блоки, представляющие собой виртуальные модели полупроводниковых элементов: диодов, тиристоров и транзисторов. Рассмотрим принципы построения моделей устройств на этих элементах и особенности настройки их параметров. В примерах таких моделей по мере необходимости вводятся новые для читателя блоки из рассмотренных и предыдущих уроках разделов библиотек Simulink и SimPowerSystems. По этим блокам дается краткая информация, достаточная для правильного их использования, и обращается внимание на их специфические особенности.



Силовой диод Diode

Иллюстрация полупроводникового диода.

Изменяется моделирует полупроводниковый силовой диод (рис. 1а).

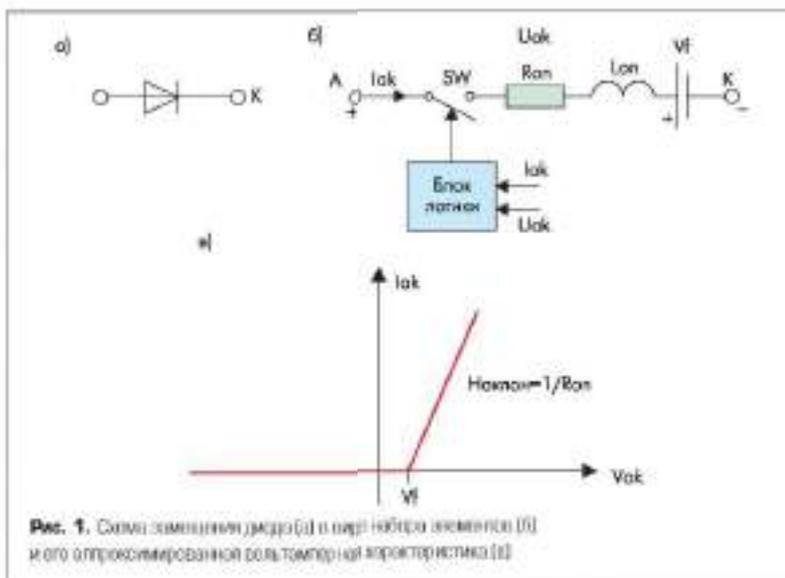


Рис. 1. Символический диод (а) и набор элементов (б) и его аппроксимированная вольт-амперная характеристика (в)

Модель диода представляет собой схему замещения и содержит резистор R_{on} , индуктивность L_{on} , источник постоянного напряжения V_f и ключ SW, включенные последовательно (рис. 1б). Управляет работой ключа блок логики. При положительном напряжении на диоде ($U_{ak} > U_f$) происходит его включение (замыкание) и через прибор начинает протекать ток. Размыкание ключа (выключение диода) осуществляется при снижении до нуля тока I_{ak} , протекающего через диод. Параллельно шунту подключена демпфирующая цепь, состоящая из последовательно соединенных резистора R и емкости C.

Параметры блока (овно для настройки параметров блока вызывается двойным щелчком левой клавишей мыши — ЛКМ по иконке графика блока): Resistance R_{on} (Ohm) — сопротивление во включенном состоянии (Ом); Inductance L_{on} (H) — индуктивность во включенном состоянии (Гн); Forward voltage U_f (V) — падение напряжения в прямом направлении (В); Initial current I_{ak} (A) — начальное значение тока (А). При значении параметра, равном нулю, моделирование начинается при закрытом состоянии диода. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии диода; Snubber resistance R_s (Ohm) — сопротивление демпфирующей цепи (Ом); Snubber capacitance C_s (F) — емкость демпфирующей цепи (Ф).

На иконке блока Diode имеются анод a и катод k, а также выходной порт, обозначенный m, в котором формируется векторный Simulink-сигнал из двух составляющих. Первая из них соответствует анодному току диода, вторая — напряжению на аноде диода.

Пример 1. Выполнить модель однофазного выпрямителя с RL-нагрузкой и измерить токи и напряжения на диоде и на нагрузке.

Исходные данные для модели: питающее переменное напряжение 220 В с частотой переменного тока 50 Гц, нагрузка с сопротивлением 2 Ом и индуктивностью 5 мГн.

Запускается MATLAB и вызываются два окна: окно обозначателя библиотеки Simulink Library Browser — иконкой , окно модели — через

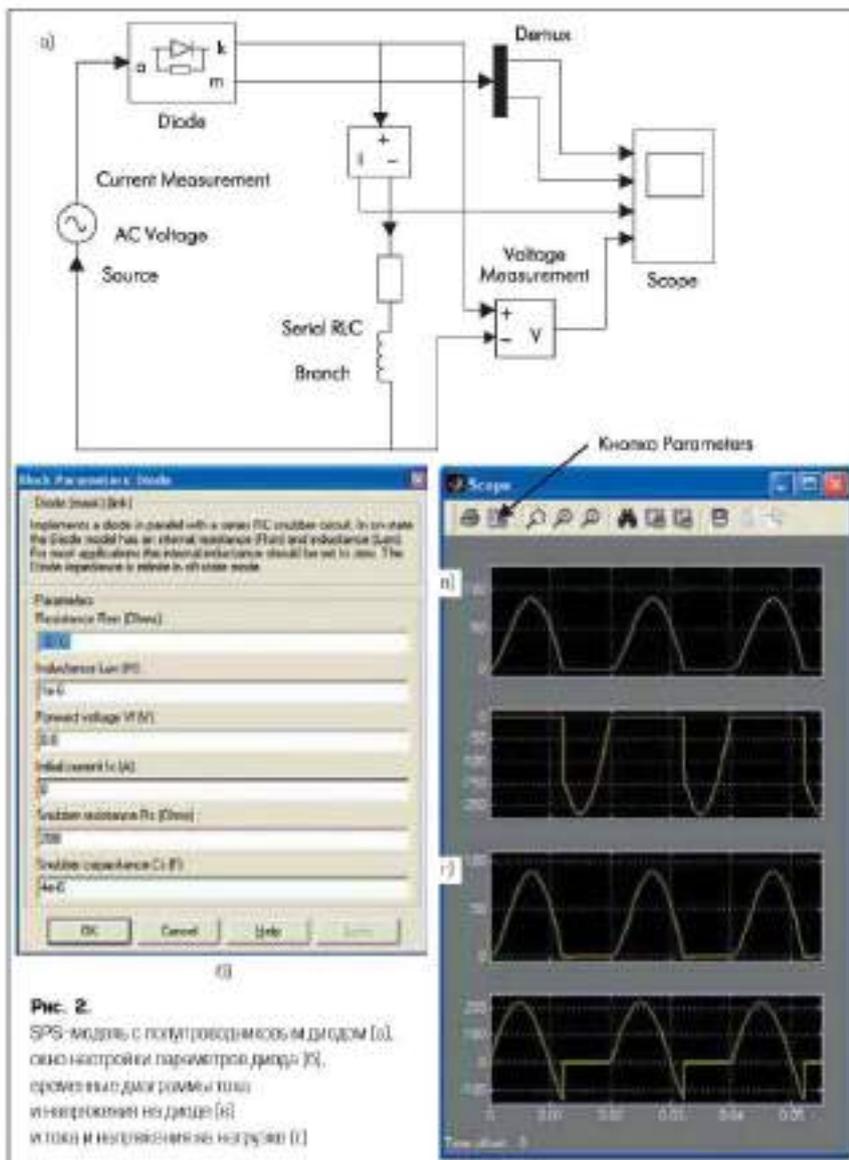


Рис. 2. SPS-модель с полупроводниковым диодом (а), окно настройки параметров диода (б), скриншоты диаграммы тока и напряжения на диоде (в) и тока и напряжения на нагрузке (г)

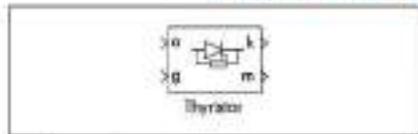
File/New/Model. Расположены окна на рабочем столе. В левой части окна обозначателя следует закрыть дерево Simulink, открыть дерево SimPowerSystems и активировать строку дерева Electrical Sources (источники электрической энергии). В правой части окна обозначателя открывается раздел Electrical Sources. С помощью ЛКМ нужно перетянуть пиктограмму источника переменного напряжения AC Voltage Source в окно модели. Действуя аналогично, в окно модели поочередно перемещают пиктограмму последовательной RLC-цепи Series RLC Branch из раздела Elements (электротехнические элементы), пиктограмму измерителя напряжения Voltage Measurement и измерителя тока Current Measurement из раздела Measurements (измерительные и контрольные устройства). Из библиотеки Simulink — пиктограммы осциллографа Scope из раздела Sinks (приемники и измерители сигналов) и Demux из раздела Signal Routing (блоки, определяющие маршруты сигналов). Производится соединение блоков в схему (рис. 2а), в которой к анодному

порту *a* диода подключается осциллограф Scope через демультиплексор Demux, выделяющий из общего векторного Simulink сигнала два разделенных сигнала, выводимых на подключенный осциллограф. Сам осциллограф имеет четыре входа. Напомним, что количество входов устанавливается после вызова в окне осциллограмм Scope (рис. 2в) кнопкой Parameters другого окна с именем Parameters Scope и закладкой General — общие параметры, где и устанавливается требуемое число осей Number axes.

В блоках настройки параметров производится установка питающего напряжения 220 В, частоты 50 Гц (окно параметров источника AC Voltage Source), сопротивление 2 Ом, индуктивность 5 мГн и емкость inf (бесконечность) (окно параметров блока Series RLC Branch). Окно параметров диода с установленными настройками приведено на рис. 2б. Если в демпфирующей цепи Scope уменьшить сопротивление резистора до величины 10–20 Ом, то на экранной нагрузке могут появиться высокочастотные колебания, что свидетельствует о необходи-

мости внимательного отношения к выбору параметров элементов этой цепи. Менее чувствительны процесса коммутации диода к выбору величины емкости данной цепи, но снижение ее ниже 10^{-4} Ф также может вызвать появление аналогичных колебаний. Индуктивность L_{sc} начинает сказываться на картинке процессов при значении более 1–5 мГн. Допускается выбирать величину этого параметра бесконечно малой или даже нулевой. Временные диаграммы тока и напряжения на диоде и тока и напряжения на нагрузке приведены на осциллограммах (рис. 2в и 2г). Рекомендуется посмотреть и сравнить временные диаграммы процессов при различных сочетаниях параметров диода и нагрузки, не забывая каждый раз вновь запускать процесс моделирования.

Тристор Thyristor, Detailed Thyristor



Пиктограмма тиристора. Пиктограмма моделирует тиристор. В библиотеке SimPowerSystem имеется упрощенная модель — Thyristor и уточненная модель — Detailed Thyristor.

Упрощенная модель тиристора состоит из резистора R_{sc} , индуктивности L_{sc} , источника постоянного напряжения V_f и ключа SW, соединенных последовательно (рис. 3а и 3б). Ключ управляется блоком логики. При положительном напряжении на тиристоре ($V_{ak} - V_f$) и поступлении положительного сигнала на управляющий электрод *g* происходит замыкание ключа с пропускаем ток. Выключение тиристора происходит при снижении до нуля тока I_{sc} , протекающего через тиристор.

В уточненной модели тиристора длительность управляющего импульса должна быть достаточной, чтобы анодный ток включаемого тиристора превысил ток удержания (I_h). Иначе выключение не произойдет. При выключении тиристора длительность запирающего отрицательного напряжения «анод-катод» должна превышать время выключения тиристора (T_r). Иначе тиристор автоматически выключится даже при нулевом управляющем сигнале. На рис. 3в приводятся статические вольт-амперные характеристики модели тиристора для включенного и выключенного состояний. В модели параллельно тиристору включена демпфирующая последовательная RC-цепь.

Окно настройки параметров аналогично окну настройки параметров диода. Но имеются особенности, а именно Latching current I_l (A) — величина тока удержания (A); Time of time T_C (s) — время выключения (с). Оба параметра задаются в уточненной модели тиристора.

На выходе порта блока *m* формируется вектор Simulink-сигнала, содержащий две составляющие — анодный ток и напряжение «анод-катод» тиристора.

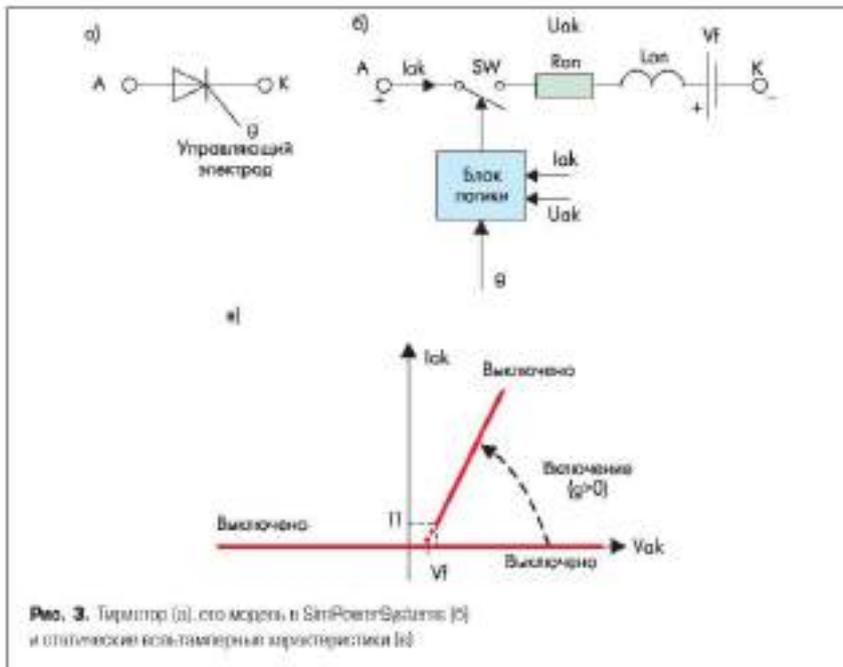


Рис. 3. Тиристор (а), его модель в SimPowerSystems (б) и типичный вольт-амперный характеристика (в)

Пример 2. Выложить модель однофазного выпрямителя на тиристоре с RL-нагрузкой и измерить ток и напряжение на нагрузке.

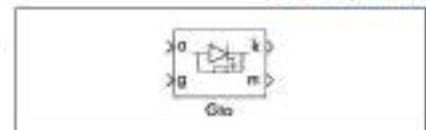
Исходные данные для модели: питающее переменное напряжение 100 В с частотой переменного тока 50 Гц; нагрузка с сопротивлением 2 Ом и индуктивностью 5 мГн, угол отставания тиристора 90°.

Собранная схема модели выпрямителя представлена на рис. 4а и выполнена аналогично схеме диодного выпрямителя на рис. 2а. Особенности рассматриваемой схемы: отставание тиристора осуществляется от генератора Pulse Generator, подключенного к порту g информационный порт m тиристора заглушен (подключен Terminator, находящийся

в разделе Sinks библиотеки Simulink); введен новый блок Ground (замкнутно) из раздела Connectors (соединители) библиотеки SimPowerSystems, позволяющий упростить конфигурацию схемы. Различают блоки Ground (input) и Ground (output), то есть входное и выходное заземления, отличающиеся направлением стрелки, на что следует обратить внимание при сборке схемы. При отсутствии блока Terminator в командном окне будет выдана ошибка.

Параметры генератора заданы в окне (рис. 4б), из которого видно, что период (Period) составляет 0,02 с, ширина импульса (Pulse Width) — 5% от периода, фазовый сдвиг (Phase Delay) — четверть периода (90°). Оско для настройки параметров тиристора приведено на рис. 4в. Результаты моделирования представлены в виде временных диаграмм тока через нагрузку и напряжения на нагрузке на рис. 4г.

Полностью управляемый тиристор GTO Thyristor



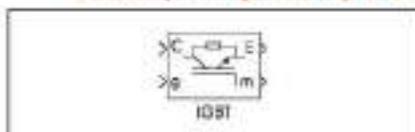
Пиктограмма полностью управляемого тиристора GTO.

Назначение: моделирует полностью управляемый тиристор.

Рис. 4. SPSS-модель с тиристором (а), окна настройки генератора импульсов (б) и тиристора (в), временные диаграммы тока и напряжения (г) на нагрузке

Модель аналогична модели тиристора на рис. 4а. Особенность ее состоит в том, что для выключения прибора достаточно снизить управляющий сигнал до нулевого уровня. Выключение GTO-тиристора происходит также при спаде анодного тока до нуля, даже при наличии отрицательного управляющего сигнала. Параллельно самому тиристоры подключена демфирующая RC-цепь как в обычном тиристоре. В модели учитываются конечное время выключения тиристора. Процесс выключения состоит из двух участков: времени спада T_f (анодный ток уменьшается до 0,1 от тока в момент выключения) и времени затухания T_r (анодный ток уменьшается до нуля). Эти составляющие дополнительно внесены в окно настройки параметров GTO-тиристора: *Current 10% fall time T_f (s)* — время спада тока до уровня 0,1 от тока в момент выключения (*c*); *Current fall time T_r (s)* — время затухания (*s*). Время, за которое ток уменьшится до нуля от уровня 0,1 тока в момент выключения.

Биполярный транзистор IGBT



Пиктограмма биполярного транзистора с изолированным затвором. На пиктограмме указан выходной порт блока, обозначенный *m*, для формирования векторного Simulink-сигнала из двух элементов — тока «коллектор-эмиттер» транзистора и напряжения «коллектор-эмиттер».

Назначение: моделирует биполярный транзистор с изолированным затвором.

Модель IGBT-транзистора состоит из резистора R_{on} , индуктивности L_{on} , источника постоянного напряжения V_f и ключа SW, включенных последовательно (рис. 5а и 5б). Работой ключа управляет блок логики. Выключение прибора происходит при положительном напряжении «коллектор-эмиттер», которое превышает V_{ce} и на затвор g транзистора подан положительный сигнал. Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе g до нуля. Транзистор находится в выключенном состоянии при отрицательном напряжении «коллектор-эмиттер». В модели параллельно своему прибору включена демфирующая цепь из последовательно соединенных резистора и конденсатора. На рис. 5а показаны статические вольт-амперные характеристики модели IGBT-транзистора для выключенного и включенного состояний.

В модели также учитывается инерционность выключения прибора выделением конечного времени выключения. Процесс выключения охватывает два интервала спада с длительностью T_f и в пределах которого ток «коллектор-эмиттер» уменьшается до 0,1 от тока в момент выключения (I_{ce0}), и затухания с длительностью T_r , где ток уменьшается до нуля.

Окно установки параметров биполярного транзистора IGBT аналогично окну параметров полностью управляемого тиристора GTO и по этой причине не рассматривается.

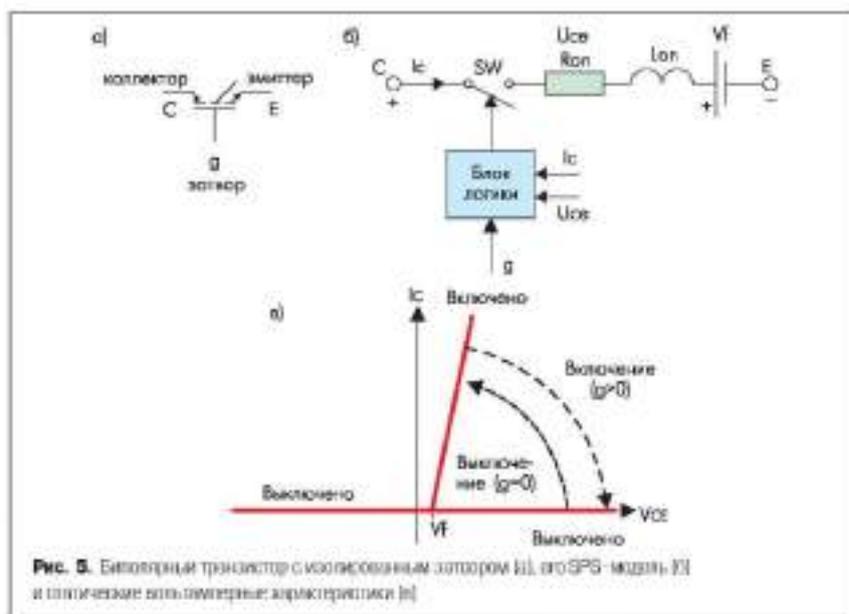
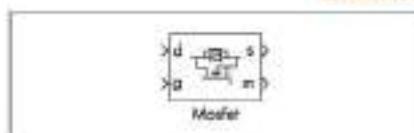


Рис. 5. Электрическая эквивалентная характеристика биполярного транзистора с изолированным затвором (a), его SPIS-модель (b) и статические вольт-амперные характеристики (c)

Силовой полевой транзистор MOSFET



Пиктограмма полевого транзистора. Выходной порт блока *m* предназначен для формирования векторного Simulink-сигнала из двух составляющих — тока «сток-исток» и напряжения «сток-исток» транзистора.

Назначение: моделирует силовой полевой транзистор с параллельно включенным обратным диодом.

Модель MOSFET-транзистора состоит из резистора R_{on} , индуктивности L_{on} и ключа SW, включенных последовательно (рис. 6а и 6б). Работой ключа управляет блок логики. Выключение прибора происходит при положительном напряжении «сток-исток» и положительном сигнале ($g > 0$) на затворе. Выключается прибор при уменьшении сигнала на затворе до нуля ($g = 0$). В случае отрицательного напряжения «сток-исток» транзистор находится в выключенном состоянии, а ток проходит через обратный диод. В модели параллельно своему прибору включена демфирующая цепь из последовательно соединенных резистора и конденсатора. На рис. 6а представлены статические вольт-амперные

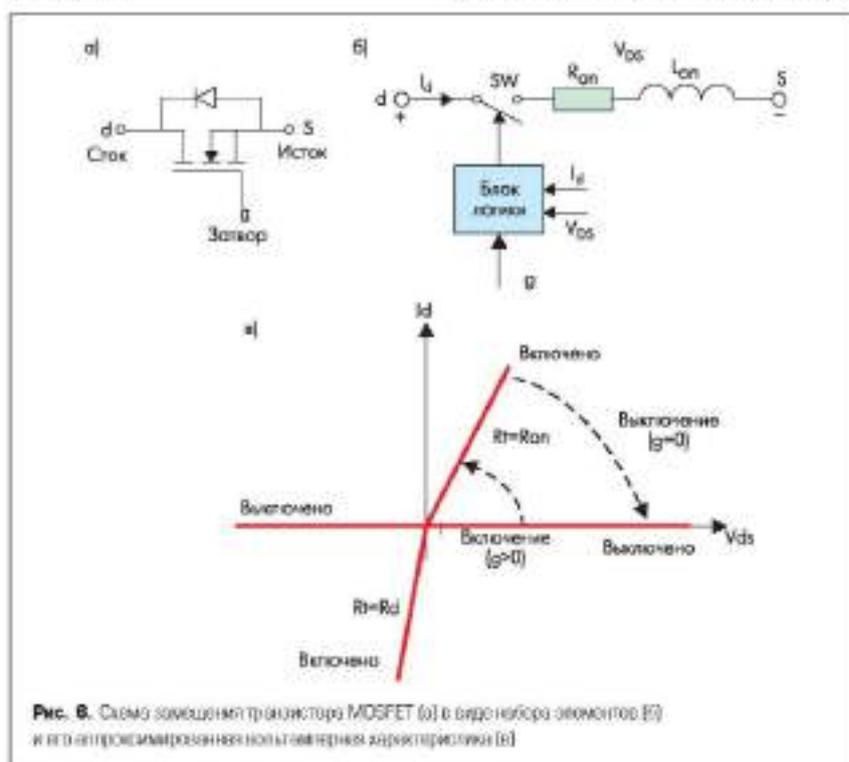
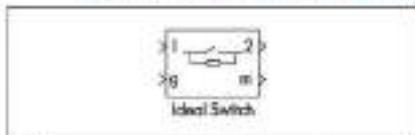


Рис. 6. Схема замещения транзистора MOSFET (a) в виде набора элементов (b) и его аппроксимированные вольт-амперные характеристики (c)

характеристики модели полевого транзистора MOSFET для включенного и выключенного состояний.

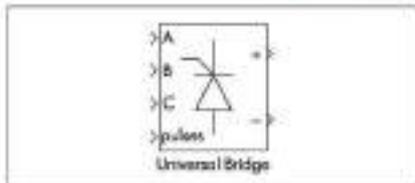
Одно установив параметров транзистора MOSFET аналогично описанию параметров силового диода Diode и по этой причине не рассматривается.

Идеальный ключ Ideal Switch



Параметры идеального ключа.
Назначение: моделирует идеальный ключ. Модель ключа состоит из резистора R_g и ключа SW, соединенных последовательно. Работой ключа управляет блок логики. Включение прибора происходит при единичном положительном сигнале ($g \geq 1$) на управляющем входе. Выключается прибор уменьшением сигнала на входе до нуля ($g = 0$). В модели параллельно самому прибору включена демпфирующая цепь из резистора и конденсатора, соединенных последовательно. Одно установив параметров идеального ключа Ideal Switch не требует особых пояснений.

Универсальный мост Universal Bridge



Параметры универсального моста.
Назначение: моделирует универсальный мост. Модель позволяет выбрать количество плеч моста (от 1 до 3), вид полупроводниковых приборов (диоды, тиристоры, идеальные ключи, а также полностью управляемые тиристоры, IGBT- и MOSFET-транзисторы, шунтированные обратными диодами). В модели можно выбрать вид клемм A, B и C (входные или выходные) (рис. 7а).

Одно задание **параметров** параметра блока (рис. 7б).

Number of bridge arms — число плеч моста. Выбирается из списка: 1, 2 или 3.

Port configuration — конфигурация портов. Параметр задает клеммам порта статус входных или выходных клемм. Значение параметра выбирается из списка:

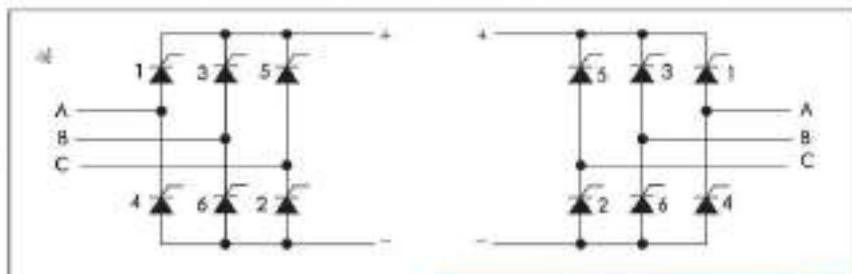
- **ABC as input terminals** — клеммы A, B и C являются входными;
 - **ABC as output terminals** — клеммы A, B и C являются выходными.
- Snubber resistance R_s (Ohm)** — сопротивление демпфирующей цепи (Ом).
Snubber capacitance C_s (F) — емкость демпфирующей цепи (Ф).

Power Electronic device — вид полупроводниковых устройств моста. Значение параметра выбирается из списка:

- **Diodes** — диоды;
 - **Thyristors** — тиристоры;
 - **GTO/Diode** — полностью управляемые тиристоры, шунтированные обратными диодами;
 - **MOSFET/Diode** — MOSFET-транзисторы, шунтированные обратными диодами;
 - **IGBT/Diode** — IGBT-транзисторы, шунтированные обратными диодами;
 - **Ideal Switches** — идеальные ключи.
- Measurements** — измеряемые переменные. Параметр для выбора передаваемых в блок Multimeter переменных, которые можно наблюдать с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:
- **None** — нет переменных для отображения;
 - **Device voltages** — напряжения на полупроводниковых устройствах;
 - **Device currents** — токи полупроводниковых устройств;
 - **UAB UBC UCA UDC voltages** — напряжения на клеммах моста;
 - **All voltages and currents** — все напряжения и токи моста.
- Отображаемым сигналам в блоке Multimeter присваиваются метки:
- **Uin1, Uin2, Uin3, Uin4, Uin5, Uin6** — напряжения на ключах;
 - **Iin1, Iin2, Iin3, Iin4, Iin5, Iin6** — токи ключей;
 - **Uab, Ubc, Uca, Udc** — напряжения на клеммах моста.

Кроме приведенных выше параметров в окне диалога задаются параметры для выбранных полупроводниковых приборов.

Рассмотрим несколько примеров.



а) б)

Рис. 7. Универсальный мост с вариантами выбора выводов и polarity клеммы (а) и окно настройки его параметров (б)

Пример 3. Выполнить модель трехфазного выпрямителя с R нагрузкой и измерить напряжение на нагрузке.

Исходные данные: источник питающее переменное трехфазное напряжение 380 В с частотой переменного тока 50 Гц и фазовым сдвигом 90°, нагрузка сопротивлением 500 Ом.

Схема выпрямителя приведена на рис. 8а и содержит трехфазный источник питания 3-Phase Source (раздел Electrical Sources), универсальный выпрямительный мост Universal Bridge (раздел Power Electronics), сопротивление нагрузки R Series RLC Branch (раздел Elements), измеритель напряжения Voltage Measurement (раздел Measurements) и осциллограф Scope (раздел Sinks). Некоторая специфика прибора состоит в выборе параметров блока источника питания и блока выпрямительного моста. Задается модельное время Stop time, равное 0,02, и максимальный шаг дискретизации Max step size (значение auto) в меню Simulation-Simulation parameters без особых сложностей.

Поскольку трехфазный источник питания используется нами впервые, приведем краткие сведения о настраиваемых параметрах.

Одно устройство **параметров блока:**

- **Phase-to-phase rms voltage (V)** — действующее значение линейного напряжения;
- **Phase angle of phase A (deg)** — начальная фаза напряжения в фазе A (град);
- **Frequency (Hz)** — частота (Гц) переменного напряжения источника;

Internal connection — соединение фаз источника. Значение параметра выбирается из списка Y — звезда Yn — звезда с нулевым проводом; Yg — звезда с заземленной нейтралью.

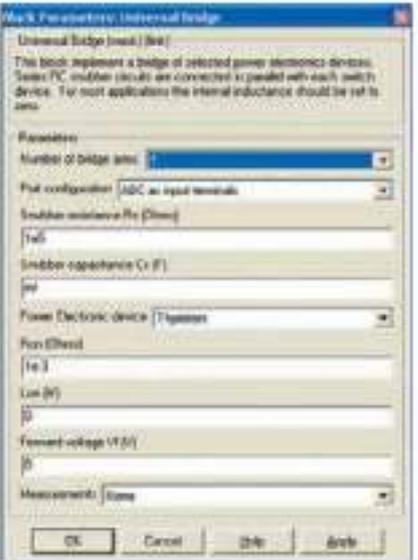


Рис. 7. Универсальный мост с вариантами выбора выводов и polarity клеммы (а) и окно настройки его параметров (б)

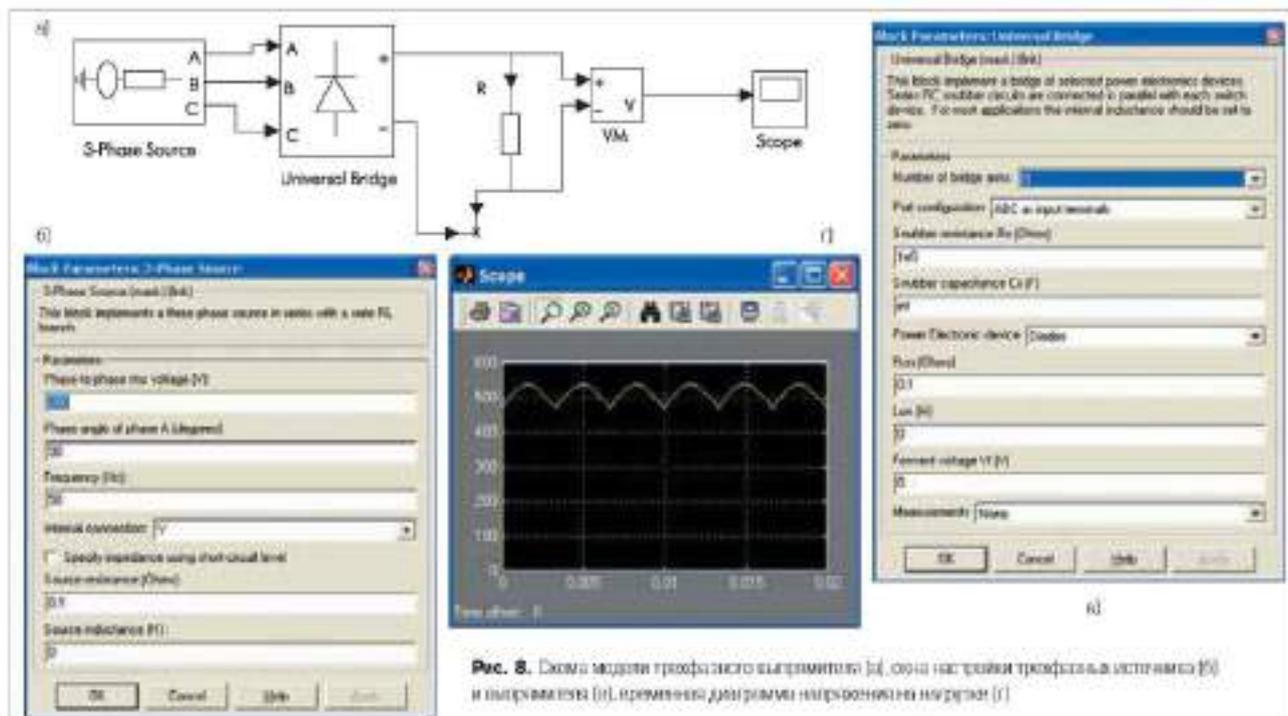


Рис. 8. Схема модели трехфазного выпрямителя (a), окна настройки трехфазного источника (b) и выпрямителя (d), примерная диаграмма напряжения на нагрузке (c)

Specify inductance using short-circuit level — задание полного сопротивления источника с использованием параметров короткого замыкания. После установки этого параметра в окне диалога появляются дополнительные графы для ввода параметров короткого замыкания источника.

Source resistance (Ohm) — собственное сопротивление источника (Ом);

Source inductance (H) — собственная индуктивность источника (Гн);

3-Phase short-circuit level at base voltage (VA) — мощность короткого замыкания при базовом значении напряжения;

Base voltage (Vrms pu>0) — действующее значение линейного базового напряжения источника, с учетом которого определена мощность короткого замыкания;

X/R ratio — отношение индуктивного и активного сопротивлений;

При задании impedance источника через мощность короткого замыкания реактивное сопротивление источника определяется по выражению:

$$X = U_{k3}^2 / Q_{k3}$$

где Q_{k3} — мощность короткого замыкания, U_{k3} — напряжение источника, при котором определена мощность короткого замыкания.

Активное сопротивление источника находится в соответствии с выражением:

$$R = Xk,$$

где k — отношение X к R (параметр *X/R ratio*).

Установленные параметры источника указаны на рис. 8b. Целесообразно познакомиться с этими параметрами и, запустив выходные модели, пронаблюдать характер временных диаграмм процессов. Аналогично

устанавливаются параметры универсального моста, отражает рис. 8d. Выходное напряжение модели трехфазного выпрямителя с активной нагрузкой приведены на рис. 8c.

Пример 4. Выполнить модель питающего однофазного преобразователя на IGBT-транзисторе с LC-сглаживающим фильтром и В нагрузкой и измерить напряжение на нагрузке и ток в ключевых элементах.

Исходные данные для модели: питающее постоянное напряжение 12 В, выходное напряжение 6 В, сопротивление нагрузки 2 Ом, амплитуда переменной составляющей напряжения на нагрузке до 1% (60 мВ), частота работы ключа (частота преобразования) 100 Гц.

Модель преобразователя (рис. 9a) содержит источник питания DC Voltage с напряжением 12 В, генератор прямоугольных импульсов Pulse Generator, подключенный к затвору u транзистора, LC-фильтр, причем между индуктивностью и транзистором имеется T-connector, к которому последним обратный диод Diode. Для наблюдения через порты u за токами транзистора и диода используются демультиплексоры Demux (информация о токе ключа свивается с верхнего порта, а нижний порт остается свободным) и осциллограф Scope с двумя входами. Второй осциллограф Scope1 применяется для получения временной диаграммы выходного напряжения.

Работа преобразователя происходит следующим образом. При включении транзистора питающее напряжение подается на вход сглаживающего фильтра, элементы которого запитываются энергией, причем ток в индуктивности нарастает по линейному закону. После отключения транзистора напряжение на индуктивности L изменяет полярность, а ток сохраняет свое направление, что вызывает включение обратного диода, образующего цепь для протекания тока индуктивности через нагрузку R . У импульсного напряжения, поступающего

на фильтр, при сглаживании выделяется среднее значение на нагрузке, зависящее от соотношения времени открытого состояния транзистора и периода коммутации (коэффициента заполнения импульсов или их относительной длительности). За счет регулирования коэффициента заполнения импульсов осуществляется стабилизация выходного напряжения при воздействии возмущающих факторов — питающего напряжения и тока нагрузки.

Для настройки модели в окне параметров блоков следует установить величину питающего напряжения 12 В источника DC Voltage, параметры транзисторного ключа IGBT (рис. 9b), генератора прямоугольных импульсов (рис. 9в, период 0,01 с и длительность импульса 60%, то есть 0,006 с), сопротивление нагрузки 2 Ом. Параметры сглаживающего LC-фильтра выбраны с учетом требований к уровню временной составляющей напряжения на нагрузке. Остальные настройки уже выполнялись и не должны вызвать затруднений. Отметим лишь, что время моделирования задано 0,3 с, а максимальный шаг — 0,0002 с.

После запуска модели получается временная диаграмма выходного напряжения, охватывающая только часть окна (рис. 9г). Это обусловлено ограниченным количеством запоминаемых точек расчета в настройках осциллографа. Для того чтобы снять указанное ограничение, надо в окне Scope1 через кнопку Parameters (рис. 2e) войти в дополнительное окно Scope parameters с вкладкой Data history и убрать флажок в строке Limit data points to last. Повторный запуск модели дает удовлетворительные временные диаграммы напряжения на нагрузке (рис. 9д) и тока в транзисторного и диодного ключей (рис. 9e). Выбранные значения параметров индуктивности $L = 0,015$ Гн и емкости

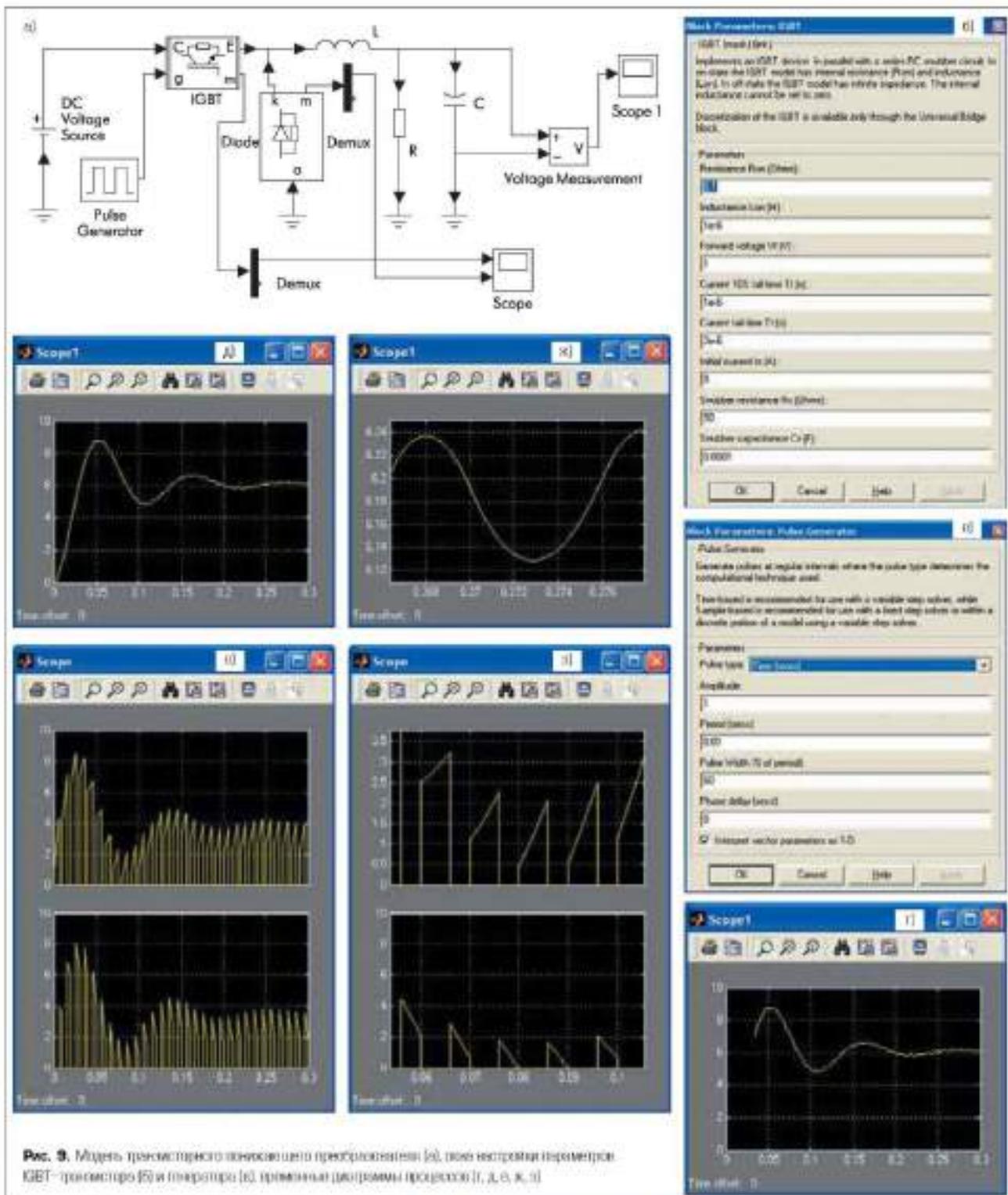
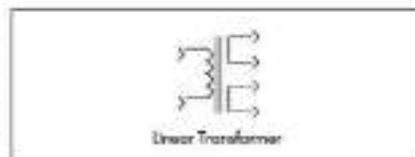


Рис. 9. Модель транзисторного инвертора с цепи преобразования (а), основные настройки параметров IGBT-транзистора (б) и генератора (в), временные диаграммы процессов (г, д, е, ж, з)

$C = 0,02$ Ф обеспечит требуемую величину пульсаций выходного напряжения с размахом около 0,12 В (рис. 9ж) при относительно небольших амплитудах пилообразной составляющей тока транзисторного и диодного плечей (рис. 9б), определяемых индуктивностью L . Два последних рисунка получены за счет выделения с помощью динамической рамки и увеличения части анализируемых временных диаграмм напряжения (рис. 9а) и тока (рис. 9е).

Линейный трансформатор Linear Transformer

Пиктограмма линейного трансформатора.



Назначение: моделирует линейный трансформатор.

Модель трех- или двухобмоточного однофазного трансформатора без учета нелинейности характеристик намагничивания материала сердечника. Схема замещения трансформатора показана на рис. 10а.

Осно установленные параметры:

Nominal power and frequency [Pn(W), fн(Hz)] — номинальная полная мощность (ВА) и номинальная частота (Гц);

Winding 1 parameters ($V1/Vrms$, $R1$ (ρ), $L1$ (ρ)) — параметры первичной обмотки. Действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (ρ — относительные единицы) и индуктивность рассеяния (ρ — о. е.) обмотки;

Winding 2 parameters — параметры вторичной обмотки (действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление ρ и индуктивность рассеяния ρ обмотки);

Three windings transformer — трехобмоточный трансформатор. При установленном флажке трансформатор имеет две вторичные обмотки, а если флажок снят, то одну;

Winding 3 parameters — параметры третьей обмотки (действующее значение напряжения обмотки (В), активное сопротивление (ρ) и индуктивность рассеяния (ρ) обмотки);

Magnetization resistance and inductance (Rm (ρ), Lm (ρ)) — сопротивление (ρ) и индуктивность цепи намагничивания (ρ);

Measurements — измеряемые переменные. Значения параметров выбираются из списка:

- *Winding voltage* — напряжение обмоток;
- *Winding current* — ток обмоток;
- *Magnetization current* — ток намагничивания;
- *All voltages and currents* — все напряжения и токи.

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также цепи намагничивания задаются в относительных единицах. Для каждой обмотки относительные значения сопротивления и индуктивности вычисляются по выражениям:

$$R^* = R/R_0$$

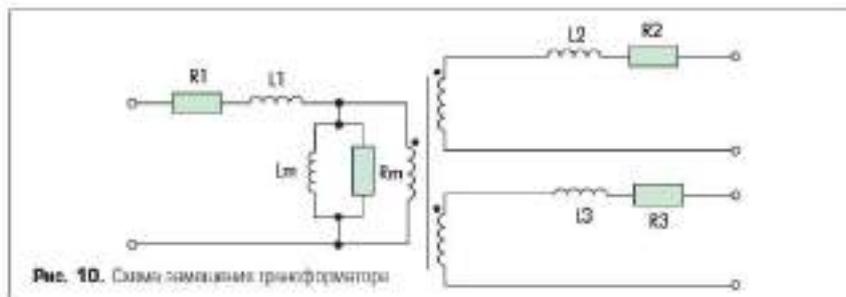


Рис. 10. Схема замещения трансформатора

$$L^* = L/L_0$$

где R^* и L^* — относительные значения сопротивления и индуктивности; R и L — абсолютные значения сопротивления и индуктивности; $R_0 = U_n^2/P_n$ — базисное сопротивление; $L_0 = R_0/(2\pi f_n^2)$ — базисная индуктивность; U_n — номинальное напряжение обмотки; f_n — номинальная частота переменного тока. Рассчитанные относительные параметры обмоток оказываются одинаковыми.

Параметры цепи намагничивания можно задать через величину тока намагничивания заданную в процентах от номинального тока. Так, при токе намагничивания, равном 0,2%, сопротивление и индуктивность цепи намагничивания будут равны $10,0002 - 500 \rho$ (о. е.).

Пример 5. Выполнив модель двухфазного выпрямителя с нулевой точкой у трансформатора и емкостным фильтром и измерив напряжение на нагрузке, а также ток и напряжение на диоде.

Исходные данные для модели питающее переменное напряжение 220 В с частотой 50 Гц, выходное напряжение 40–45 В, сопротивление

нагрузки 25 Ом, амплитуда переменной составляющей напряжения на нагрузке до 15% (7 В).

Модель выпрямителя (рис. 11а) содержит источник питания AC Voltage с напряжением 220 В, линейный трансформатор Linear Transformer (окно настройки его параметров приведено на рис. 11б), два диода Diode, С-фильтр, переключаемый параллельно нагрузке R. Для наблюдения через порт «из током и напряжением на диоде используется демультиплексор Demux и осциллограф Scope с двумя входами. Другой осциллограф Scope применяется для получения временной диаграммы выходного напряжения.

Для настройки модели в окнах параметров блоков следует установить величину 220 В и частоту 50 Гц питающего напряжения источника AC Voltage, параметры трансформатора (рис. 11б), сопротивление нагрузки 25 Ом, емкость фильтра 0,001 Ф. Отметим, что время моделирования задано 0,05 с, а максимальный шаг — 0,0002 с. Временные диаграммы напряжения на фильтре и тока и напряжения на диоде представлены на рис. 11в и рис. 11г соответственно.

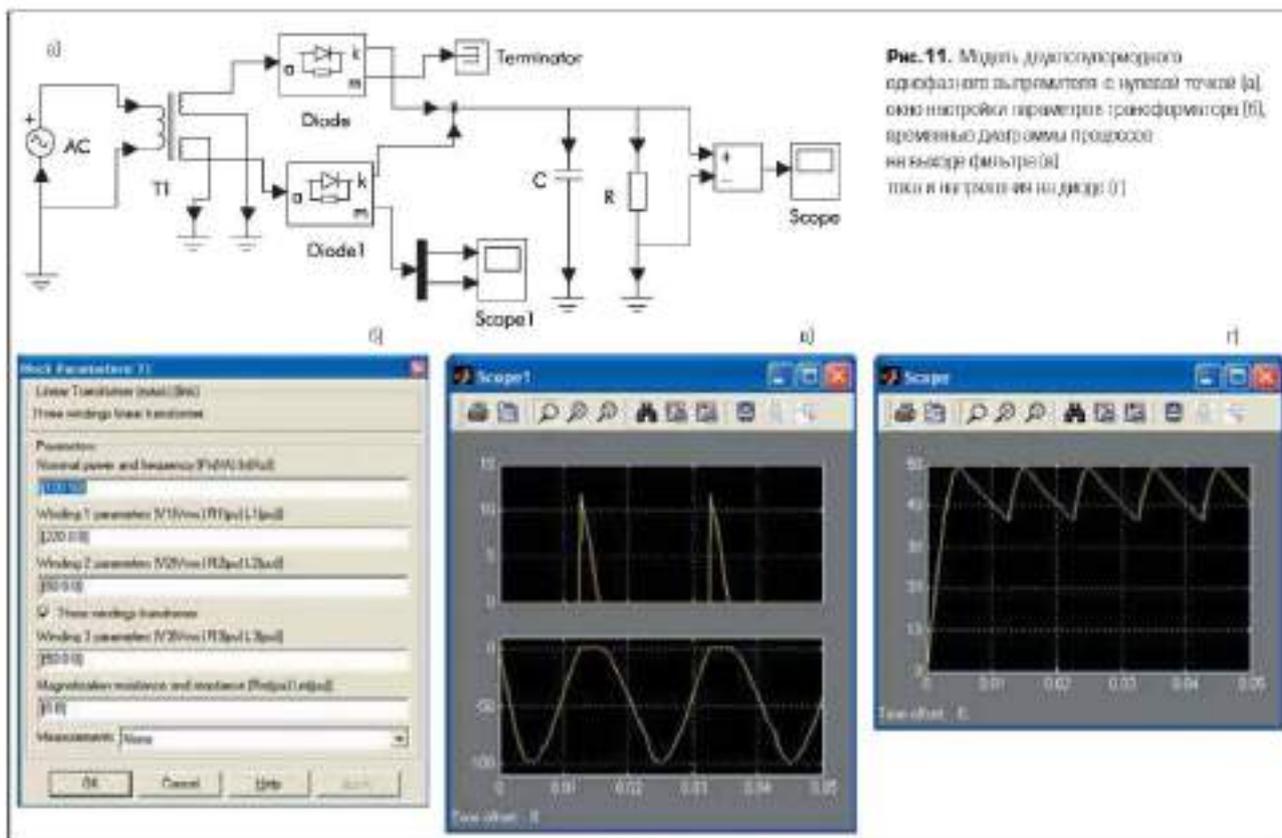


Рис. 11. Модель двухфазного выпрямителя с нулевой точкой (а), окно настройки параметров трансформатора (б), временные диаграммы процесса на выходе фильтра (в) тока и напряжения на диоде (г)

В командном окне появится надпись:

SimPowerSystems: creating Virens_Transformer ...
 Connecting this cross representation of linear electrical circuit ...
 (5 MHz, 2 inputs, 2 outputs, 2 switches)
 Connecting steady state values of currents and voltages ...
 Enabling Simulink spreadsheet control ...
 (Cross model block: Virens_Transformer/Voltage Measurement1 block)
 End.

Программа SimPowerSystems включила Virens_Transformer ...

Расчет и представление переменных состояния для линейной электрической цепи...

(3 переменные, 5 входов, 3 выхода, 2 клеммы)

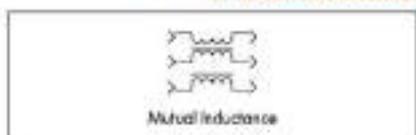
Расчет величин переменных состояния для тока и напряжения...

Использованы уравнения цепи в Simulink...

(Цепь Virens_Transformer снабжена внутри блоком Voltage Measurement)

Готово.

Взаимная индуктивность Mutual Inductance



Пятимерная взаимная индуктивности.

Пятимерная моделирует катушки или проводники, имеющие магнитную связь (рис. 12).

Осно параметры:

Winding 1 self impedance [R1(Ohm) L1(H)] — собственное сопротивление и индуктивность первой обмотки;

Three winding Mutual Inductance — трехобмоточная взаимная индуктивность. При снятии флажка из модели убирается третья обмотка

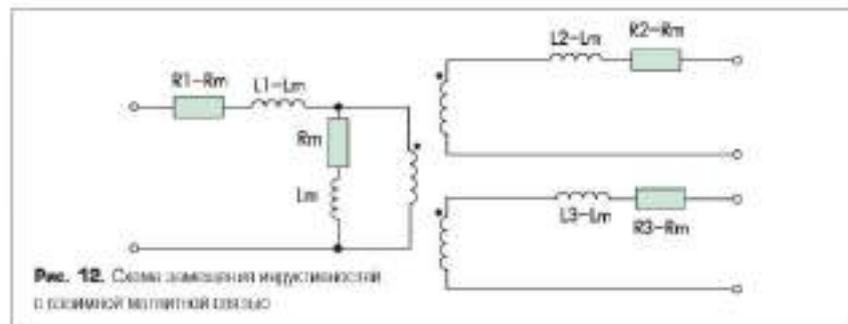


Рис. 12. Схема замещения индуктивностей в линейной модели цепи

Winding 2 self impedance [R2(Ohm) L2(H)] — собственное сопротивление и индуктивность второй обмотки;

Winding 3 self impedance [R3(Ohm) L3(H)] — собственное сопротивление и индуктивность третьей обмотки;

Mutual impedance [Rm(Ohm) Lm(H)] — взаимное сопротивление и индуктивность обмоток;

Measurements — измеряемые переменные.

Значения параметра выбираются из списка:

- None — нет переменных для отображения
- Winding voltages — напряжения обмоток;
- Winding currents — токи обмоток;
- Winding voltages and currents — напряжения и токи обмоток.

Заданные параметры обмоток должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$R1, R2, R3 \neq R_{in}$$

$$L1, L2, L3 \neq L_{in}$$

При моделировании схем с использованием взаимной индуктивности (так же, как и трансформаторов) следует иметь в виду,

что несмотря на отсутствие видимой потенциальной связи между обмотками, такая связь (через резистор) все же имеется. Она необходима для расчета потенциалов в узлах всей схемы. Наличие такой связи не оказывает влияния на измеряемые токи и напряжения обмоток взаимной индуктивности.

Пример 6. Выполнить модель цепи, содержащей индуктивности с взаимной магнитной связью при активно-индуктивной нагрузке и измерить напряжения на обмотках Mutual Inductance.

Исходные данные для модели: два возбуждающих напряжения 10 В с частотой 50 Гц и 5 В с частотой 150 Гц, у нагрузки сопротивление 3 Ом и индуктивность 1,2 мГн.

Схема соединения основных блоков в модели приведена на рис. 13а.

Основная особенность схемы состоит в использовании вместо осциллографа измерительного прибора Multimeter (раздел Measurements). Рядом с пятимерными источниками синусоидальных сигналов AC Voltage предоставлены значения напряжения и частоты 5 В, 150 Гц — у первого и 10 В, 50 Гц —

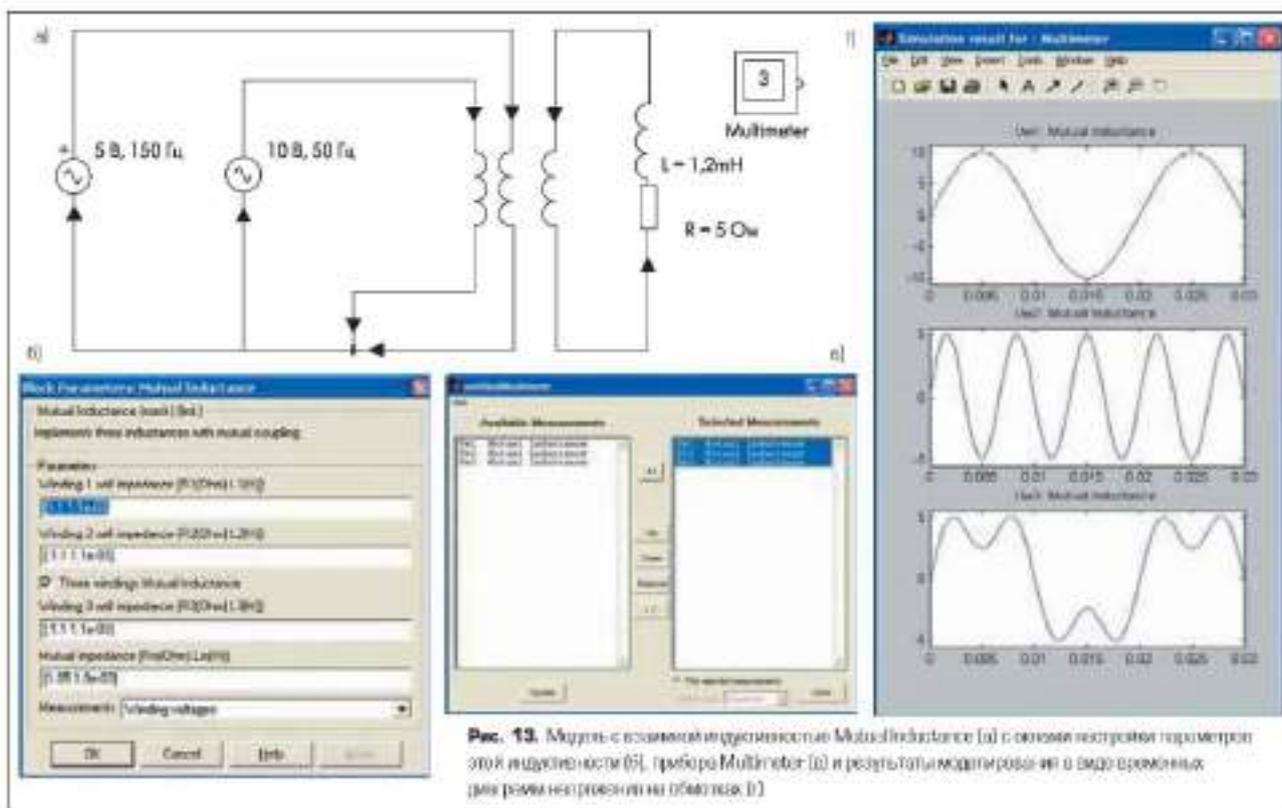


Рис. 13. Модель с взаимной индуктивностью Mutual Inductance (а) с настройкой параметров этой индуктивности (б), прибора Multimeter (в) и результаты моделирования в виде временных диаграмм напряжений на обмотках (д)

у второго. Эти надписи выполняются так: курсор устанавливают на самую дальнюю итерацию левой кнопки мыши ее активируют, после чего можно вносить исправления и изменения. Надписи носят только визуальную информативность и не влияют на результаты настройки источника, которая не должна вызвать затруднений.

Параметры индуктивности устанавливаются в окне (рис. 13б). Основное требование при установке указано выше и оговаривает соотношение сопротивлений и индуктивностей. Также отметим, что в нижней текстовом окне с выпадающим меню выбран измерительный параметр — напряжения обмоток *Winding voltage*, необходимый для применения прибора *Multimeter*. Настройка мультиметра в соответствии с рекомендациями из урока 2 выполняется в окне диалога (рис. 13в). В левой части окна имеются три переменные — напряжения на обмотках U_{n1} , U_{n2} , U_{n3} , которые выбраны при настройке параметров индуктивностей и могут быть измерены мультиметром. Все эти напряжения по очереди были активированы и с помощью клавиши >>> добавлены в правый список, что и видно на рассматриваемом рисунке. Все три переменные выделены и за счет включения команды *Plot selected Measurements* (диаграмма выделенных параметров) в нижней части окна будут изображены на рисунках вместо осциллограмм. После запуска модели получаются три переменные диаграммы на одном рисунке (рис. 13г), на которых видно, что из двух возбуждающих сигналов с разными амплитудами и частотами получается третий суммарный сигнал сложной формы.

Нелинейный трансформатор Saturable Transformer



Saturable Transformer

Построение нелинейного трансформатора. **Назначение:** моделирует трех- или двухмотовый однофазный трансформатор с учетом нелинейности характеристики намагничивания материала сердечника. Схема замещения трансформатора показана на рис. 14а. В модели сопротивление цепи намагничивания R_m учитывает активные потери в сердечнике, а нелинейная индуктивность L_{mag} — намагничивание трансформатора. Нелинейная характеристика в модели задается как кусочно-линейная зависимость между магнитным потоком сердечника и током намагничивания (рис. 15а). В модели имеется возможность задать остаточный магнитный поток в сердечнике. В этом случае вторая точка нелинейной характеристики должна соответствовать нулевому току (рис. 15б).

Окно настройки параметров:

Nominal power and frequency [Pn(VA) f0(Hz)] — номинальная полная мощность (В·А) и номинальная частота (Гц);

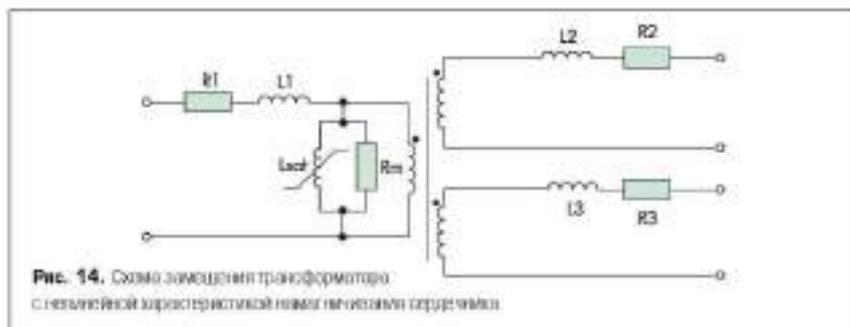


Рис. 14. Схема замещения трансформатора с нелинейной характеристикой намагничивания сердечника

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(ohm) L1(pu)] — параметры первичной обмотки. Действующее значение напряжения (В), активное сопротивление (о. е.) и индуктивность рассеяния (о. е.) первичной обмотки;

Winding 2 parameters — параметры вторичной обмотки. Действующее значение напряжения (В), активное сопротивление (о. е.) и индуктивность рассеяния (о. е.) вторичной обмотки;

Three windings transformer — трансформатор с тремя обмотками. При установленном флажке трансформатор имеет две вторичные обмотки, а при снятом флажке — одну;

Winding 3 parameters — параметры третьей обмотки. Действующее значение напряжения (В), активное сопротивление (о. е.) и индуктивность рассеяния (о. е.) третьей обмотки;

Saturation characteristic [I(pu) phi(pu)] [I(rms) phi(rms) ...] — характеристика насыщения сердечника;

Core loss resistance and initial flux [Rm(pu) phi(pu)] or [Rm(pu)] only — сопротивление цепи намагничивания (о. е.) и остаточный поток (о. е.) или только сопротивление цепи намагничивания (о. е.);

Sinoidal hysteresis — моделирование гистерезиса. При установленном флажке в характеристике намагничивания учитывается гистерезис;

Hysteresis Data Mat file — имя файла данных, содержащего гистерезисную характеристику. Файл данных может быть создан с помощью блока *Powergui*;

Measurements — измерительные переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- *Winding voltage* — напряжения обмоток;
- *Winding current* — токи обмоток;
- *Flux and excitation current [Imag I(Rm)]* — поток и ток холостого хода;

- *Flux and magnetization current [Imag]* — поток и ток намагничивания;
- *All Measurements [V, I, Flux]* — все измеримые напряжения, токи и поток.

Активные сопротивления и индуктивности обмоток, а также сопротивления цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели линейного трансформатора.

Характеристика намагничивания задается парой значений намагничивающего тока и потока в относительных единицах, начиная с точки (0, 0). Относительные значения тока и потока определяются из выражений:

$$I^* = I/I_0 \\ \Phi^* = \Phi/\Phi_0$$

где I^* и Φ^* — относительные значения тока и потока, I и Φ — абсолютные значения тока и потока, $I_0 = 2^{2^2} \times P_n / U_1$ — базисный ток, $\Phi_0 = 2^{2^2} \times U_1 / (2 f_0)$ — базисный поток, P_n — номинальная мощность первичной обмотки; U_1 — номинальное напряжение первичной обмотки, f_0 — номинальная частота.

Пример 7. Выполнить модель трансформатора с нелинейной характеристикой намагничивания сердечника, работающего на активную нагрузку, и измерить напряжение на вторичной обмотке и ток первичной обмотки.

Исходные данные для модели: напряжение питания 220 В с частотой 50 Гц, напряжение на вторичной обмотке 36 В, нагрузка 5 Ом.

В схеме соединения блоков модели (рис. 16а) все блоки, кроме трансформатора *Saturable Transformer*, нам известны. В окне настройки параметров *Saturable Transformer* (рис. 16б) заданы данные в виде координат четырех точек характеристики насыщения

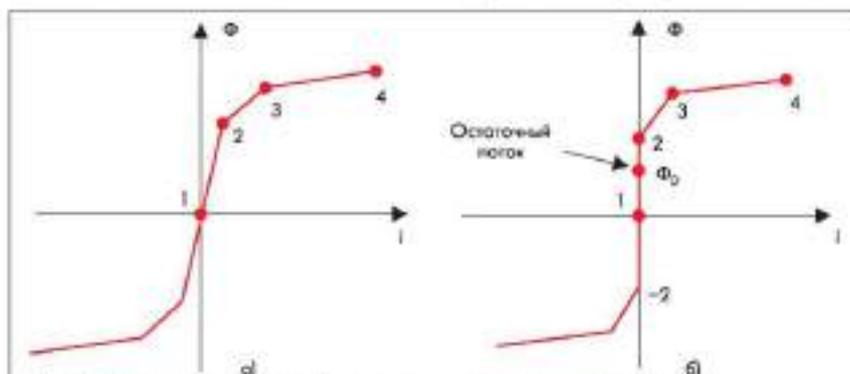


Рис. 15. Нелинейная характеристика намагничивания сердечника трансформатора при отсутствии (а) и наличии (б) остаточного магнитного потока

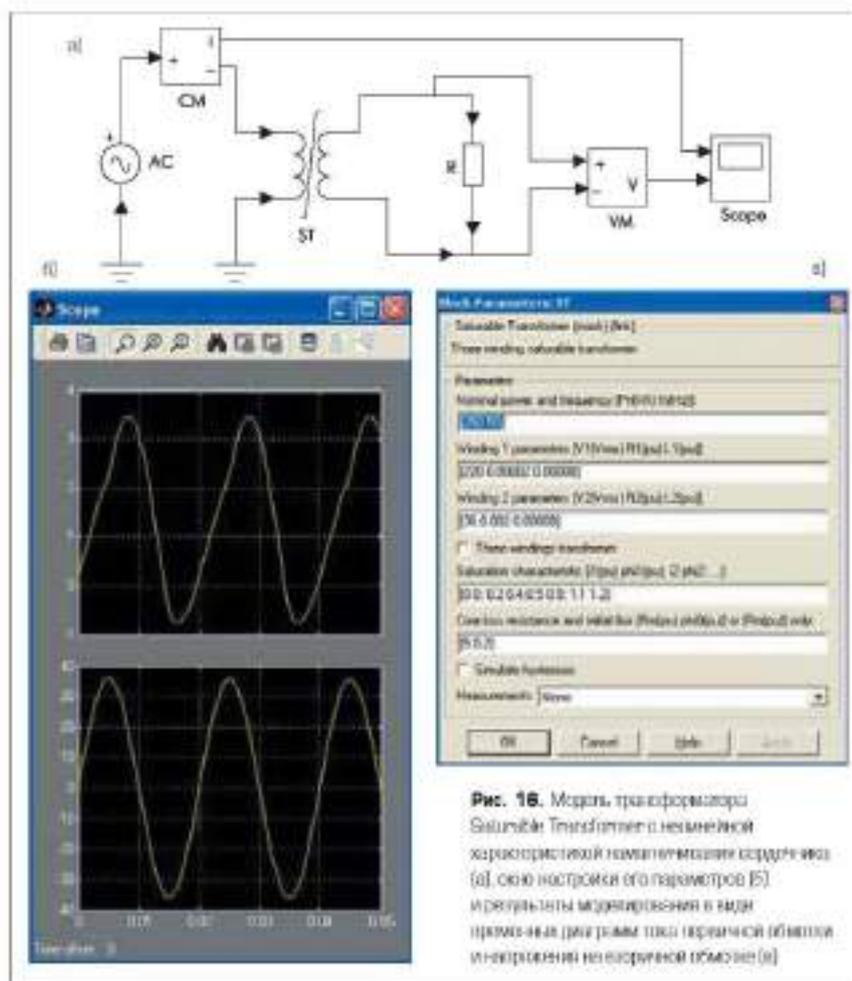


Рис. 16. Модель трансформатора SpiceLib: Transform и нелинейной характеристикой магнетизма сердечника (а), окно настроек его параметров (б) и результаты моделирования в виде графиков зависимости тока (верхний график) и напряжения на нагрузочной обмотке (в)

сердечника: для относительного тока и относительного потока — [0 0; 0.2 0.4; 0.5 0.9; 1.1 1.2]. Временные диаграммы выходного тока трансформатора и напряжения на нагрузке приведены на рис. 16б.

Подведем итоги урока 3.

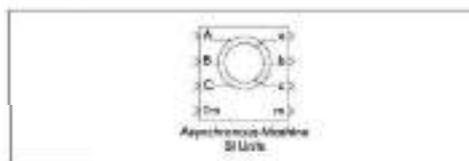
1. Для построения SP5-моделей устройств силовой электроники следует применять виртуальные модели основных видов ключей: полупроводниковых элементов — диодов, тиристоров и транзисторов.
2. В виртуальные модели полупроводниковых ключей введены элементы, позволяющие учесть их инерционные свойства при выключении, и специальные демпфирующие шевочки для сглаживания колебательных составляющих в критных процессах переключения.
3. Для наблюдения характера изменения тока и напряжения на полупроводниковом ключе введен специальный информационный порт для подключения осциллографа.
4. В виртуальных моделях трансформаторов используются элементы схемы замещения, содержащие сопротивление проводников обмоток и индуктивности рассеяния, а также имеется возможность учесть нелинейную характеристику насыщения сердечника магнитопровода.
5. Модели выпрямителей и инверторов целесообразно создавать на базе универсального моста, содержащего различные варианты ключей — диоды, тиристоры, идеальные ключи, а также полностью управляемые тиристоры, IGBT- и MOSFET-транзисторы, шунтированные обратными диодами. При этом число плеч моста выбирается от 1 до 3.

Лабораторная работа №5 «Анализ динамических свойств устройств силовой электроники во временной области»

Моделирование процессов разгона и торможения электродвигателя

Начнем рассмотрение динамических процессов с построения виртуальной модели асинхронного двигателя (АД) с полупроводниковыми ключевыми элементами, позволяющей анализировать процесс разгона при подаче фазных напряжений на обмотку статора, а затем и процесс торможения АД при отключении этой обмотки. В качестве ключевых элементов для коммутации напряжений применяются идеальные ключи *Ideal Switch*.

Рассмотрим блок, используемый в примере с АД *Асинхронный двигатель (Asynchronous Machine)*



Назначение: блок предназначен для моделирования асинхронной электрической машины в двигательном или генераторном режимах, каждый из которых определяется знаком электромагнитного момента.

Порты *а*, *b* и *с* — выводы статорной обмотки машины.

Порты *а*, *b* и *с* — выводы обмотки ротора.

Порт *T_m* предназначен для получения момента сопротивления двигателя. На выходе порта *ω* формируется векторный сигнал, состоящий из 21 элемента: токов, потоков и напряжений ротора и статора в неподвижной и вращающейся системах координат, электромагнитного момента, скорости вращения вала, а также его углового положения.

Для удобства извлечения переменных машины из вектора в библиотеке *SimPowerSystems* предусмотрен блок *Machines Measurement Demux*. Для асинхронного двигателя построены модель электрической части (уравнения четвертого порядка в пространстве состояний) и модель механической части (уравнения второго порядка). Все электрические параметры машины приведены к обмотке

статора. Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной (*dq*-оси) системы координат.

Параметры блока (окно для настройки параметров блока выполняется двойным щелчком левой клавиши мыши — ЛКМ на пиктограмме блока) (рис. 1):

- *Rotor type (тип ротора)* выбирается из списка:
 - *Squirrel-Cage* — короткозамкнутый ротор типа «белочья клетка»;
 - *Wound* — фазный ротор.
- *Reference frame (система координат)* выбирается из списка:
 - *Rotor* — неподвижна относительно ротора;
 - *Stationary* — неподвижна относительно статора;
 - *Synchronous* — вращающаяся вместе с полем.
- *Rated power, L-L vol. and frequency (P_n(VA), U_n(V), f_n(Hz))* — номинальная мощность P_n (ВА), действующее линейное напряжение U_n (В) и номинальная частота f_n (Гц);
- *Stator (R_s(Ohm) L_s(H))* — сопротивление R_s (Ом) и индуктивность L_s (Гн) статора.
- *Rotor (R_r(Ohm) L_r(H))* — сопротивление R_r (Ом) и индуктивность L_r (Гн) ротора.
- *Mutual inductance L_m(H)* — взаимная индуктивность (Гн).
- *Inertia, friction factor and pairs of poles (J(kg·m²) F(N·m·s) p)* — момент инерции J (кг·м²), коэффициент трения F (Н·м·с) и число пар полюсов p.
- *Initial conditions [a b (deg) i_a, i_b, i_c(A) p_{hA}, p_{hB}, p_{hC} (deg)]* — начальные условия.

Параметр задается в виде вектора, каждый элемент которого имеет следующие значения:

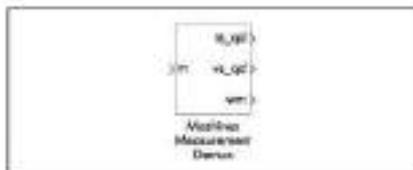
- *i* — скольжение;
- *a* — фаза (град.);
- *i_a, i_b, i_c* — начальные значения токов статора (А);
- *p_{hA}, p_{hB}, p_{hC}* — начальные фазы токов статора (град.).

Начальные условия машины вычисляются при необходимости с помощью блока *Powergui* (см. ниже).

Блок измерения переменных электрической машины *Machines Measurement Demux*

Назначение: блок предназначен для извлечения переменных состояния из вектора измеренных переменных электрической машины. Блок работает





совместно с моделями синхронных и асинхронных машин.

Осно задания параметров представлено на рис. 2.

Параметры блока:

- **Machine type** — тип машины. Выбирается из списка:
 - *Simplified synchronous* — упрощенная синхронная машина;
 - *Synchronous* — синхронная машина;
 - *Asynchronous* — асинхронная машина;
 - *Permanent magnet synchronous* — синхронная машина с постоянными магнитами.

В зависимости от выбранного типа машины в окне параметров будет отображаться разный набор выходных переменных машины. Ниже приведены доступные для измерения переменные асинхронной машины.

- **Rotor currents** [*i_m* *i_b* *i_c*] — токи обмотки ротора.
- **Rotor current** [*i_r* *q* *d*] — проекция тока ротора на оси *q* и *d*.
- **Rotor fluxes** [*phi_r* *q* *phi_r* *d*] — проекция потоков ротора на оси *q* и *d*.
- **Rotor voltages** [*v_r* *q* *v_r* *d*] — проекция напряжений статора на оси *q* и *d*.
- **Stator currents** [*i_a* *i_b* *i_c*] *A* — токи статора.
- **Stator current** [*i_s* *q* *i_s* *d*] *A* — проекция тока статора на оси *q* и *d*.
- **Stator fluxes** [*phi_s* *q* *phi_s* *d*] — проекция потоков статора на оси *q* и *d*.
- **Stator voltages** [*v_s* *q* *v_s* *d*] *V* — проекция напряжений статора на оси *q* и *d*.
- **Rotor speed** [*rpm*] *rad/s* — скорость ротора.
- **Electromagnetic torque** [*Te*] *N.m* — электромагнитный момент.
- **Rotor angle** [*theta_m*] *rad* — угол поворота ротора.

Для измерения требуемой переменной на векторе измеряемых переменных ее необходимо отметить флажком.

Пример 1. Выполнить модель для анализа процессов ротора и торможения асинхрон-

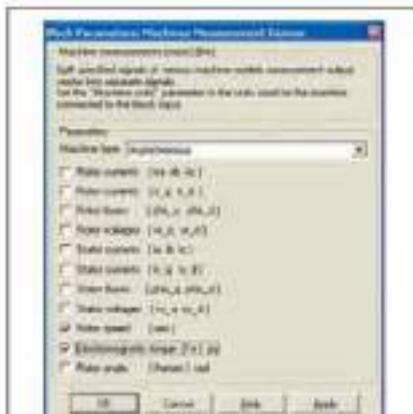


Рис. 2. Окно задания параметров блока Machines Measurement Demux.

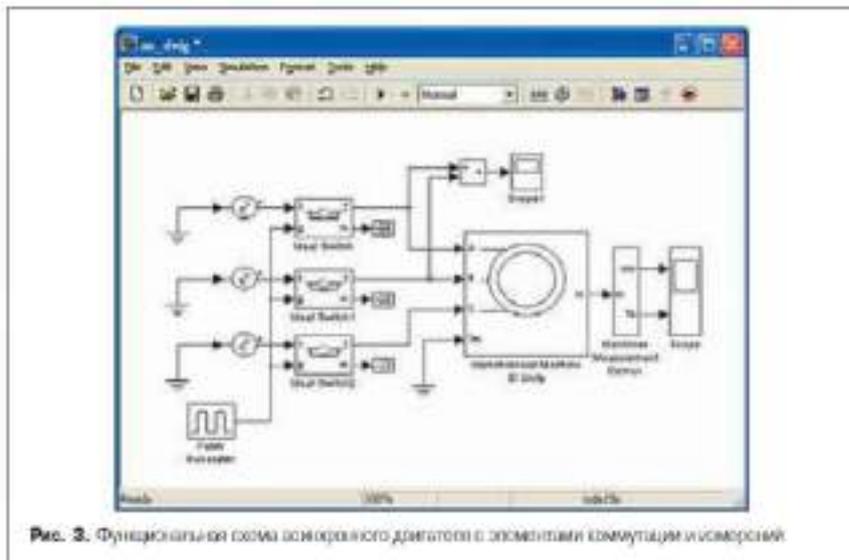


Рис. 3. Функциональная схема асинхронного двигателя с элементами коммутации и измерений

ного двигателя с короткозамкнутым ротором и неподвижной относительно статора системой координат. Используются материалы из книги [1].

Исходные данные для модели: питающее переменное напряжение на каждом источнике 220·sqrt(2) В с частотой переменного тока 50 Гц и фазовым сдвигом -120°, 0° и 120°. У двигателя мощность составляет 3750 VA, а остальные его параметры указаны в окне настройки (рис. 1).

Функциональная схема АД с ключевыми элементами представлена на рис. 3. Она содержит следующие блоки из библиотеки SimPowerSystems: источник переменного напряжения AC Voltage Source (раздел Electrical Sources), асинхронный двигатель Asynchronous Machine SI Units (раздел Machines), блок Machines Measurement Demux (раздел Measurements), идеальный ключ Ideal Switch (раздел Power Electronics), заземление Ground (раздел Connectors). Информационные порты на идеальных ключах заглушены, поскольку они не нужны (подключен Terminator из раздела Sinks библиотеки Simulink) (рис. 3).

Для построения схемы выполняются два окна: окно обозревателя библиотеки Simulink Library Browser кнопкой и окно модели через меню File/New/Model. Располагается окно рядом на рабочем столе. В левой части окна обозревателя следует открыть дерево Simulink, открыть дерево SimPowerSystems и активировать строку дерева Electrical Sources (источники электрической энергии), а затем поочередно все перечисленные выше разделы. Схема собирается по технологии «drag and drop». Для управления ключами используется генератор прямоугольных импульсов Pulse Generator, подключенный к управляющим электродам *g* идеальных ключей.

Настройка схемы заключается в установке уровня напряжений источников, частоты и фазовых сдвигов, а также в выборе параметров АД в соответствии с рис. 1. У генератора Pulse Generator задается амплитуда 1 В, длительности периода 3 с и длительности импульса величиной 50% от длительности

периода. Измерения осуществляются с помощью осциллографов Scope (раздел Sinks библиотеки Simulink), первый из которых подключен к порту *u* блока Machines Measurement Demux, второй — к фазам A и B асинхронного двигателя через измеритель напряжения Voltage Measurement из раздела Measurements (измерительные и контрольные устройства). Все настройки осциллографов были подробно рассмотрены в материалах предыдущих уроков. Модельное время Stop time, равное периоду импульсного сигнала 3 с, и максимальный шаг дискретизации Max step size (методом auto) устанавливаются в меню Simulation/Simulation parameters

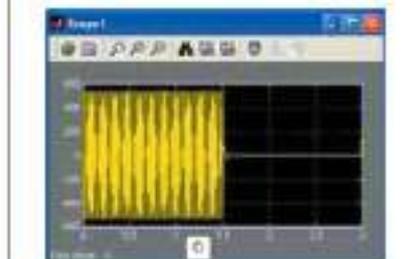
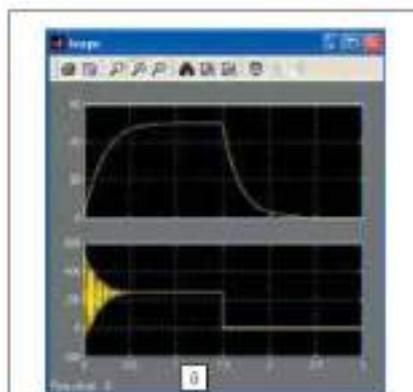


Рис. 4. Временные диаграммы изменения скорости ротора Rotor speed [rpm], электромагнитного момента Electromagnetic torque [Te] (a) и максимального напряжения на обмотке [U_max] (b) асинхронного двигателя

окна модели. Результаты моделирования в виде временных диаграмм представлены на рис. 4. Видно, что в пределах 1,5 с динатель разогнётся, а затем тормозится. Скорость ротора АД при этом нарастает и спадает по экспоненциальному закону.

Анализ динамических свойств преобразователя на основе дифференциальной модели

Дифференциальные модели основываются на одностепенных линейных дифференциальных уравнениях с постоянными коэффициентами. Пусть имеется одностепенный непосредственный преобразователь с выходным

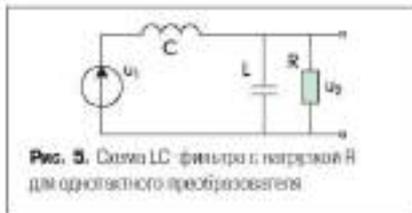


Рис. 5. Схема LC-фильтра с нагрузкой R для одностепенного преобразователя

сглаживающим LC-фильтром, выполненным по Г-образной схеме (рис. 5). Входное напряжение u_1 представляет собой прямоугольные импульсы с заданным коэффициентом заполнения. У выходного напряжения u_2 после фильтрации имеется постоянная составляющая с малыми пульсациями.

Дифференциальное уравнение второго порядка, связывающее напряжения u_1 и u_2 , без учета импульсного характера первого напряжения, можно записать в следующем виде:

$$\frac{d^2 u_2}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_2}{dt} + \frac{1}{LC} u_2 = \frac{1}{LC} u_1$$

или

$$\frac{d^2 u_2}{dt^2} = -\frac{1}{RC} \frac{du_2}{dt} - \frac{1}{LC} u_2 + \frac{1}{LC} u_1 \quad (1)$$

В результате решения дифференциального уравнения (1) необходимо получить u_2 как функцию времени. Для составления структурной схемы решения применим метод понижения порядка производной, реализация которого осуществляется следующим образом.

1. Предположим, в точке A значение второй производной $d^2 u_2/dt^2$ известно в любой момент времени (рис. 6а). В точке B с помощью интегрирования слева и учетом начальных условий определяется значение первой производной du_2/dt . За счет еще одного интегрирования в точке C получается значение искомого функции u_2 .
2. Теперь обратим внимание на правую часть уравнения (1), представляющую собой сумму трех функций времени du_2/dt , u_2 и u_1 , входящих с постоянными коэффициентами. Функция u_1 — возмущающее воздействие, известное по условию задачи. Допустим, что известны функция u_1 в точке C₁ и du_2/dt в точке B₁ (рис. 6б). Находимся их суммой с коэффициентами, соответствующими правой части (1), и получаем вторую производную $d^2 u_2/dt^2$. В результате на выходе сумматора в точке A₁ определяется величина $d^2 u_2/dt^2$, известная в любой момент времени.
3. Уравнение (1), отражающее сущность моделируемого фильтра, должно выполняться в каждый момент времени t. Для реализации этого требования следует замкнуть выходную схему, показанную на рис. 6а и 6б. При этом точки A и A₁, B и B₁, C и C₁ объединяются в пары, что отражает рис. 6в.

При необходимости заданы начальные условия, определяющие единственность решения дифференциального уравнения (1).

Инструментарий Simulink позволяет моделировать и исследовать поведение устройств силовой электроники, описываемых дифференциальными уравнениями с линейными или нелинейными коэффициентами,

используя постоянные или переменные значения. Единственное требование состоит в том, что дифференциальные уравнения должны быть представлены в виде структурной схемы, подобно указанной на рис. 6.

Пример 2. Построить модель для анализа процессов в LC-сглаживающем фильтре.

Исходные данные для модели: входное импульсное напряжение с амплитудой 10 В, частотой 100 кГц и коэффициентом заполнения импульсов 0,5. Сопротивление нагрузки 10 Ом, емкость конденсатора фильтра 20 мкФ и индуктивность дросселя 0,5 мГн.

На рис. 7а представлена модель для решения дифференциального уравнения второго порядка, описывающего связь входного u_1 и выходного u_2 напряжений. Состав блоков, входящих в схему, отражает таблица 1, причем в графе «Параметры» приведены только те параметры, которые изменяются при настройке.

В рассматриваемой модели нами впервые используется блок интегрирования входных сигналов — Integrator (табл. 1). Дадим краткие сведения по некоторым его настройкам в окне задания параметров.

- **External reset (внешний сброс).** Выбирается сигнал для сброса интегратора до начального значения. Выбирается из списка:
 - none — нет (сброс не выполняется);
 - rising — нарастающий сигнал (фронт сигнала);
 - falling — спадающий сигнал (конец сигнала);
 - either — нарастающий или спадающий сигнал;
 - level — нулевой сигнал (сброс осуществляется при сигнале на входе, не равном 0).

Таблица 1

| Ссылка | Блок | Параметры |
|--------------------------|--|--|
| Simulink/Sources | Pulse Generator — генератор прямоугольных импульсов | Amplitude (0 — 1), Period (s) — 0,0001, Pulse Width (0 — 5) |
| Simulink/Math Operations | Gain — умножение Gain1 — параметр 1 Gain2 — параметр 2 | Gain — 1/17 Gain1 — 1/17 Gain2 — 2/17 |
| Simulink/Math Operations | Sum — суммирование | Initial sign — + |
| Simulink/Continuous | Integrator — интегрирование | External reset — none Initial condition — 0 Solve method — 0 |
| Simulink/Sinks | Scope — осциллограф | — |

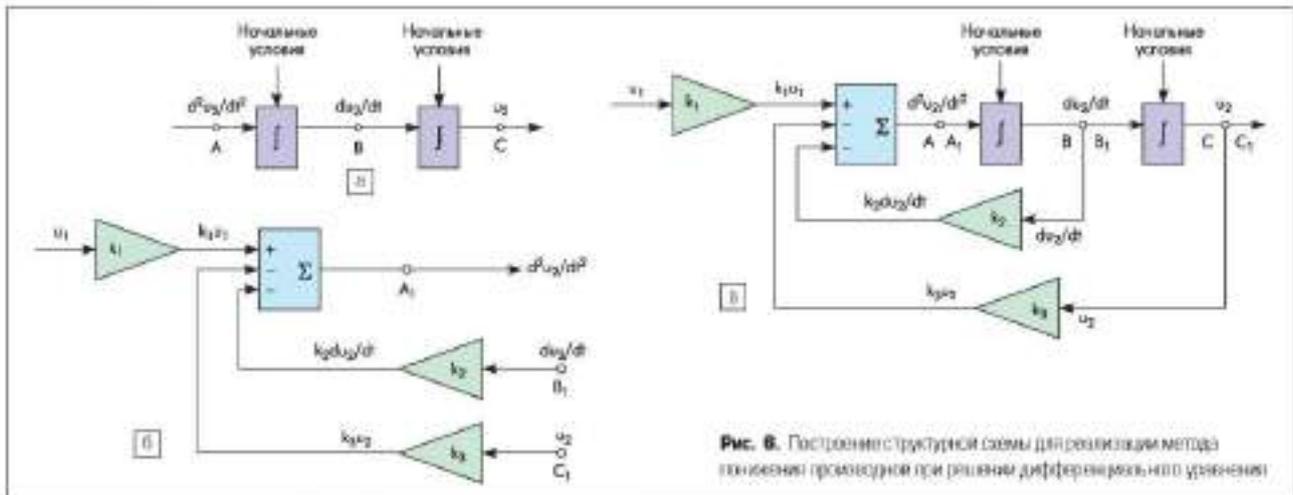


Рис. 6. Построение структурной схемы для реализации метода понижения порядка производной при решении дифференциального уравнения

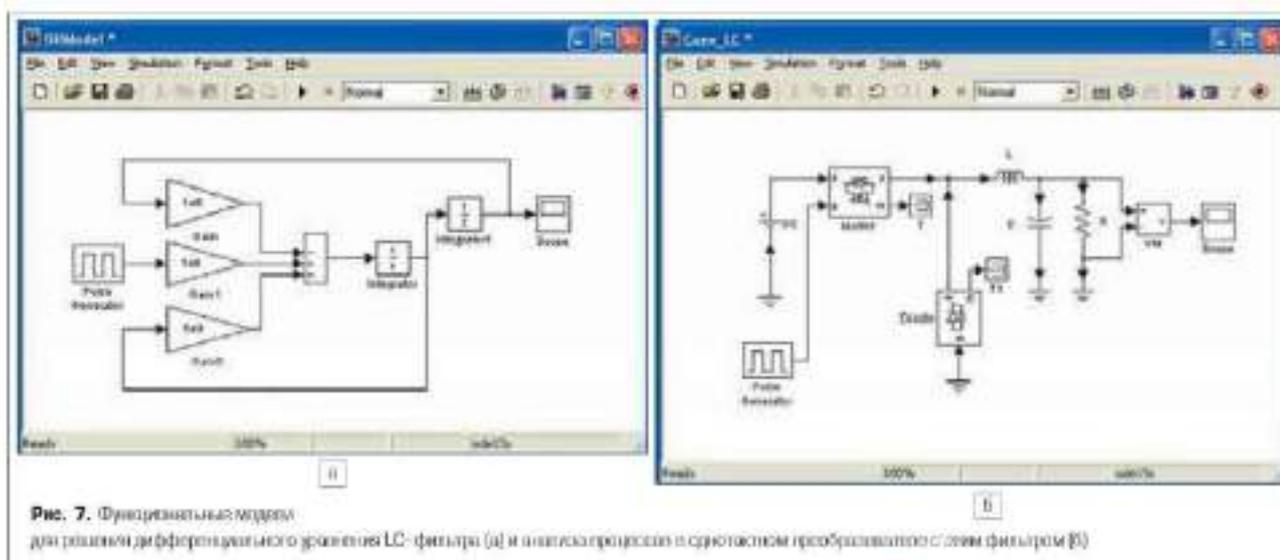


Рис. 7. Функциональная модель для решения дифференциального уравнения LC-фильтра (а) и анализ процесса в структурном преобразователе с цепи фильтром (б)

Таблица 2

| Ссылка | Элемент | Параметры |
|-----------------------------------|---|---|
| Simulink/Sources | Pulse Generator — генератор импульсного сигнала | Amplitude (V) = 1, Period (μs) = 50000, Pulse Width (μs) = 50 |
| SimPowerSystems/DC Power Sources | DC Voltage Source — источник постоянного напряжения | Amplitude (V) = 10 |
| SimPowerSystems/Power Electronics | Mosfet — транзистор Mosfet | Параметры без изменений |
| SimPowerSystems/Power Electronics | Diode — диод | Параметры без изменений |
| Simulink/Sinks | Terminator — элемент для формирования портового сигнала | — |
| SimPowerSystems/Elements | Series RLC Branch — последовательная цепочка RLC-элементов Resistance Inductance Capacitance | 10 Ohm, 100 μH, 1.5 nF, 1 μF, 0.1 μF, 10 μF, 1 μF, 1 μF |
| SimPowerSystems/Measurements | Voltage Measurement — измеритель напряжения | — |
| Simulink/Sinks | Scope — осциллограф | — |

- **initial condition value** [исходные значения начального значения выходного сигнала]:
 - *internal* — внутренний;
 - *external* — внешний (используется дополнительная вход, на который необходимо подать сигнал, задающий начальное значение).
- **initial condition** [начальные условия] — установка начального значения выходного сигнала интегратора. Параметр доступен при выбранном *internal*.

Время моделирования в рассматриваемой модели *Stop time* выбрано 0,002, а максимальной шаг дискретизации *Max step size* установлен auto. Эти параметры установлены в меню *Simulation/Simulation parameters* окна модели. Процесс нарастания выходного напряжения LC-фильтра при нулевых начальных условиях отражает временная диаграмма, полученная после запуска модели решения дифференциального уравнения (рис. 8а).

Далее строится функциональная модель однофазного преобразователя с LC-фильтром, имеющего те же самые значения параметров. Эта схема представлена на рис. 7б и содержит кроме фильтра источник питания и два ключевых элемента (транзистор и диод), работающих в противофазе. Основные параметры блок-схемы сведены в таблицу 2.

Время моделирования и шаг дискретизации остаются такими же, как и при решении диф-

ференциального уравнения. Временная диаграмма процесса нарастания выходного напряжения представлена на рис. 8б. Обе сравниваемые временные диаграммы (рис. 8) аналогичны. Однако следует отметить, что во втором случае выброс (перерегулирование) напряжения меньше. Также ниже по уровню постоянная составляющая напряжения после окончания переходного процесса. Это обусловлено наличием напряжения отпирания с величиной 0,8 В у обратного диода. При нулевом значении этого напряжения анализируемые кривые переходных процессов полностью совпадают.

Теперь следует рассмотреть переходные процессы в преобразователе при скачкообразном изменении сопротивления нагрузки. Для этого используется функциональная модель преобразователя, рассмотренная выше и представленная на рис. 7б. Для установки начальных условий используется команда *powerinit*. Ниже приводятся основные варианты применения этой команды.

Powerinit — инициализация SPS-модели
Назначение: задание начальных условий.
Синтаксис:

- **powerinit('sys', 'look')** — вызывается начальное значение переменных модели *sys*.
- **powerinit('sys', 'reset')** — устанавливаются нулевые начальные значения переменных модели *sys*.

- **powerinit('sys', 'steady')** — устанавливаются начальные значения переменных модели *sys* таким образом, чтобы расчет начался из точки установившегося режима.
 - **powerinit('sys', 'set', p)** — устанавливаются начальные значения переменных модели *sys*, заданные вектором *p*. Порядок следования переменных можно определить командой, записываемой как **powerinit('sys', 'look')**.
 - **powerinit('sys', 'init', state, value)** — устанавливает начальное значение *value* переменной *state* модели *sys*.
- Вернемся к рассматриваемому примеру 2. Запускается функциональная модель с клю-

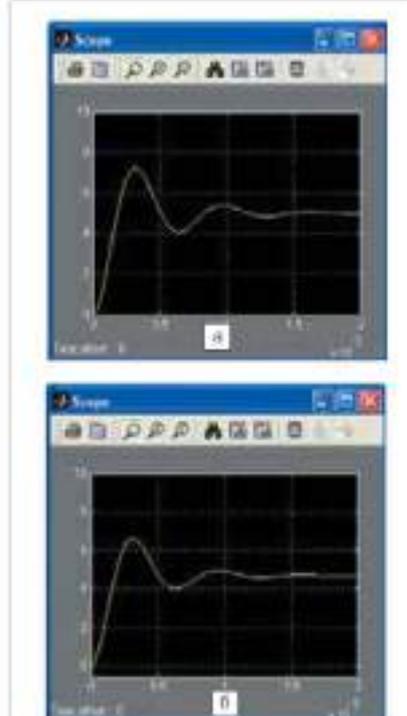


Рис. 8. Временные диаграммы выходного напряжения, полученные из функциональной модели фильтра (а) и структурного преобразователя (б)

ченными элементами. По окончании модельного времени определяются начальные условия с помощью набора команд в командном окне модели для функциональной модели, имеющей название Conv_LC:

```
powerlib>>Conv_LC>>IC1
```

Получаемый ответ:

```
Current value of total state
Uc_LC = 5.5116e-006
ILC = 0
Uc_number_Diode = 1.1162e+13
Uc_number_Mosfet = 10
```

С помощью другой команды

```
powerlib>>Conv_LC>>IC1>>IC1
```

вводится начальное значение напряжения на конденсаторе фильтра, равное 5 В, при том же нулевом токе индуктивности. Временная диаграмма нового процесса после запуска (рис. 9) показывает, что выходное напряжение в момент пуска составляет 5 В. Затем происходит провал, поскольку происходит только разряд (практически без заряда) конденсатора из-за нулевого начального тока индуктивности. После окончания процесса нарастания тока в процессе происходит заряд конденсатора, и напряжение на нем становится постоянным по уровню.

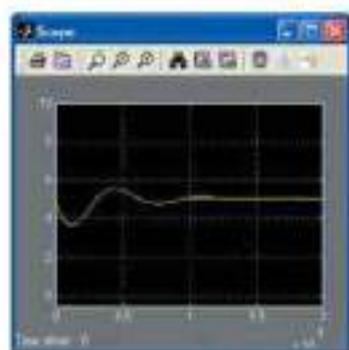


Рис. 9. Временная диаграмма процесса изменения выходного напряжения при пуске нагрузки (результат копирования в ячейку)

Анализ динамического режима преобразователя с общей отрицательной обратной связью

Наиболее сложным при создании функциональной модели стабилизированного преобразователя напряжения является построение контура обратной связи. Выходное напряжение преобразователя регулируется за счет широко-импульсной модуляции пускующего напряжения, поступающего на вход LC-фильтра, то есть изменением относительного угла модуляции (коэффициента заполнения импульсов в пределах периода преобразования). При этом угол модуляции θ имеет ограничения, а именно $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \leq \pi$. Эти ограничения говорят, что угол модуляции может быть близким к 0 (выходное напряжение име-

ет нулевой уровень) или к π (выходное напряжение равняется входному).

Таким образом, на вход фильтра поступают импульсы с амплитудой, равной входному напряжению, а их длительность T (T — период коммутации ключей) определяется сигналом управления. Граничные значения угла модуляции θ_{\min} и θ_{\max} задают допустимый диапазон изменения этого параметра, связанного с возможностями контура обратной связи. Зависимость угла модуляции от выходного напряжения, определяющего сигнал управления, можно задать следующим образом:

$$\theta = \begin{cases} \theta_N + k(u_{2N} - u_2); & \text{при } u_{2\min} \leq u_2 \leq u_{2\max} \\ \theta_{\min}; & \text{при } u_2 < u_{2\min} \\ \theta_{\max}; & \text{при } u_2 > u_{2\max} \end{cases},$$

где θ_N — номинальное значение угла модуляции при нулевом сигнале ошибки; k — коэффициент передачи сигнала обратной связи; u_{2N} — номинальное значение выходного напряжения; $u_{2\min}$ и $u_{2\max}$ — граничные значения выходного напряжения, при которых $\theta = \theta_{\min}$ и $\theta = \theta_{\max}$ соответственно. Эти граничные значения определяются как $u_{2\max} = u_{2N} + (\theta_N - \theta_{\min})/k$ и $u_{2\min} = u_{2N} - (\theta_N - \theta_{\max})/k$.

С учетом этих выражений строится функциональная модель преобразователя с контуром обратной связи. При построении относительно сложной модели используется подсистема, включающая в себя некоторую часть блоков, что позволяет существенно упростить конфигурацию модели. Для создания подсистемы возможны два подхода. Первый состоит в выделении в S-модели или SPS-мо-

дели тех элементов, которые войдут в подсистему. Для этого их распознают так, чтобы выделить в подсистему только нужные блоки. Затем с помощью ЛКМ и динамической рамки выделяют требуемую часть схемы и через меню окна модели Edit/Create subsystem формируют подсистему. Второй подход заключается в использовании специального блока Subsystem (подсистема) из библиотеки Simulink (раздел Ports and Subsystem). Этот блок перемещается по плану созданных окон, открывается двойным нажатием ЛКМ, и в окне подсистемы собирается требуемая схема. После построения подсистема сохраняется командой File/Save as...

На рис. 10а приведен функциональная модель преобразователя с обратной связью под именем Conv_OS. Ее основные блоки за исключением подсистемы приведены в таблице 3.

Созданная подсистема Conv_OS/Subsystem (рис. 10б) содержит блоки, сгруппированные в таблице 4.

У подсистемы имеется один входной порт In, предназначенный для подачи в контур обратной связи сигнала в виде выходного напряжения u_2 . Поскольку этот контур построен из блоков библиотеки Simulink (рис. 10б), а силовой блок (рис. 10а) выполнен из блоков SimPowerSystems, то сигнал подается через измеритель напряжения. В то же время имеется три выходных порта, из которых только через Out1 подается сигнал управления на транзисторный ключ, определяющий характер изменения угла модуляции в процессе запуска преобразователя.

В функциональной модели контура обратной связи осуществляется сравнение выходного напряжения u_2 с опорным напряжением 5 В

Таблица 3

| Имя блока | Описание | Параметры |
|------------------------------------|--|--|
| SimPowerSystems/Electrical Sources | DC Voltage Source — источник постоянного напряжения | Amplitude (V) = 11 |
| SimPowerSystems/Power Electronics | Mosfet — транзистор MOSFET | Параметры MOSFET |
| SimPowerSystems/Power Electronics | Diode — диод | Параметры Diode |
| Simulink/Sinks | Terminator — нагрузка для формирования выходного сигнала преобразователя в диод | - |
| SimPowerSystems/Elements | Series RLC Branch — последовательное соединение RLC-элементов Resistor Inductance Capacitance | TC, Cu, L, R, C, mH, (0.5 A), R=0, C=0, (20 m), R=0, L=0 |
| SimPowerSystems/Measurements | Voltage Measurement — измеритель напряжения | - |
| Simulink/Sinks | Scope, Scope1, Scope2, — осциллограф | - |
| Simulink/Signal Routing | Max — выделение максимального значения сигнала | Number of inputs = 2 |

Таблица 4

| Имя блока | Описание | Параметры |
|--------------------------|---|--|
| Simulink/Sources | Expanding Sequence — генератор расширяющейся последовательности | Final value = [1 2.04] * 10^6 Output value = [0.05 0.5] |
| Simulink/Math Operations | Gain — коэффициент | Gain = 10 |
| Simulink/Math Operations | Sum — сумматор | In 1 (sign) = + |
| Simulink/Math Operations | Relational operator — оператор сравнения | Relational operator = > |
| Simulink/Signal Routing | Max — выделение максимального значения сигнала | Number of inputs = 2 |
| Simulink/Discontinuities | Saturation — ограничение | Upper limit = 0.49 Lower limit = 0.49 |
| Simulink/Sources | Constant — генератор постоянного сигнала | Constant value = 5 Constant data = 0.5 |
| Simulink/Sources | In — входной порт подсистемы | - |
| Simulink/Sinks | Out — выходной порт подсистемы | - |

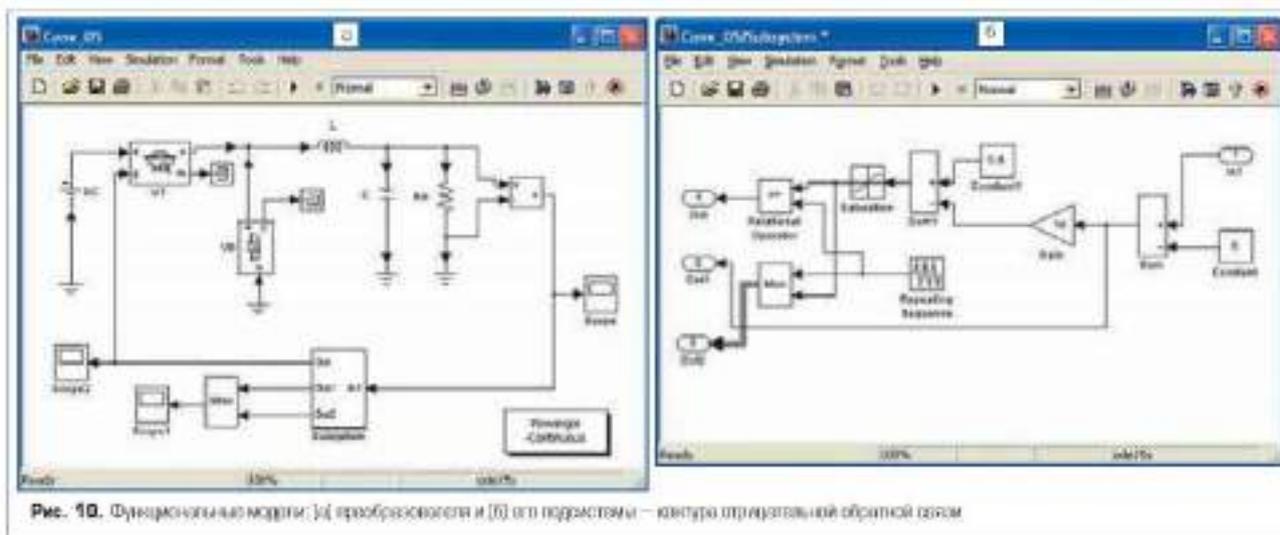


Рис. 10. Функциональные модели: (а) преобразователя и (б) его подсистемы – контур отрицательной обратной связи

с помощью сумматора Sum. Сигнал рассогласования усиливается Gain (коэффициент передачи k канала обратной связи), что позволяет получить требуемое приращение угла модуляции, добавившее алгебраически (с учетом знака) к его номинальному значению $\Phi_{\Sigma} = 0.5$ с помощью сумматора Sum1. Ограничения изменений угла модуляции относительно Φ_{Σ} задаются блоком Saturation. Формируется ШИМ-сигнал для управления транзисторным ключом путем сравнения блоком Relational operator (появляет моменты превышения или равенства) полученного приращения угла модуляции с линейно изменяющимся сигналом на выходе генератора Repeating Sequence треугольных импульсов. Задается форма импульсов на выходе этого генератора путем определения моментов пересечения нуля или достижения максимального (минимального) значения. У генератора устанавливается один период сигнала. Все установки указаны в таблице 4.

Для вывода данных из процесса запуска используются мультиметры Mix. Так, в подсистеме на осциллограф подаются треугольные импульсы генератора и угол модуляции, измененный относительно номинального значения. В силовом блоке формируется сигнал рассогласования u_c с опорным напряжением и сигнал управления транзистором.

Кроме того, осциллографы применяются для получения временных диаграмм, отражающих изменения напряжения u_c и импульсов для управления транзисторным ключом. Время моделирования Stop time выбрано 156e-6, а максимальной шаг дискретизации Max step size выставлен в 0.2e-7. Эти параметры установлены в меню Simulation/Simulation parameters окна модели.

После построения модели, настройки ее блоков и запуска получены временные диаграммы (рис. 11). Особый интерес представляет изменение угла модуляции (рис. 11б), который достигает максимального или минимального значений, а при постепенном уменьшении сигнала рассогласования величина диапазона изменения угла модуляции становится меньше, что приводит к снижению пульсировющей составляющей выходного напряжения на рис. 11а. Если увеличить коэффициент передачи канала обратной связи, то получается изменение угла модуляции между предельными значениями, а затухание его отсутствует. В итоге произойдет возрастание пульсаций u_c . Предлагаем читателю самому попробовать ввести различные значения указанного коэффициента передачи, амплитуды треугольных импульсов с генератора, границ насыщения в блоке Saturation, а затем наблюдать характер изменений временных диаграмм.

Работа рассматриваемой модели сопровождается комментариями в командном окне в виде:

Warning: Block diagram 'Conv_OS' contains 1 algebraic loop(s).

(Внимание: блок-диаграмм 'Conv_OS' имеет 1 алгебраический контур (петлю).)

Этот контур означает наличие такой ситуации, когда входная переменная какого-либо блока является алгебраической функцией выходной переменной того же блока. В результате заведется процесс вычисления. Устранение указанного явления можно обеспечить введением элемента задержки на один шаг дискретизации. Например, возможно применение блока Memory из раздела Discrete библиотеки Simulink. Использование такого блока в подсистеме модели преобразователя (рис. 12) устраняет негативное влияние алгебраического контура.

Теперь рассмотрим применение Powergui для установки начальных условий. Раскрывается этот графический интерфейс Powergui в указателе библиотеки Simulink Library Browser в разделе SimPowerSystems при однократном щелчке левой кнопкой мыши на указатель этого дерева. Пиктограмму блока перетаскивают в окно модели (рис. 10а, справа внизу). Начнем с рассмотрения параметров этого интерфейса.

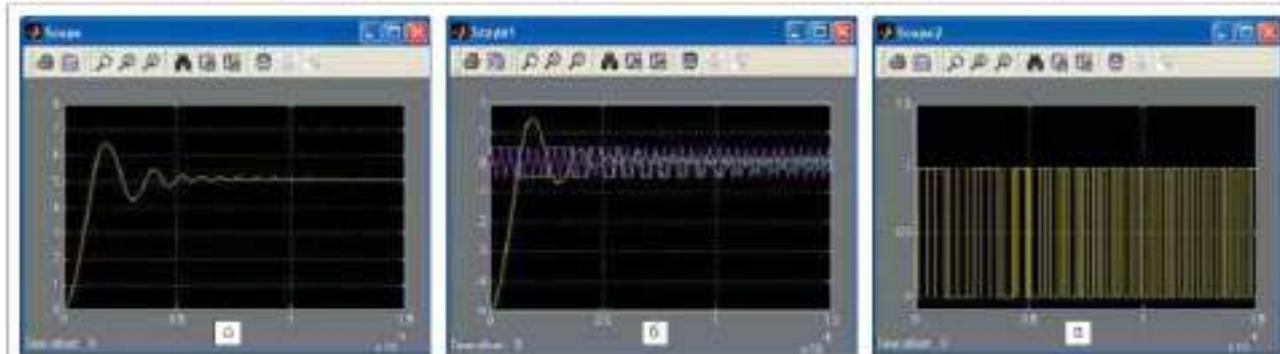


Рис. 11. Временные диаграммы выходного напряжения преобразователя (а), сигнала рассогласования (желтый), угла модуляции (голубой), треугольные импульсы генератора (розовый) (б) и импульсы управления транзисторным ключом (в)

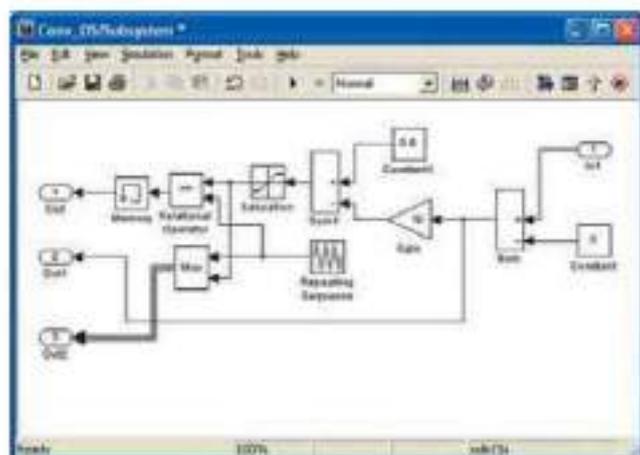


Рис. 12. Функциональная модель контура обратной связи преобразователя с элементами задержки — блоком Memory

Powergui — графический интерфейс пользователя



Назначение: блок является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение следующих задач:

- расчет схемы комплексным методом;
 - расчет установившегося режима;
 - дискретизация модели;
 - задание начальных условий;
 - инициализация трехфазных схем, содержащих электрические машины, таким образом, чтобы расчет шло бы с установившегося режима;
 - анализ схем с помощью инструмента Simulink LTI-Viewer;
 - определение полного сопротивления (импеданса) цепи;
 - выполнение гармонического анализа;
 - создание отчета;
 - создание файла характеристик намагничивания для внешнего трансформатора.
- Окно задания параметров представлено на рис. 13а.

Параметры блока

- Hide messages during analysis — скрывать сообщения при проведении анализа. При установленном флажке подавляется вывод сообщений в командном окне MATLAB при выполнении расчетов.
- Run in simulation — расчет схемы комплексным методом. При установленном флажке выполняется расчет схемы комплексным методом. При этом необходимо задать частоту источников в графе Frequency.
- Frequency (Hz) — частота (Гц). Частота сигналов источников при расчете схемы комплексным методом. При других видах анализа параметр недоступен.
- Discretize electrical model — дискретизация модели. При установленном флажке выполняется дискретизация модели. При этом необходимо задать шаг дискретизации в графе Sample time.

- Sample time (s) — шаг дискретизации. Параметр доступен, если задан режим дискретизации модели. При этом на пиктограмме блока будет показана величина этого параметра.
- Steady-State Voltages and Currents — установившиеся значения напряжений и токов. Расчет установившихся значений переменных. При нажатии на кнопку открывается окно с соответствующими значениями.
- Initial state Setting — установка начальных значений. При нажатии на кнопку открывается этот экран, в котором отображаются начальные значения переменных. Эти значения можно изменить. Новые значения используются при расчете переходных процессов.
- Load Flow and Machine Initialization — инициализация схем, содержащих электрические машины.
- Use LTI Viewer — использование LTI Viewer. Применение инструмента Simulink LTI Viewer для анализа схемы.
- Impedance in Frequency Measurements — определение импеданса цепи.
- FFT Analysis — гармонический анализ.
- Generate Report — создание отчета.

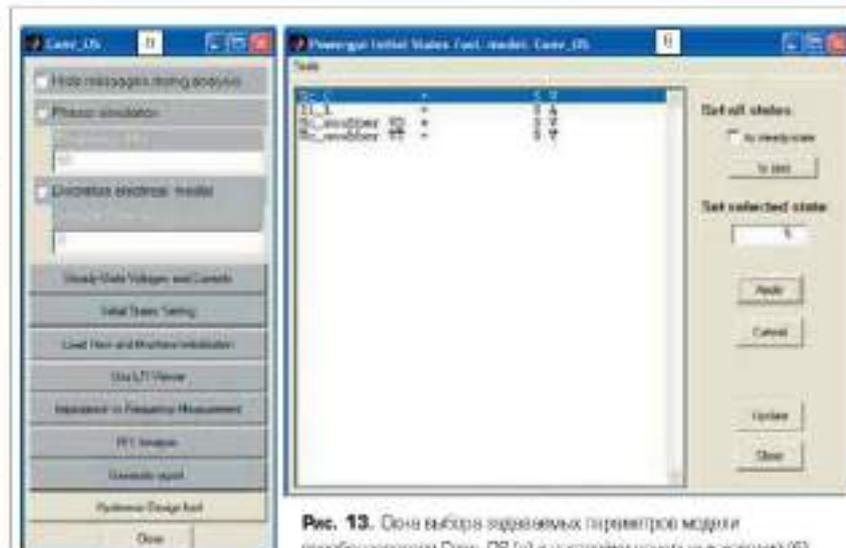


Рис. 13. Окно выбора заданных параметров модели преобразователя Conv_DS (а) и настройки начальных условий (б)

● Hysteresis Design Tool — инструмент расчета характеристики намагничивания.

Кнопкой Initial states Setting (рис. 13б) выполняется окно настройки Powergui Initial states Setting, в котором указаны все реактивные элементы (рис. 13б). После выбора требуемого элемента устанавливается начальное значение напряжения (тока). В качестве примера приведено начальное значение напряжения $U_{C,C}$ на конденсаторе C, имеющее емкость 5 В. В этом случае после запуска модели получения временная диаграмма выходного напряжения, аналогичная временной диаграмме на рис. 9.

Анализ динамических режимов преобразователя и двигателя с аналоговыми и дискретными регуляторами

Цифровая система автоматического управления электроприводом содержит микропроцессорный (цифровой) регулятор, силовой преобразователь с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) для управления исполнительным двигателем, а также сам двигатель с нагрузкой. Сигнал на входе цифровой части представляет собой ступенчатое напряжение, характер изменения которого в двигательной мере зависит от шага дискретизации T_d . При относительно малом шаге дискретизации система считается непрерывной.

Довольно часто непрерывная часть электропривода описывается передаточной функцией вида:

$$W(s) = \frac{1}{T_d s (T_0 s + 1)}$$

Заданым постоянным времени следующие значения: $T_1 = 1$ с и $T_0 = 0,1$ с. Построим функциональную модель системы с аналоговой и цифровой частями и сравним их динамические режимы [2]. У функциональной схемы (рис. 14а) основные блоки сведены в таблице 5.

В рассматриваемой схеме используются новые блоки. Это генератор ступенчатого сигнала Step, формирующий единичный сигнал. У него достаточно установить только конче-

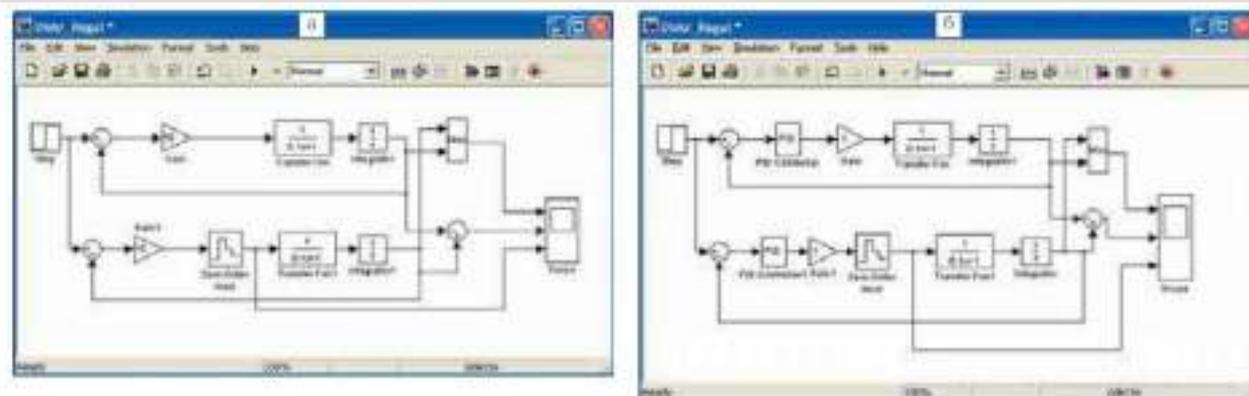


Рис. 14. Функциональная модель системы с непрерывным и цифровым управлением (а) и PD-регулятором (б)

Таблица 5

| Библиотека | Блок | Параметры |
|--------------------------|---|--|
| Simulink/Sources | Step — генератор ступенчатого сигнала | Final value — 1 |
| Simulink/Math Operations | Gain — коэффициент усиления | Gain — 30 Gain — 30 |
| Simulink/Math Operations | Samp — шаг дискретизации | Initial value — 0 |
| Simulink/Signals Routing | Sum — суммирование | Number of inputs — 2 |
| Simulink/Discrete | Zero-Order Hold — экстраполирует сигнал | Sample time — 0,1 |
| Simulink/Continuous | Integrator — интегратор | - |
| Simulink/Continuous | Transfer Fun — передаточная функция | Numerator — [1] Denominator — [0,1] |
| Simulink/Sinks | Scope — осциллограф | - |

ное значение выходного сигнала (см. табл. 5), равное 1. Другой блок — экстраполиатор нулевого порядка Zero-Order Hold — формирует дискретный сигнал. Единственная установка блока — шаг дискретизации Sample time, который первоначально задан равным 0,1. Передаточная функция Transfer Fun содержит числитель Numerator и знаменатель Denominator, которые задаются в окне параметров в виде векторов коэффициентов полиномов, начиная с коэффициента при s^0 наибольшим показателем степени. Результат настройки мы увидим в гистограмме блока (рис. 14а). В блоке интегрирования Integrator в рассмотренном примере никаких настроек не требуется. Настройка осциллографа Scope мы увидим ниже неоднократно в предыдущих уроках и здесь не приводится.

После запуска модели получены временные диаграммы процессов (рис. 15а). Первая из них отражает характер изменения сигнала на выходе аналогового (фиолетовый цвет) и дискретного (желтый цвет) каналов, вторая — разность между двумя предыдущими сигналами (абсолютная погрешность, изменяющаяся во времени), третья — сигнал управления после экстраполиатора. Видно, что погрешность достигает 30%. Если у экстраполиатора уменьшить шаг дискретизации до 0,01, то погрешность снизится до 3%.

Введем в анализируемую модель ПИД-регулятор. Этот блок находится в библиотеке Simulink Library Browser. С помощью правой кнопки мыши на строке Simulink появится окно Library: Simulink, в котором надо открыть последовательно папки Blocksets & Toolboxes / Simulink Extras / Additional Linear. Из последнего подраздела библиотеки выделяется блок PID Controller в двух экземплярах и помещается в оба кана-

ла анализируемой системы (рис. 14б). В этом блоке имеется три настройки — Proportional (пропорциональное регулирование), Integral (интегральная составляющая регулирования), Derivative (дифференциальная составляющая регулирования). Для начала установим первую составляющую 10, вторую 0 и третью 0,8. Шаг дискретизации заддим 0,1. Усилители

оставлены для возможного изменения коэффициентов передаточных каналов. Пока они (коэффициенты) равны 1.

После запуска получим временные диаграммы с другими значениями динамических показателей (рис. 15б). При этом переходный процесс стал аperiodическим, погрешность рассогласования уменьшилась с 30% до 18%, время переходного процесса сократилось более чем в 2 раза (сравните с рис. 15а). Читателю предлагается самому поэкспериментировать с выбором различных соотношений коэффициентов ПИД-регулятора и провести анализ изменений динамических параметров.

Подведем итоги урока 4.

1. С помощью блоков библиотеки Simulink и SimPowerSystems имеется возможность анализа динамических режимов устройств силовой электроники путем:

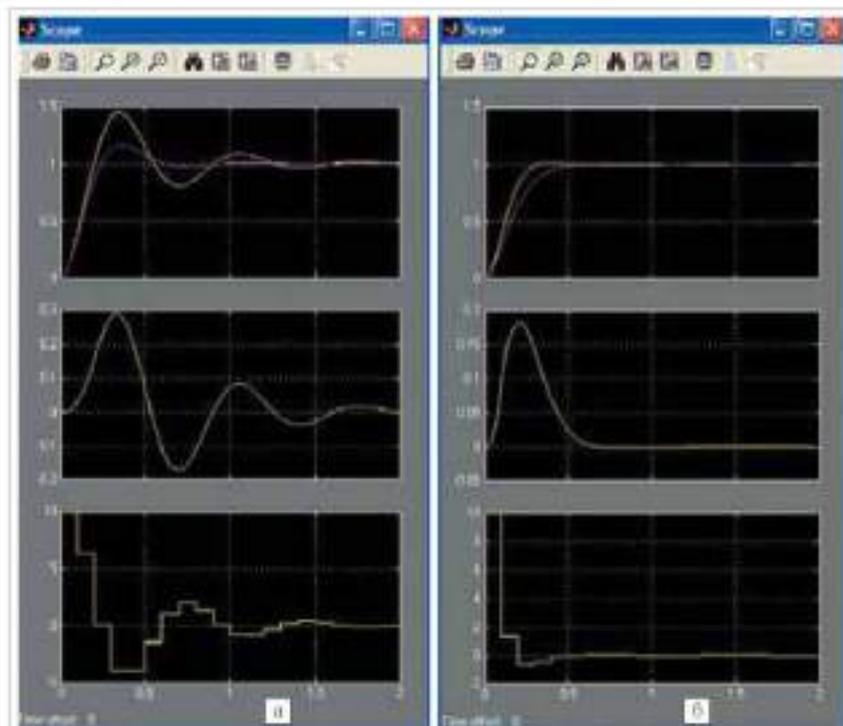


Рис. 15. Временные диаграммы процессов и функции выходов системы с аналоговым и цифровым управлением (а) и PD-регулятором (б)

- получение переменной режима у функциональных моделей, собранных из виртуальных элементов;
 - решения дифференциальных уравнений, описывающих процессы в анализируемой системе, с помощью функциональной модели;
 - подача стандартного воздействия на вход объекта, описываемого передаточными функциями для отдельных подсистем или системы в целом.
2. Имеющиеся в библиотеке виртуальные модели различного типа электродвигателей применимы для анализа процессов их запуска-торможения.
 3. Метод понижения порядка проводных с помощью интеграторов может использоваться для решения дифференциальных уравнений с нулевыми и ненулевыми начальными условиями при моделировании устройств силовой электроники.
 4. Совместное применение виртуальных элементов силового блока из *SimPowerSystems* и функциональных элементов блока управления из *Simulink* дает возможность моделирования устройств силовой электроники с двусторонней обратной связью и анализа их динамики.
 5. Начальные условия в функциональных моделях можно устанавливать либо с помощью команды `powerinit`, либо с помощью графического интерфейса пользователя *Powergui*.
 6. Изменение динамических свойств устройств и систем осуществляется путем применения ПИД-регулятора и выбора уставок, определяющих вклад в сигнал регулирования пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. 

Литература

1. Черных И. В. Полезные мелочи // *Exponenta PRO. Математика в приложениях*. 2003. № 4.
2. Герман-Талкин С. Г., Крестенко В. В. Синтез цифрового регулятора подчиненной структуры электропривода в пакете *Simulink* // *Exponenta PRO. Математика в приложениях*. 2004. № 2.

Лабораторная работа №11

Моделирование многоканальных разомкнутых СМО с простейшими потоками заявок

Цель: изучение способов и приобретение практических навыков моделирования многоканальных разомкнутых СМО с простейшими потоками.

Ход работы:

1. Изучить рассматриваемые в лабораторной работе способы моделирования многоканальных разомкнутых СМО с простейшими потоками.
2. Получить вариант задания у преподавателя для выполнения практического задания. По номеру полученного варианта из Таблицы 4.2 выбрать определённые значения:
 - интервал времени поступления заявок;
 - интервал времени выполнения заявок.
3. Исходя из условий задачи, представленных в примере 4.1 необходимо подставить полученные данные и выполнить:
 - Решение задачи аналитическим методом как это показано в примере. Получить результаты эксперимента.
 - Решение задачи имитационным методом как это показано в примере. Получить результаты эксперимента.
4. Сравнить результаты решения задачи аналитическим и имитационным методами
5. Подготовить отчет о работе с представлением и объяснением полученных результатов. Содержание отчёта:
 - Цель лабораторной работы
 - Ход выполнения заданий по варианту.
 - Выводы по результатам проделанной работы.

Постановка задачи

Задана многоканальная разомкнутая система массового обслуживания с неограниченным временем ожидания и с простейшими потоками, которая наиболее соответствует действительности. Система характеризуется следующими особенностями:

- поступление заявок в систему на обслуживание происходит по одному, то есть вероятность поступления двух и более заявок в один момент времени очень мала, и ею можно пренебречь (поток заявок ординарный);
- вероятность поступления последующих заявок в любой момент времени не зависит от вероятности их поступления в предыдущие моменты - поток заявок без последствия;
- поток заявок стационарный.

Формализация задачи

Функционирование многоканальной разомкнутой системы массового обслуживания можно описать через все возможные ее состояния и через интенсивность перехода из одного состояния в другое.

Основными параметрами функционирования СМО являются вероятности состояния системы, то есть возможность наличия n заявок (покупателей, рабочих, заданий, машин, неполадок) в системе – P_n . Так, вероятность P_0 характеризует состояние, когда в системе нет заявок и канал обслуживания простаивает, P_1 - когда в системе находится только одна заявка, и т.д.

Важными параметрами функционирования системы массового обслуживания являются также среднее число заявок, находящихся в системе, то есть в очереди и на обслуживании, - $N_{\text{сyst}}$ и средняя длина очереди - $N_{\text{оч}}$. Исходными параметрами, характеризующими систему массового обслуживания, являются:

- число каналов обслуживания (касс, компьютеров, подъемных кранов, ремонтных бригад) - N ;
- интенсивность поступления одной заявки на обслуживание, то есть

число поступлений заявок в единицу времени - λ ;

- интенсивность обслуживания заявок - μ .

Интенсивность поступления заявок на обслуживание определяется как величина, обратная среднему времени между поступлениями двух смежных заявок, - t_p :

$$\lambda = \frac{1}{t_p}$$

Интенсивность обслуживания заявок определяется как величина, обратная времени обслуживания одной заявки, - t_o :

$$\mu = \frac{1}{t_o}$$

Решение задачи аналитическим методом

Решая задачу аналитическим методом представим все возможные состояния системы массового обслуживания в виде размеченного графа состояний (рис. 4.1). Каждый прямоугольник графа определяет одно из всех возможных состояний, количественно оцениваемое вероятностью состояний P_n . P_n - это возможность наличия в системе n заявок. Стрелки на графе указывают, в какое состояние система может перейти и с какой интенсивностью. При этом в многоканальной СМО необходимо различать два случая:

- число заявок n , поступивших в систему, меньше количества каналов обслуживания N , то есть все они находятся на обслуживании ($0 < n < N$);
- число заявок n поступивших в систему, больше или равно числу каналов обслуживания N ($N \leq n$), то есть N заявок обслуживаются, а остальные r ожидают в очереди ($r = 1, 2, \dots, n - N$).

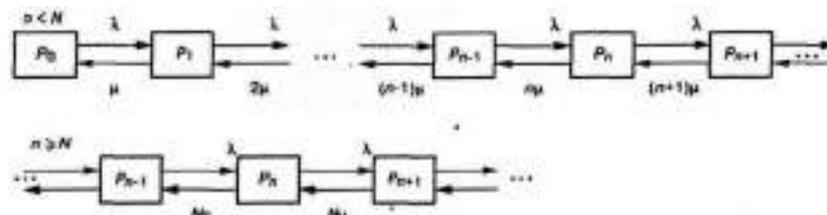


Рис. 4.1. Размеченный граф состояний многоканальной разомкнутой СМО с простейшими потоками

Первый прямоугольник с вероятностью P_0 определяет состояние системы массового обслуживания, при котором все каналы обслуживания простаивают из-за отсутствия заявок в ней. Из этого положения СМО может перейти только в состояние P_1 , и тогда в ней появится одно заявок, так как входной поток заявок ординарный. С интенсивностью μ система может перейти также из состояния P_1 в состояние P_0 , если единственная заявка, находившаяся в системе, была обслужена раньше, чем появилась новая, и т.д.

Режим работы СМО примем с постоянными характеристиками во времени. Тогда интенсивности входных и выходных потоков для каждого состояния будут сбалансированы. Эти балансы выглядят следующим образом.

Если $0 \leq n \leq N$, то

$$P_0 \times \lambda = P_1 \times \mu;$$

$$P_1 \times (\mu + \lambda) = P_0 \times \lambda + P_2 \times \mu;$$

$$P_2 \times (\mu + \lambda) = P_1 \times \lambda + P_3 \times \mu;$$

...

$$P_n \times (\mu + \lambda) = P_{n-1} \times \lambda + P_{n+1} \times \mu;$$

...

Если $N \leq n \leq \infty$, то

$$P_n \times (N \times \mu + \lambda) = P_{n-1} \times \lambda + P_{n+1} \times N \times \mu$$

Обозначим величину ψ и назовем ее коэффициентом загрузки

Рассмотрим сначала первый случай, когда $0 \leq n \leq N$

Из первого уравнения можно найти значение:

$$P_1 = P_0 \times \frac{\lambda}{\mu} = P_0 \times \psi$$

Из второго уравнения найдем значение ψ

$$P_2 = \frac{P_1}{2} + P_1 \times \frac{\lambda}{2\mu} - P_0 \times \frac{\lambda}{2\mu}$$

Но первый член: $P_1 = P_0 \times \frac{\lambda}{\mu}$

Следовательно, первый и третий сокращаются:

$$P_2 = P_1 \times \frac{\lambda}{\mu} = P_0 \times \frac{\psi^2}{2}$$

Из третьего уравнения найдем значение P_3

$$P_3 = P_2 \times \frac{2}{3} + P_2 \times \frac{\lambda}{3\mu} - P_1 \times \frac{\lambda}{3\mu}$$

Но первый член равен: $P_2 = P_1 \times \frac{\lambda}{2\mu}$

Следовательно, первый и третий сокращаются:

$$P_3 = P_2 \times \frac{\lambda}{3\mu} = P_0 \times \frac{\psi^3}{1 \times 2 \times 3}$$

Аналогичные выражения можно получить и для других вероятностей состояний. Анализируя полученные выражения, вычисляем рекуррентное выражение для определения вероятности состояния системы, когда число заявок, находящихся в системе, n , меньше числа каналов обслуживания, N :

$$P'_n = P_{n-1} \times \frac{\lambda}{n \times \mu} = P_0 \times \frac{\psi^n}{1 \times 2 \times 3 \times \dots n}$$

$$P'_n = P_0 \times \frac{\psi^n}{n!}$$

Рассмотрим теперь второй случай, когда $N < n < \infty$. В этой ситуации рекуррентное выражение для определения вероятности состояния системы будет записано в таком виде:

$$P'_n = P_0 \times \frac{\psi^n}{N! \times N^{n-N}}$$

Используя очевидное равенство

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$$

$$P_0 = \left(1 + \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\psi^n}{n!} + \sum_{n=N}^{\infty} \frac{\psi^n}{(N!N^{n-N})} \right)^{-1}$$

Пример 4.1

Допустим, что наша система имеет два канала обслуживания: $N=2$. Интервал между поступлениями смежных заявок составляет 10 минут. Среднее время обслуживания заявки 2 минуты. Тогда коэффициент загрузки:

$$\psi = \frac{2}{10} = 0,2$$

Требуется определить:

- Вероятность отсутствия заявок в системе – P_0

$$P_0 = \left(1 + \sum_{n=1}^{2-1} \frac{0,2^n}{n!} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{0,2^n}{(2! \times 2^{2-N})} \right)^{-1} = 0,85$$

- Вероятность наличия одной заявки в системе P_1

$$P_1 = P_0 \times \psi = 0,85 \times 2 = 0,17$$

- Вероятность наличия двух заявок в системе P_2

$$P_2 = P_1 \times \frac{\psi}{2} = 0,17 \times \frac{0,2}{2} = 0,017$$

Решение задачи имитационным методом

Рассмотрим теперь решение этой же задачи имитационным методом. Изобразим графически процесс функционирования двухканальной разомкнутой системы массового обслуживания. На рис. 4.2 представлены основные события, которые возникают в процессе работы многоканальной разомкнутой СМО.

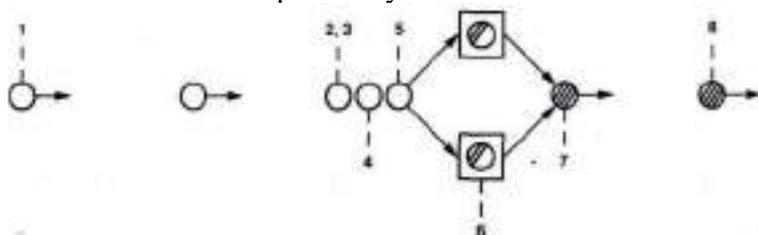


Рис. 4.2 Процесс функционирования многоканальной разомкнутой СМО с простыми потоками

Охарактеризуем каждое событие, возникшее в моделируемой системе:

1. Генерирование заявок, входящих в систему (**GENERATE**).
2. Вход заявок в накопитель (**ENTER**).
3. Определение канала обслуживания (**TRANSFER**)
4. Ожидание освобождения одного из каналов обслуживания (**SEIZE**).
5. Выход заявки из накопителя (**LEAVE**).
6. Обслуживание заявки в канале (**ADVANCE**).
7. Освобождение канала обслуживания (**RELEASE**).
8. Выход заявки из системы (**TERMINATE**).

Построение имитационной модели процесса

Программу работы двухканальной разомкнутой СМО можно представить в виде трех секторов.

В первом секторе указывается вместимость СМО. Это можно выполнить с помощью оператора STORAGE (Накопитель), который в нашем примере будет выглядеть так:

```
NAK STORAGE 3
```

Далее будем моделировать поток заявок в систему и их обслуживание. Моделирование потока заявок будем выполнять с помощью оператора GENERATE (Генерировать). В нашем примере он будет выглядеть так:

```
GENERATE (Exponential(1,0,10))
```

В поле операнда A осуществляется обращение к встроенному экспоненциальному распределению, с помощью которого можно моделировать простейший поток заявок, поступающих в систему. Средний интервал времени между поступлениями смежных заявок у нас принят равным 10 единицам времени.

Сбор статистической информации для многоканальной системы можно обеспечить с помощью операторов ENTER и LEAVE. Оператор ENTER может быть записан в таком виде:

```
ENTER NAK
```

В поле операнда A указано имя накопителя, вместимость которого должна быть заранее определена.

Поскольку СМО многоканальная, то необходимо использовать оператор TRANSFER для обеспечения возможности направления заявок к незанятому каналу:

```
TRANSFER BOTH,KAN1,KAN2
```

Сначала заявка направляется к оператору, имеющему символическую метку KAN1. Этим оператором является SEIZE, который записывается так:

```
KAN1 SEIZE CAN1
```

Если канал обслуживания с символической меткой KAN1 занят, то заявка направляется к оператору, имеющему символическую метку KAN2. Таким образом, следующим оператором будет:

```
KAN2 SEIZE CAN2
```

В свободном канале обслуживания заявка будет обслужена. Но предварительно заявка должна запомнить канал, в который оно попало на обслуживание. Для этого используется оператор ASSIGN (Присвоить) - с его помощью в параметре заявки под номером 1 запоминается имя канала, в который заявка пошла на обслуживание. Присвоение будет выглядеть так:

```
ASSIGN 1,CAN1
```

Далее, после определения свободного канала и записи его имени с помощью оператора TRANSFER заявка направляется к оператору с символической меткой COME. Это выглядит так:

```
TRANSFER ,COME
```

Заявка при направлении в канал сначала попадает в оператор LEAVE (Оставить). Это будет выглядеть так: COME LEAVE NAK

После выхода из накопителя заявка поступает в канал на обслуживание. Это действие выполняется с помощью оператора ADVANCE и записывается так:

```
ADVANCE (Exponential,0,2);
```

В поле операнда A осуществляется обращение к встроенному экспоненциальному распределению, с помощью которого можно моделировать время обслуживания заявки в канале обслуживания. Среднее время обслуживания у нас принято равным 2 единицам времени.

После обслуживания заявка выходит из канала обслуживания, и должен появиться сигнал об освобождении последнего. Это делается с помощью оператора RELEASE (Освободить):

```
RELEASE P1
```

Оператор заявки под номером P1 содержит имя освобождаемого канала обслуживания. Далее заявка выходит из системы с помощью оператора TERMINATE, который записывается в таком виде:

```
TERMINATE 1
```

И наконец, последний оператор - управляющая команда START -определяет, сколько заявок поступит в процессе моделирования системы:

```
START 10000
```

Подготовка к моделированию системы

Для начала моделирования:

- щелкните по пункту **File** главного меню системы. Появится выпадающее меню;
- щелкните по пункту **New (Создать)** выпадающего меню. Появится

диалоговое окно **Новый документ**;

- выделите пункт **Model** и щелкните по кнопке ОК. Появится окно модели, в котором введите данную программу. Это будет выглядеть так, как показано на рис. 4.3.

Чтобы вызвать окно для представления имитационной модели в системе GPSSW, можно также нажать комбинацию клавиш **Ctrl+Alt+S**.

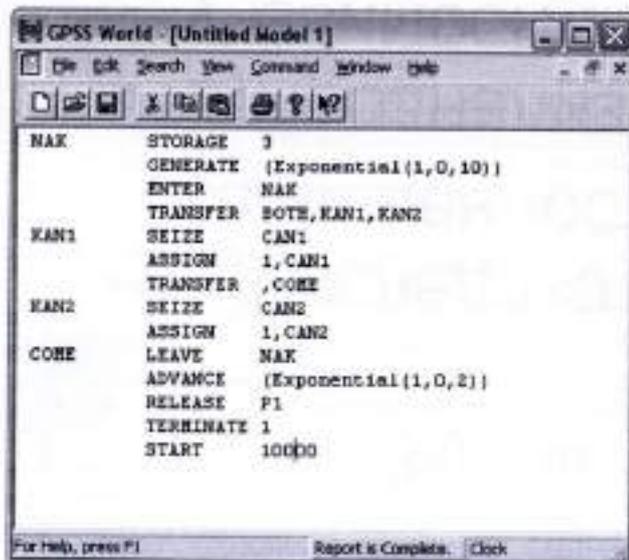


Рис. 4.3 Окно имитационной модели двухканальной разомкнутой СМО с простыми потоками

Перед началом моделирования можно установить вывод тех параметров моделирования, которые нужны пользователю. Для этого:

- щелкните по пункту **Edit** (Правка) главного меню системы или нажмите комбинацию клавиш **Alt+E**. Появится выпадающее меню;
- щелкните по пункту **Settings** (Установки) выпадающего меню. Появится диалоговое окно **SETTINGS** для данной модели;
- щелкните по вкладке **Reports** (Отчеты), в которой можно установить нужные выходные данные. Для нашего примера это может выглядеть так, как показано на рис. 4.4.

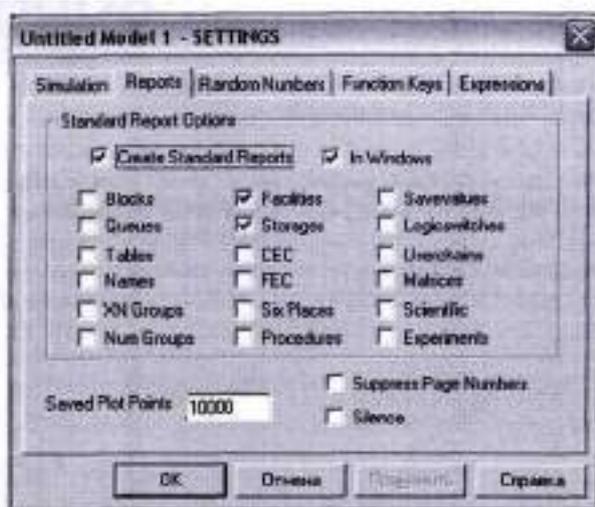


Рис. 4.4 Окно **SETTINGS** с открытой вкладкой **Reports** для имитационной модели двухканальной разомкнутой СМО с простыми потоками

Наличие галочки в окошках говорит о том, что эта информация будет выведена в окне результатов моделирования. В нашем примере будет выведена информация для следующих объектов:

- Facilities (Каналы обслуживания);
- Storages (Накопители).

Моделирование системы

После создания имитационную модель необходимо оттранслировать и запустить на выполнение. Для этого:

- щелкните по пункту Command главного меню системы или нажмите комбинацию клавиш Alt+C Появится выпадающее меню;
- щелкните по пункту Create Simulation (Создать выполняемую модель) выпадающего меню.

Так как в модели имеется управляющая команда START, то исходная имитационная модель будет выполняться после транслирования, если в ней нет ошибок.

Будет выполняться то число прогонов, которое указано в поле операнда A команды START - 200. Затем появится окно **JOURNAL** (Журнал) и результаты работы программы в окне **REPORT** (Отчет), как показано на рис. 4.5. В верхней строке указывается:

| GPS World Simulation Report - Dumtled Model 1.4.1 | | | | | | | | | | |
|---|------------|--------|------------|----------|---------|------|--------|-------|-------|-------|
| Sunday, May 24, 2009 21:51:42 | | | | | | | | | | |
| START TIME | END TIME | BLOCKS | FACILITIES | STORAGES | | | | | | |
| 0.000 | 101188.678 | 12 | 2 | 1 | | | | | | |
| FACILITY | ENTRIES | UTIL. | AVE. TIME | AVAIL. | OWNER | PEND | INTER | RETRY | DELAY | |
| CAN1 | 8382 | 0.168 | 2.033 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| CAN2 | 1618 | 0.032 | 2.001 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| STORAGE | CAP. | REM. | MIN. | MAX. | ENTRIES | AVL. | AVE.C. | UTIL. | RETRY | DELAY |
| NAK | 3 | 3 | 0 | 3 | 10000 | 1 | 0.002 | 0.001 | 0 | 0 |

Рис. 4.5. Окно REPORT с результатами моделирования двухканальной разомкнутой СМО с простыми потоками

- **START TIME** (Начальное время) - 0.000;
- **END TIME** (Время окончания)-101188.678;
- **BLOCKS** (Число блоков)-12;
- **FACILITIES** (Число каналов обслуживания) - 2;
- **STORAGES** (Число накопителей) - 1.

Ниже указываются результаты моделирования для канала обслуживания (FACILITY) под именами CAN1 и CAN2:

- **ENTRIES** (Число входов) - 8382, 1618;
- **UTIL.** (Коэффициент использования) - 0.168, 0.032;
- **AVE. TIME** (Среднее время обслуживания) - 2.033, 2.00;

Ниже указываются результаты функционирования накопителя (STORAGE) под именем NAK:

- **CAP.** (Capacity - Вместимость) - 3;
- **REM.** (Remove - Удален) - 3;
- **MIN.** (Минимальное содержимое) - 0;

- **MAX.** (Максимальное содержимое) - 3; ' "
- **ENTRIES** (Число входов)-10000; , - ■ .
- **AVL.** (Доступность) - 1;
- **AVE.C.** (Средняя вместимость) - 0.002;
- **UTIL.** (Коэффициент использования) - 0.001;
- **RETRY** (Повтор) - 0;
- **DELAY** (Отказ) - 0.

Сравним результаты, полученные аналитическим и имитационным методами. Вероятность наличия одного заявки в системе, определенная аналитическим методом, равна 0,17, а коэффициент использования первого канала обслуживания, определенный имитационным способом, равен 0,168. То есть результаты практически совпадают.

Варианты

Таблица 4.1

| № Вариант | Интервалы времени поступления заявок | Интервал времени выполнения заявок |
|-----------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 15 | 7 |
| 2 | 7 | 5 |
| 3 | 12 | 20 |
| 4 | 20 | 18 |
| 5 | 7 | 11 |
| 6 | 18 | 9 |
| 7 | 13 | 12 |
| 8 | 9 | 15 |
| 9 | 12 | 11 |
| 10 | 28 | 15 |
| 11 | 24 | 8 |
| 12 | 7 | 23 |
| 13 | 16 | 8 |
| 14 | 11 | 12 |
| 15 | 8 | 10 |

Лабораторная работа №1

Моделирование одноканальных разомкнутых СМО с простейшими потоками заявок

Цель: изучение способов и приобретение практических навыков моделирования одноканальных разомкнутых СМО с простейшими потоками.

Ход работы:

1. Изучить рассматриваемые в лабораторной работе способы моделирования одноканальных разомкнутых СМО с простейшими потоками.
2. Получить вариант задания у преподавателя для выполнения практического задания. По номеру полученного варианта из Таблицы 1.2 выбрать определённые значения:
 - среднее время ожидания заявки в очереди;
 - среднее время обслуживания заявки.
3. Исходя из условий задачи, представленных в примере 1.1. необходимо подставить полученные данные и выполнить:
 - Решение задачи аналитическим методом как это показано в примере. Получить результаты эксперимента.
 - Решение задачи имитационным методом как это показано в примере. Получить результаты эксперимента.
4. Сравнить результаты решения задачи аналитическим и имитационным методами
5. Подготовить отчет о работе с представлением и объяснением полученных результатов. Содержание отчёта:
 - Цель лабораторной работы.
 - Ход выполнения заданий по варианту.
 - Выводы по результатам проделанной работы.

Постановка задачи

Рассмотрим одноканальную разомкнутую систему массового обслуживания с неограниченным временем ожидания заявок и с простейшими потоками. Простейший поток наиболее полно отвечает реальным жизненным условиям и характеризуется следующими особенностями:

- поступление заявок в систему на обслуживание происходит по одному, то есть вероятность прибытия двух и более заявок в один момент времени очень мала, и ею можно пренебречь (поток заявок ординарный);
- вероятность поступления последующих заявок в любой момент времени не зависит от возможности их прибытия в предыдущие моменты - поток заявок без последствия;
- поток заявок стационарный.

Требуется определить:

- коэффициент использования канала обслуживания;
- среднюю длину очереди, то есть среднее число машин, находящихся в

очереди, ожидая освобождение канала обслуживания;

– среднее число заявок, находящихся в системе, то есть в очереди и в канале обслуживания.

Формализация задачи

Функционирование любой системы массового обслуживания можно представить через все ее возможные состояния, а также через интенсивность перехода из одного состояния в другое. Основными параметрами функционирования системы массового обслуживания являются вероятности ее состояния, то есть возможности наличия n заявок (покупателей, рабочих, заданий, машин, неполадок) в системе - P_n . Так, вероятность P_0 характеризует состояние, когда в системе нет заявок и канал обслуживания простаивает.

Важными параметрами функционирования системы массового обслуживания являются также среднее число заявок, находящихся в системе, то есть в очереди и на обслуживании, - N_{svst} , - и средняя длина очереди - N_{och} . Исходными параметрами, характеризующими систему массового обслуживания, являются:

– число каналов обслуживания (касс, компьютеров, подъемных кранов, ремонтных бригад) - N ;

– число заявок (покупателей, заданий, машин, неполадок) - m ;

– интенсивность поступления одной заявки на обслуживание, то есть число поступлений заявок в единицу времени - λ ;

– интенсивность обслуживания заявок - μ .

Интенсивность поступления заявок на обслуживание определяется как величина, обратная среднему времени между поступлениями двух смежных заявок, - t_p :

$$\lambda = 1/t_p$$

Интенсивность обслуживания заявок определяется как величина, обратная времени обслуживания одной заявки, - t_o :

$$\mu = 1/t_o$$

Решение задачи аналитическим методом

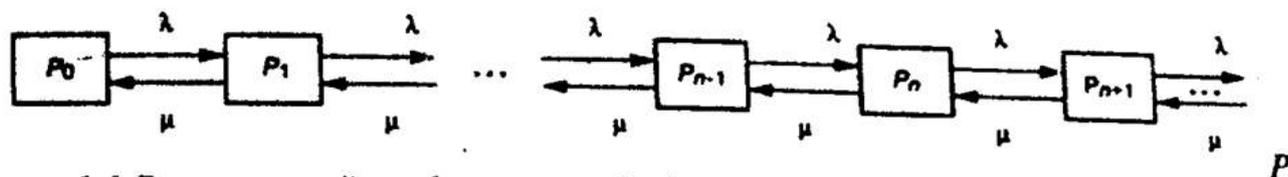
Состояние системы массового обслуживания будем связывать с числом заявок, находящихся в системе:

– в системе нет ни одной заявки - вероятность состояния P_0 ;

– в системе находится одна заявка - вероятность состояния P_1 ;

– в системе находится n заявок - вероятность состояния P_n .

Представим все возможные состояния системы массового обслуживания в виде размеченного графа состояний (рис. 1.1). Каждый прямоугольник графа, количественно оцениваемый вероятностью состояний P_n , определяет одно из всех возможных состояний. Стрелки указывают, в какое состояние система может перейти и с какой интенсивностью.



ис 1.1 Размеченный граф состояний одноканальной разомкнутой системы массового обслуживания

Первый прямоугольник с вероятностью P_0 определяет состояние системы массового обслуживания, при котором канал обслуживания простаивает из-за отсутствия заявок в системе. Из этого положения система массового обслуживания может перейти только в состояние P_1 . Это означает, что в системе появится одна заявка, так как входной поток ординарный. С интенсивностью μ система может перейти также из состояния P_1 в состояние P_0 . Это значит, что единственное находящееся в системе заявка была обслужена раньше, чем появилось новое.

Сначала рассмотрим установившийся режим работы системы массового обслуживания, когда основные вероятностные характеристики СМО постоянны во времени, например в течение часа. Тогда интенсивности входных и выходных потоков для каждого состояния будут сбалансированы. Эти сбалансированные потоки могут выглядеть так:

$$\begin{aligned}
 P_0 \times \lambda &= P_1 \times \mu; \\
 P_1 \times (\mu + \lambda) &= P_0 \times \lambda + P_2 \times \mu; \\
 P_2 \times (\mu + \lambda) &= P_1 \times \lambda + P_3 \times \mu; \\
 \dots & \\
 P_n \times (\mu + \lambda) &= P_{n-1} \times \lambda + P_{n+1} \times \mu; \\
 \dots &
 \end{aligned}$$

Обозначим величину λ/μ через ψ и назовем ее коэффициентом загрузки.

Из первого уравнения можно найти значение P_1 :

$$P_1 = P_0 \times \lambda / \mu = P_0 \times \psi.$$

Из второго уравнения найдем значение P_2 :

$$P_2 = P_1 + P_1 \times \lambda / \mu - P_0 \times \lambda / \mu.$$

Но первый член: $P_1 = P_0 \times \lambda / \mu$

Следовательно, первый и третий сокращаются:

$$P_2 = P_1 \times \lambda / \mu = P_0 \times \psi^2.$$

Из третьего уравнения найдем значение P_3 :

$$P_3 = P_2 + P_2 \times \lambda / \mu - P_1 \times \lambda / \mu.$$

Но первый член: $P_2 = P_1 \times \lambda / \mu$.

Следовательно, первый и третий также сокращаются:

$$P_3 = P_2 \times \lambda / \mu = P_0 \times \psi^3$$

и т.д.

$$P_n = P_{n-1} \times \lambda / \mu = P_0 \times \psi^n$$

Используя очевидное равенство $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$

получим:

$$1 = P_0 \times \sum_{n=0}^{\infty} \psi^n$$

Так как ψ меньше 1, то сумма геометрически убывающей прогрессии равна

$$1 + \psi + \psi^2 + \psi^3 + \dots + \psi^n + \dots = \frac{1 - \psi^{n-1}}{1 - \psi}.$$

При $n \rightarrow \infty \psi < 1$

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = P_0 \frac{1}{1 - \psi} = 1.$$

Отсюда вероятность простоя канала обслуживания определяется так:

$$P_0 = 1 - \psi.$$

Вероятность того, что в системе находится n заявок, определяется по формуле

$$P_n = \psi^n \times P_0 = \psi^n \times (1 - \psi).$$

Среднее число обслуживаемых заявок N_{sys} , находящихся быть определено таким образом:

$$N_{\text{sys}} = \sum_{n=0}^{\infty} n \times P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n \times \psi^n \times (1 - \psi) = (1 - \psi) \sum_{n=0}^{\infty} n \times \psi^n;$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} n \times \psi^n = (1 - \psi) \times (\psi + 2\psi^2 + 3\psi^3 + \dots + n\psi^n) + \dots =$$

$$= \psi \times (1 - \psi) \times (1 + 2\psi + 3\psi^2 + \dots + n \times \psi^{n-1}) + \dots$$

Выражение в последних скобках является производным от следующего выражения:

$$\psi + \psi^2 + \psi^3 + \dots + \psi^n + \dots = \psi \times (1 + \psi + (\psi^2 + \dots + \psi^{n-1} + \dots)) = \frac{\psi}{1 - \psi},$$

$$\text{то есть равно } \frac{1}{(1 - \psi)^2}.$$

Окончательно среднее число обслуживаемых заявок N_{sys} , находящихся в системе, определяется по формуле:

$$N_{\text{sys}} = \frac{\psi}{(1 - \psi)}$$

Среднее же число заявок, находящихся в очереди, будет вычислено так:

$$N_{och} = \frac{\lambda}{\mu} N_{syst} = \frac{\psi^2}{(1-\psi)}$$

Среднее время ожидания заявки можно определить, зная среднее число заявок, находящихся в системе:

$$T_{syst} = N_{syst} / \lambda = \frac{1}{\mu \times (1-\psi)}$$

Пример 1.1.

Пример решения задачи определения основных параметров функционирования одноканальной разомкнутой СМО «Компьютер-запросы» с простейшими потоками аналитическим методом.

Допустим, что входной поток запросов, поступающих на обработку, является простейшим потоком со средним временем ожидания в очереди 10 мин и временем обработки 6 мин.

Тогда интенсивность потока заявок, поступающих на обслуживание, составит:

$$\lambda = \frac{60}{10} = 6 \text{ заявок в час.}$$

Интенсивность же потока заявок после обслуживания составит:

$$\mu = \frac{60}{6} = 10 \text{ заявок в час.}$$

Откуда вероятность простоя канала обслуживания определяется так

$$P_0 = 1 - \psi = 1 - \frac{\lambda}{\mu} = 1 - \frac{6}{10} = 0,4.$$

Среднее число обслуживаемых заявок N_{syst} , находящихся в системе:

$$N_{syst} = \frac{\psi}{(1-\psi)} = \frac{0,6}{1-0,6} = 1,5.$$

Среднее число заявок, находящихся в очереди, будет вычислено так:

$$N_{och} = \frac{\lambda}{\mu} N_{syst} = \frac{\psi^2}{(1-\psi)} = \frac{0,6^2}{1-0,6} = \frac{0,36}{0,4} = 0,9.$$

Решение задачи имитационным методом

Рассмотрим теперь решение этой же задачи имитационным методом. Для облегчения построения имитационной модели, изобразим графически процесс функционирования одноканальной разомкнутой системы (рис. 1.2).

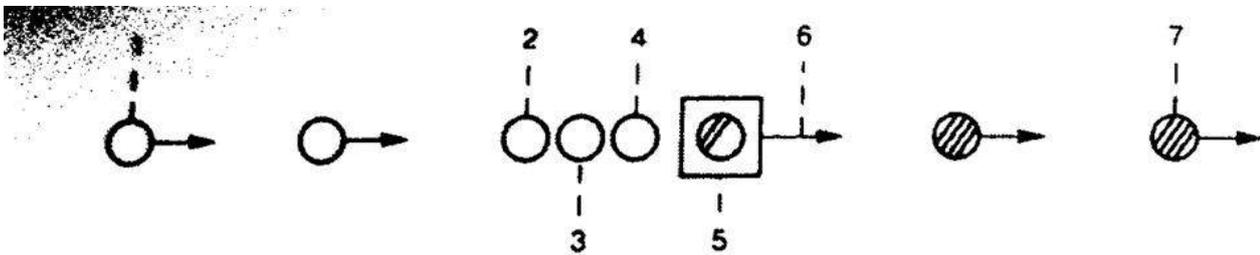


Рис. 1.2. Графическое изображение функционирования одноканальной разомкнутой системы

Рассмотрим все события, происходящие в одноканальной разомкнутой системе:

1. Генерирование заявок, входящих в систему (**GENERATE** - Генерировать).
2. Вход заявок в очередь (**QUEUE** - Очередь).
3. Проверка занятости канала обслуживания (**SEIZE** - Занять).
4. Выход заявок из очереди (**DEPART** - Выйти).
5. Обслуживание заявки (**ADVANCE** - Задержать).
6. Освобождение канала обслуживания (**RELEASE** - Освободить).
7. Выход заявки из системы (**TERMINATE** - Завершить).

Поскольку заявки не возвращаются в систему, то мы имеем одноканальную разомкнутую систему.

Построение имитационной модели процесса

Поступление изделий к станку моделируется оператором **GENERATE**, который нашей задаче может быть записан так:

GENERATE (Exponential(1,0,10))

В поле операнда *A* определяется интервал времени между прибытием двух идущих одно за другим заявок к устройству (каналу обслуживания). В нашем примере используется встроенная функция экспоненциального распределения времени между поступлениями в систему двух идущих одну за другой заявок. Среднее время прибытия заявок составляет 10 мин - это третий аргумент функции **Exponential**.

Поступившая заявка встает в очередь для обработки. Это можно промоделировать оператором **QUEUE**, который только в совокупности с соответствующим оператором **DEPART** собирает статистическую информацию о работе моделируемой очереди.

В нашем примере оператор **QUEUE** будет выглядеть так:

QUEUE OCHER

В поле операнда *A* дается символьное или числовое имя очереди. В нашем примере очереди дано имя **OCHER**. Желательно, чтобы присваиваемое имя отражало суть описываемого элемента системы.

Следуя логике, заявка может выйти из очереди только тогда, когда освободится устройство (канал обслуживания). Для этого вводится оператор **SEIZE**, который определяет занятость канала обслуживания, и при

освобождении последней находящаяся впереди заявка выходит из очереди и идет в канал на обслуживание. Это может выглядеть так:

```
SEIZE COMP
```

В поле операнда А дается символьное или числовое имя канала обслуживания. В нашей задаче каналу дано имя COMP. Желательно, чтобы присваиваемое имя отражало суть описываемого элемента системы.

Выход изделия из очереди на обслуживание фиксируется оператором DEPART с соответствующим названием очереди. В нашем примере это будет выглядеть так:

```
DEPART OCHER
```

Далее должно быть промоделировано время изготовления изделия на станке. Для моделирования этого процесса используется оператор ADVANCE, который в нашей задаче будет выглядеть так:

```
ADVANCE (Exponential(1,0,6))
```

В поле операнда А выполняется обращение к встроенному в систему экспоненциальному распределению с указанием среднего времени изготовления изделия -6 мин. После обработки заявок на устройстве должно быть послано сообщение об освобождении канала обслуживания. Это делается с помощью оператора RELEASE, который в нашей задаче записывается так:

```
RELEASE COMP
```

Следует особо подчеркнуть, что парные операторы QUEUE и DEPART для каждой очереди должны иметь одно и то же, но свое уникальное имя. Это же относится и к операторам SEIZE и RELEASE.

После изготовления изделие покидает систему. Это действие моделируется оператором TERMINATE, который записывается в программе в таком виде:

```
TERMINATE 1
```

Число изделий (заявок), прошедших изготовление в нашей системе, примем равным 10000.

Окончательно наша программа будет выглядеть так, как показано на рис.

1.3.

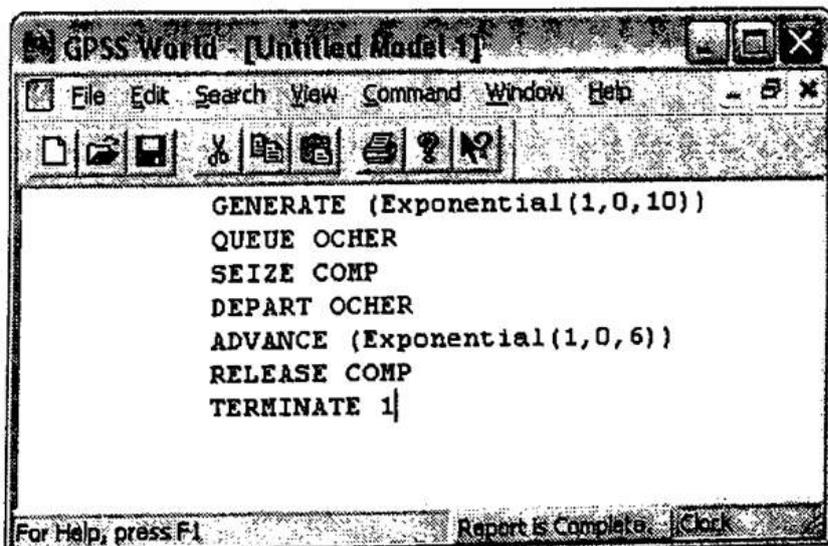


Рис. 1.3. Окно с моделью одноканальной разомкнутой системы с простейшими потоками

Подготовка к моделированию системы

Для начала моделирования:

- щелкните по пункту **File** главного меню системы. Появится выпадающее меню;
- щелкните по пункту **New** (Создать) выпадающего меню. Появится диалоговое окно **Новый документ**;
- выделите пункт **Model** и щелкните по кнопке **OK**. Появится окно модели, в котором введите данную программу.

Чтобы вызвать окно для представления имитационной модели в системе GPSSW, можно также нажать комбинацию клавиш **Ctrl+Alt+S**.

Перед началом моделирования можно установить вывод тех параметров моделирования, которые нужны пользователю. Для этого:

щелкните по пункту **Edit** (Правка) главного меню системы или нажмите комбинацию клавиш **Alt+E**. Появится выпадающее меню;

щелкните по пункту **Settings** (Установки) выпадающего меню. Появится диалоговое окно **SETTINGS** для данной модели;

щелкните по вкладке **Reports** (Отчеты), в которой можно установить нужные выходные данные. Для нашего примера это может выглядеть так, как показано на рис. 1.4.

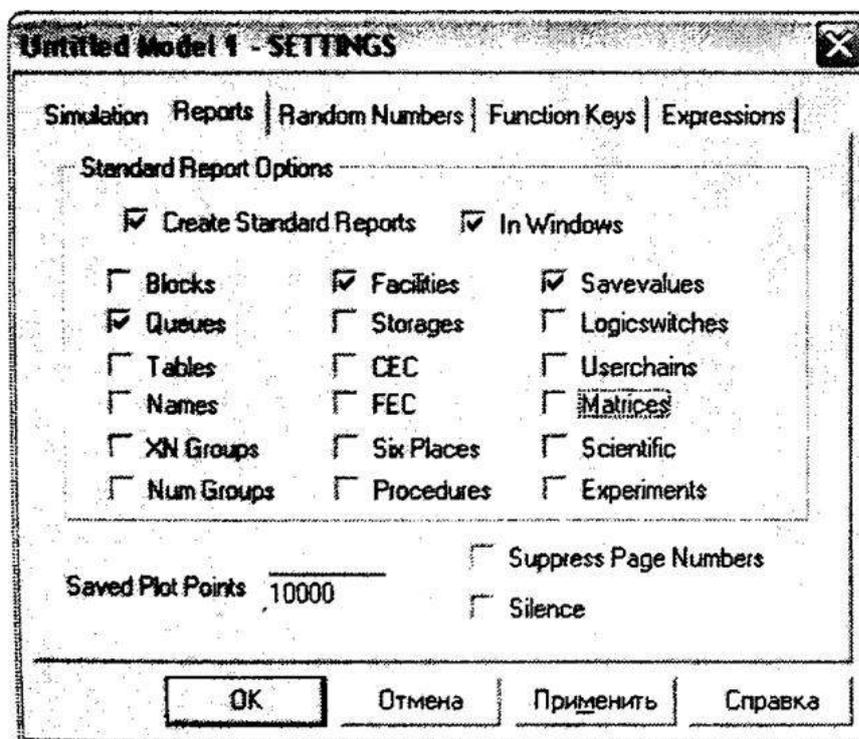


Рис. 1.4. Окно **SETTINGS** с установками для модели одноканальной разомкнутой системы с простейшими потоками

Наличие галочки в окошках говорит о том, что эта информация будет выведена в окне результатов моделирования. В нашем примере будет выведена информация по следующим объектам:

- **Facilities** (Каналы обслуживания);
- **Queues** (Очереди).

Моделирование системы

После создания имитационную модель необходимо оттранслировать. Для этого выполните следующие действия:

щелкните по пункту **Command** главного меню системы или нажмите комбинацию клавиш **Alt+C**. Появится выпадающее меню;

– щелкните по пункту **Create Simulation** (Создать выполняемую модель) выпадающего меню.

После трансляции имитационной модели необходимо запустить ее на выполнение. Для этого:

– щелкните по пункту **Command** главного меню системы или нажмите комбинацию клавиш **Alt+C**. Появится выпадающее меню;

– щелкните по пункту **START**. Появится диалоговое окно **Start Command**;

– введите в диалоговом окне **Start Command** нужное число прогонов модели.

Проделаем небольшой эксперимент. Промоделируем нашу систему при различном числе прогонов модели - разным количестве изготавливаемых изделия и сравним результаты моделирования с полученными при аналитическом расчете.

Если в диалоговом окне **Start Command** ввести число 100, 1000 или 10000 и щелкнуть по кнопке **OK**, то результаты моделирования в окне **REPORT** будут выглядеть так, как показано на рис. 1.5а-в соответственно.

GPSS World Simulation Report - Untitled Model 1.25.6

Thursday, May 07, 2009 13:55:01

| START TIME | END TIME | BLOCKS | FACILITIES | STORAGES |
|------------|----------|--------|------------|----------|
| 0.000 | 981.702 | 7 | 1 | 0 |

| FACILITY | ENTRIES | UTIL. | AVE. TIME AVAIL. | OWNER PEND | INTER | RETRY | DELAY |
|----------|---------|-------|------------------|------------|-------|-------|-------|
| COMP | 101 | 0.666 | 6.471 | 1 | 101 | 0 | 0 |

| QUEUE | MAX CONT. | ENTRY | ENTRY(O) | AVE. CONT. | AVE. TIME | AVE. (-O) | RETRY |
|-------|-----------|-------|----------|------------|-----------|-----------|-------|
| OCHER | 6 | 1 | 101 | 36 | 0.828 | 12.509 | 0 |

For Help, press F1 Report is Complete. Close

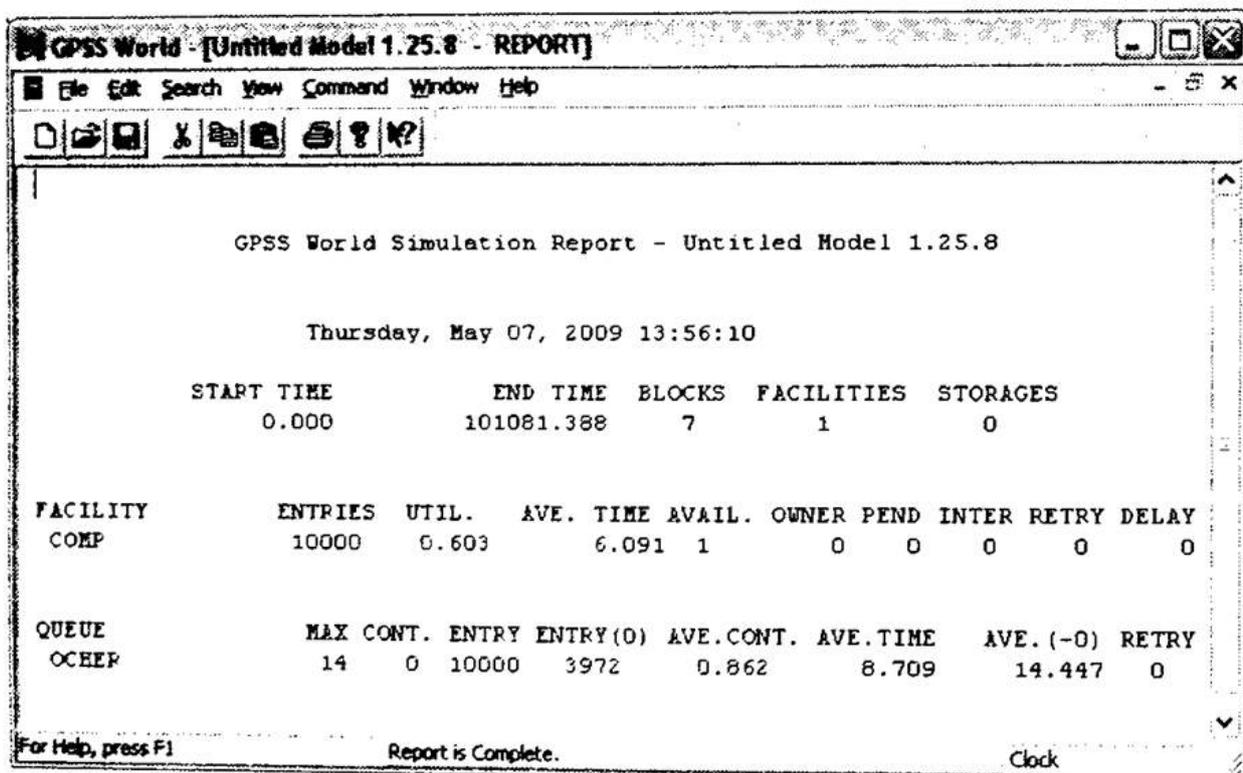
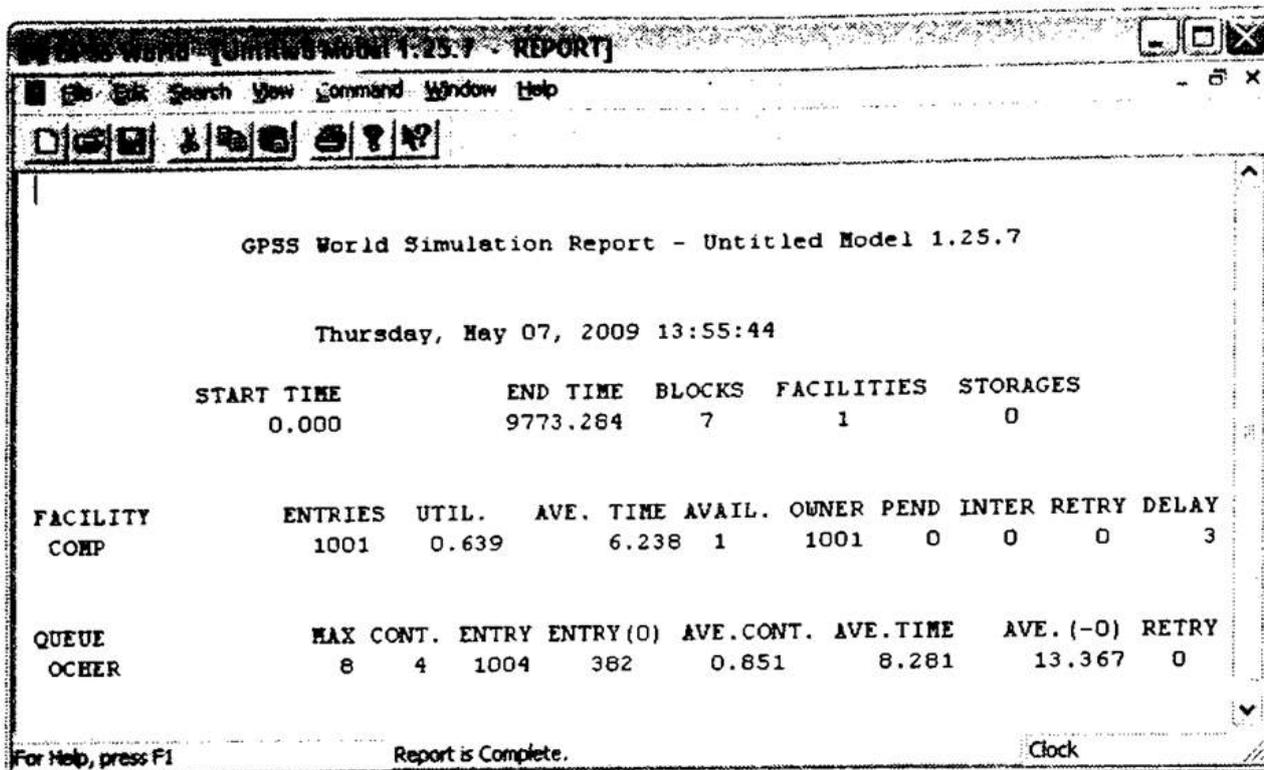


Рис. 1.5. Окно REPORT с различными вариантами результатов моделирования для имитационной модели одноканальной разомкнутой системы с простейшими потоками

Ниже указываются некоторые результаты моделирования с поступлением 100, 1000 и 10000 заявок соответственно:

- START TIME (Начальное время) - 0.000, 0.000, 0.000;
- END TIME (Время окончания) - 981.702, 9773.284, 101081.388.
- Ниже указываются результаты моделирования канала обслуживания

(FACILITY) под именем ЭТАЖЖ:

- ENTRIES (Число входов) - 101, 1001, 10000;
- UTIL. (Коэффициент использования) - 0.666, 0.639, 0.603;
- AVE. TIME (Среднее время обслуживания) - 6.471, 6.238, 6.091.

Еще ниже указываются результаты моделирования очереди (QUEUE) под именем OSHER:

- MAX (Максимальная длина очереди) - 6, 8, 14;
- AVE.CONT. (Среднее содержимое) - 0.828, 0.851, 0.862.

Разместим результаты, полученные путем аналитического расчета и методом имитационного моделирования при различном числе прогонов модели, в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

| Параметры | Имитация запросов, шт | | | Аналитический метод |
|--------------------------------------|-----------------------|----------|------------|---------------------|
| | 100 | 1000 | 10000 | |
| Время моделирования | 981,702 | 9773,284 | 101081,388 | - |
| Коэффициент использования устройства | 0,666 | 0,639 | 0,603 | 0,600 |
| Средняя длина очереди | 0,828 | 0,851 | 0,862 | 0,9 |

Сравнивая результаты решения одной и той же задачи аналитическим и имитационным методами, видим, что при увеличении числа испытаний (имитаций) результаты, полученные имитационным методом, приближаются к результатам аналитического метода.

Варианты

Таблица 1.2.

| № варианта | Среднее время ожидания в очереди, мин | Среднее время обработки, мин |
|------------|---------------------------------------|------------------------------|
| 1 | 15 | 7 |
| 2 | 7 | 5 |
| 3 | 20 | 12 |
| 4 | 20 | 18 |
| 5 | 11 | 7 |
| 6 | 18 | 9 |
| 7 | 13 | 12 |
| 8 | 15 | 9 |
| 9 | 12 | 11 |
| 10 | 28 | 15 |
| 11 | 24 | 8 |
| 12 | 23 | 7 |
| 13 | 16 | 8 |
| 14 | 12 | 11 |
| 15 | 10 | 8 |

Лабораторная работа №2

Моделирование одноканальных разомкнутых СМО с равномерными потоками заявок

Цель: приобретение практических навыков имитационного моделирования одноканальных разомкнутых СМО с равномерными потоками заявок в среде GPSS World.

Ход работы:

1. Изучить рассматриваемый в лабораторной работе пример моделирования одноканальных разомкнутых СМО с равномерными потоками.
2. Получить вариант задания у преподавателя для выполнения практического задания. По номеру полученного варианта из Таблицы 2.1 выбрать определённые значения:
 - интервал времени поступления заявок;
 - интервал времени выполнения заявок.
3. Используя листинг программы, представленный на рисунке 2.2 выполнить моделирование в среде GPSS, подставив индивидуальные данные:
4. Подготовить отчет о работе с представлением и объяснением полученных результатов. Содержание отчёта: .
 - Цель лабораторной работы.
 - Ход выполнения заданий по варианту.
 - Выводы по результатам проделанной работы.

Постановка задачи

Допустим, нам надо промоделировать работу одноканальной системы массового обслуживания - разомкнутой, с равномерным законом поступления заявок на обслуживание (лифт-пассажиры, изделия-контролер, программы-ЭВМ и т.д.). Допустим, что нам известен интервал времени между поступлениями двух смежных заявок, равный 8 ± 2 мин, в котором определяется время поступления, заявки на обслуживание. Величина интервала времени между поступлениями двух смежных заявок в систему подчиняется равномерному распределению.

Требуется смоделировать процесс функционирования системы и определить следующие основные ее характеристики:

- коэффициент использования канала обслуживания;
- среднее время использования канала обслуживания;
- число входов в каждый канал обслуживания;
- среднее содержимое очереди;
- среднее время пребывания заявки в очереди;
- максимальное содержимое очереди;
- коэффициент использования очереди.

Заявки, поступающие в систему на обслуживание, не возвращаются в нее, то есть мы имеем одноканальную разомкнутую систему массового обслуживания.

Формализация задачи

Решение этой задачи аналитическим методом невозможно. Поэтому ограничимся здесь использованием только имитационного метода.

Для облегчения построения имитационной модели, изобразим графически процесс функционирования одноканальной разомкнутой системы с равномерными потоками (рис. 2.1).

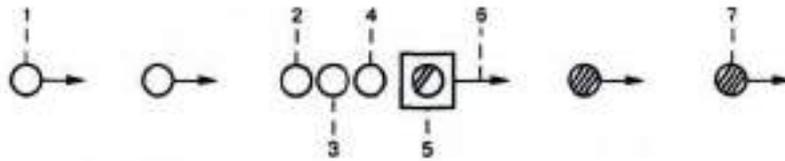


Рис. 2.1. Графическое изображение функционирования одноканальной разомкнутой системы с равномерными потоками

1. Генерирование заявок, входящих в систему (GENERATE - Генерировать).

2. Вход заявок в очередь (QUEUE - Очередь).

3. Проверка занятости канала обслуживания (SEIZE - Занять).

4. Выход заявок из очереди (DEPART - Выйти).

5. Обслуживание заявки (ADVANCE - Задержать).

6. Освобождение канала обслуживания (RELEASE - Освободить).

7. Выход заявки из системы (TERMINATE - Завершить).

Поскольку заявки не возвращаются в систему, то мы имеем одноканальную разомкнутую систему

Создание имитационной модели

Программу работы одноканальной разомкнутой СМО можно представить в виде последовательности нескольких операторов.

Моделирование потока заявок будем выполнять с помощью оператора GENERATE. В нашем примере он будет выглядеть так:

```
GENERATE 8,2
```

В поле операнда А указывается средний интервал времени между прибытием двух смежных заявок. В поле операнда В дано отклонение времени поступления заявок от среднего, которое соответствует равномерному распределению поступления заявок в систему в замкнутом интервале [6-10] с.

Сбор статистической информации для очереди в системе можно обеспечить с помощью операторов QUEUE и DEPART. Оператор QUEUE может быть записан в таком виде:

QUEUE 1

В поле операнда A дается символьное или числовое имя очереди. В нашем примере указан номер очереди - 1. Заявка будет находиться в очереди до тех пор, пока не поступит сообщение об освобождении канала обслуживания. Для этого используется оператор SEIZE, который определяет занятость канала обслуживания, и при освобождении последнего находящаяся впереди заявка выходит из очереди и идет в канал на обслуживание. Это может выглядеть так:

SEIZE 1

В поле операнда A дается символьное или числовое имя канала обслуживания. В нашем примере используется номер 1.

Выход заявки из очереди в канал обслуживания фиксируется оператором DEPART с соответствующим номером очереди. В нашем примере это будет выглядеть так:

DEPART 1

Далее должно быть промоделировано время пребывания заявки, непосредственно обслуживаемого, в канале обслуживания. Это время в нашем примере составляет 7 ± 1 с. Для моделирования этого процесса используется оператор ADVANCE, который в нашей задаче будет выглядеть так:

ADVANCE 7,1

После обслуживания заявка выходит из канала обслуживания. Для этого системе должно быть послано сообщение об освобождении канала обслуживания.

Это делается с помощью оператора RELEASE, который в нашей задаче записывается так:

RELEASE 1

Следует особо подчеркнуть, что парные операторы QUEUE и DEPART для каждой очереди должны иметь одно и то же, но свое уникальное имя или номер. Это же относится и к операторам SEIZE и RELEASE.

В нашем примере для идентификации имени очереди и канала использован номер 1.

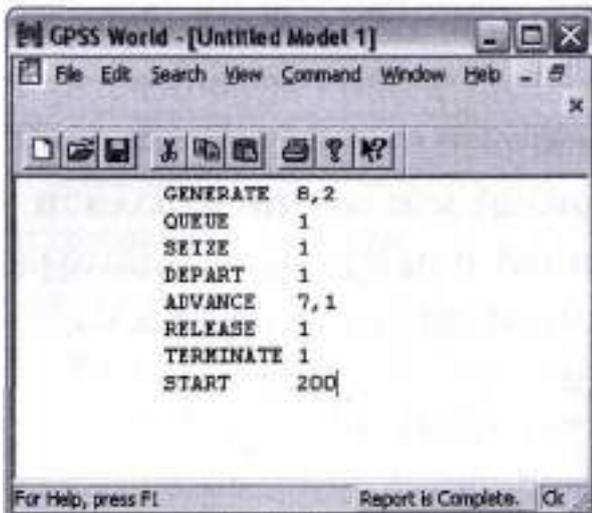
Далее заявка выходит из системы с помощью оператора TERMINATE, который записывается в таком виде:

TERMINATE 1

И наконец, последний оператор - управляющая команда START -определяет, сколько заявок будет обслуживаться в процессе моделирования системы:

START 200

Подготовка системы к моделированию



Для представления имитационной модели выполните следующие действия:

- щелкните по пункту **File** главного меню системы. Появится выпадающее меню;
- щелкните по пункту **New** выпадающего меню. Появится диалоговое окно **Новый документ**;
- выделите пункт **Model** и щелкните по кнопке **OK**. Появится окно

«... модели, в котором введите данную программу. Это будет выглядеть так, как показано на рис. 2.2.

Чтобы вызвать окно для представления имитационной модели в системе GPSSW, можно также нажать комбинацию клавиш **Ctrl+Alt+S**.

Рис.2.2 Окно имитационной модели одноканальной разомкнутой СМО с равномерными потоками

Перед началом моделирования можно установить вывод тех параметров, которые необходимо получить в процессе моделирования. Для этого:

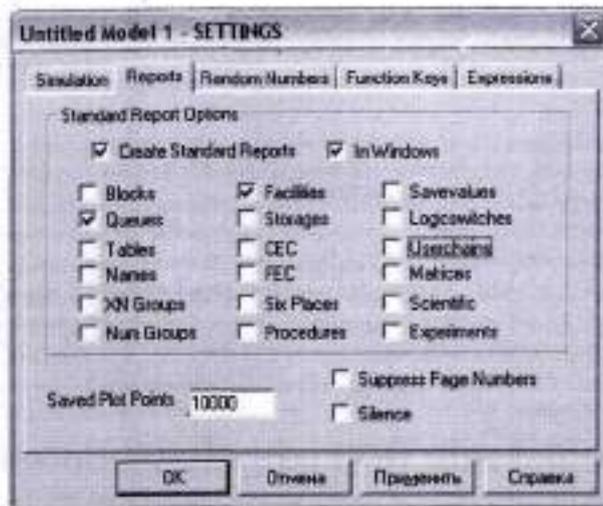


Рис.2.3 Окно SETTINGS с открытой вкладкой Reports для имитационной модели одноканальной разомкнутой СМО с равномерными потоками

Наличие галочки в окошках говорит о том, что эта информация будет выведена в окне результатов моделирования. В нашем примере будет выведена информация для следующих объектов:

- Facilities (Каналы обслуживания);
- Queues (Очереди).

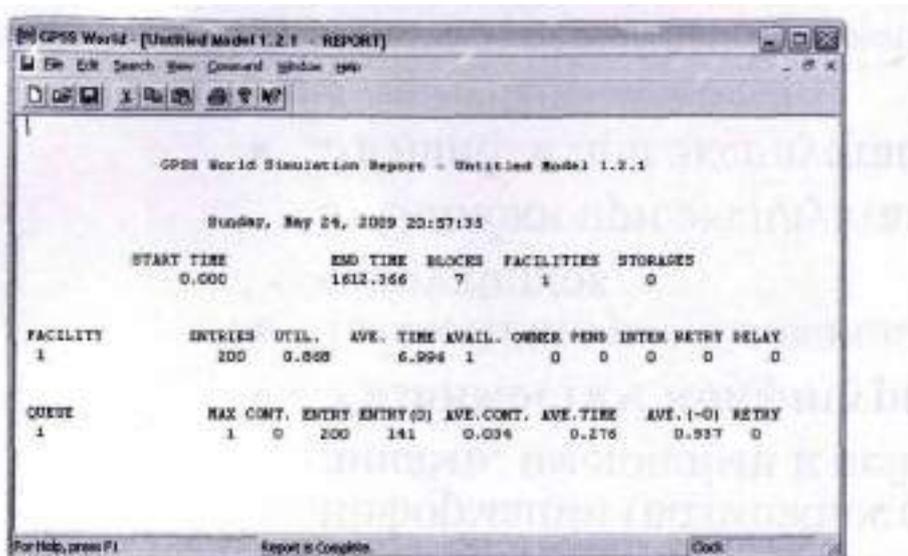
Моделирование системы

После создания имитационную модель необходимо оттранслировать и запустить на выполнение. Для этого:

- щелкните по пункту **Command** главного меню системы или нажмите комбинацию клавиш **Alt+C** Появится выпадающее меню;
- щелкните по пункту **Create Simulation** (Создать выполняемую модель) выпадающего меню.

Так как в модели имеется управляющая команда **START**, то исходная имитационная модель будет выполняться после транслирования, если в ней нет ошибок.

Будет выполняться то число прогонов, которое указано в поле операнда **A** команды **START** - 200. Затем появится окно **JOURNAL** (Журнал) и результаты работы программы в окне **REPORT** (Отчет), как показано на рис. 2.4. В верхней строке указывается:



The screenshot shows a window titled "CPSS World - [Untitled Model 1.2.1] - REPORT". The report content is as follows:

```
CPSS World Simulation Report - Untitled Model 1.2.1
Sunday, May 24, 2009 20:57:35
START TIME      END TIME  BLOCKS  FACILITIES  STORAGES
0.000           1612.366  7       1           0

FACILITY        ENTRIES  UTIL.   AVE. TIME  AVAIL.  OWNED  PEND  INTER  METRY  DELAY
1               200     0.868   6.996     1       0      0     0      0      0

QUEUE           MAX CONT.  ENTRY  ENTRY(Q)  AVE. CONT.  AVE. TIME  AVE. 1-Q  RETRY
1               1         0     200     141     0.034   0.276  0.937  0
```

Рис. 2.4. Окно **REPORT** с результатами моделирования одноканальной разомкнутой СМО с равномерными потоками

- **START TIME** (Начальное время) - 0.000;
- **END TIME** (Время окончания) - 1612.366;
- **BLOCKS** (Число блоков) - 7;
- **FACILITIES** (Число каналов обслуживания) - **1**;
- **STORAGES** (Число накопителей) - 0.

Ниже указываются результаты моделирования для канала обслуживания (**FACILITY**) под номером 1:

- **ENTRIES** (Число входов) - 200;
- **UTIL.** (Коэффициент использования) - 0.868;
- **AVE. TIME** (Среднее время обслуживания) - 6.996;
- **AVAIL.** (Доступность) - **1**;
- **PEND-0**;
- **INTER-0**;

- **RETRY** (Повтор) - 0;
- **DELAY** (Отказ) - 0.

Ниже указываются результаты функционирования очереди (QUEUE) под номером 1:

- **MAX** (Максимальное содержание) - 1;
 - **CONT.** (Текущее содержание) - 0;
 - **ENTRY** (Число входов) - 200;
 - **ENTRY(O)** (Число нулевых входов) - 141;
 - **AVE.CONT.** (Среднее число входов) - 0.034;
 - **AVE.TIME.** (Среднее время) - 0.276;
- AVE.(-O)** - 0.937; **RETRY** - 0.

Лабораторная работа №4

Моделирование многоканальных разомкнутых СМО со смешанными потоками заявок

Цель: изучение способов и приобретение практических навыков моделирования многоканальных разомкнутых СМО со смешанными потоками заявок.

Ход работы:

1. Изучить рассматриваемый в лабораторной работе пример моделирования многоканальных разомкнутых СМО со смешанными потоками заявок.
2. Получить вариант задания у преподавателя для выполнения практического задания. По номеру полученного варианта из Таблицы 5.1 выбрать определённые значения:
 - интервал времени поступления заявок;
 - интервал времени выполнения заявок.
3. Используя листинг программы, представленный на рисунке 5.2 выполнить моделирование в среде GPSS, подставив индивидуальные данные:
4. Подготовить отчет о работе с представлением и объяснением полученных результатов. Содержание отчёта:
 - Цель лабораторной работы.
 - Ход выполнения заданий по варианту.
 - Выводы по результатам проделанной работы.

Постановка задачи

Задана многоканальная разомкнутая система массового обслуживания с экспоненциальным законом поступления заявок на обслуживание (лифты-пассажиры, изделия-контролеры, программы-ЭВМ и т.д.), для которой справедливы следующие условия:

- поступление заявок в систему на обслуживание не зависит от поступления другой заявки (отсутствие последствия);
- систему одновременно никогда не поступает две или более заявки (поток ординарный);
- вероятность поступления заявок зависит только от продолжительности периода наблюдения (поток заявок стационарный), а не от принятого начала отсчёта времени.

Известно среднее время поступления заявки на обслуживание, равное 60 с, которое подчиняется экспоненциальному распределению вероятностей. В системе массового обслуживания имеется три канала обслуживания, время обслуживания в которых равномерное.

Требуется смоделировать процесс функционирования системы и определить следующие основные ее характеристики:

- коэффициент использования каждого канала обслуживания;

- среднее время использования каждого канала обслуживания;
- число входов в каждый канал обслуживания;
- среднее содержимое накопителя;
- среднее время пребывания заявок в накопителе;
- максимальное содержимое накопителя;
- коэффициент использования накопителя.

Заявки, поступающие в систему на обслуживание, не возвращаются в нее, то есть мы имеем многоканальную разомкнутую систему массового обслуживания. Для решения этой задачи нет аналитических методов

Формализация задачи

Изобразим графически процесс функционирования трехканальной разомкнутой системы массового обслуживания. На рис. 5.1 представлены основные события, которые возникают в процессе работы СМО.

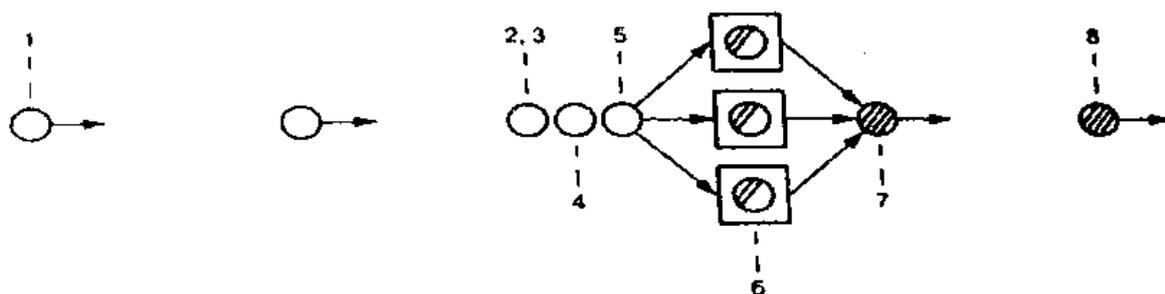


Рис. 5.1 Процесс функционирования многоканальной разомкнутой СМО со смешанными потоками

Охарактеризуем каждое событие, возникшее в моделируемой системе:

- 1 Генерирование заявок, входящих в систему (**GENERATE**).
2. Вход заявок в накопитель (**ENTER**).
3. Определение канала обслуживания (**TRANSFER**)
- 4 Ожидание освобождения одного из каналов обслуживания (**SEIZE**).
- 5 Выход заявки из накопителя (**LEAVE**).
6. Обслуживание заявки в канале (**ADVANCE**).
- 7 Освобождение канала обслуживания (**RELEASE**).
- 8 Выход заявки из системы (**TERMINATE**).

Создание имитационной модели процесса

Программу работы двухканальной разомкнутой СМО можно представить в виде трех секторов

В первом секторе указывается вместимость СМО. Это можно выполнить с помощью оператора **STORAGE** (Накопитель), который в нашем приложении будет выглядеть так:

```
NAK STORAGE 3
```

В этом же секторе используем оператор **FUNCTION** (Функция) формирования экспоненциального распределения поступления заявок в систему. Ввод функции выполняется с использованием непрерывной численной функции.

функции, с помощью значений функции в 24 точках. Это можно представить в таком виде:

```
EXP_G FUNCTION RN1.C24
0,0/.1, 104/.2, .222/.3, .355/.4, .509/.5, .69/.6, .915
.7, 1.2/.75, 1.38/.8, 1.6/.84, 1.83/.88, 2.12/.9, 2.3
.92, 2.52/.94, 2.81/.95, 2.99/.96, 3.2/.97, 3.5/.98, 3.9
99, 4.6/.995, 5.3/.998, 6.2/.999, 7./9997, 8.
```

Функция - это вычислительный элемент системы моделирования, связывающий зависимую и независимую переменные моделирования. Функция определяется с помощью оператора FUNCTION. Перед оператором FUNCTION в поле меток ставится символьное или числовое имя (идентификатор) функции. В нашем примере ее имя - EXP_G. В поле операнда A задается аргумент (независимая переменная) функции. Аргумент функции может быть любым стандартным числовым атрибутом, за исключением матричной сохраняемой величины. Если в качестве аргумента функции используется случайное число RN, то результатом является дробная величина, равномерно распределенная в интервале $0 < RN < 1$. Во всех других случаях $0 \leq \text{аргумент} \leq 999$.

Во втором секторе будем моделировать поток заявок в систему и их обслуживание. Моделирование потока заявок будем выполнять с помощью оператора GENERATE (Генерировать). В нашем примере он будет выглядеть так

```
GENERATE 12,FNSEXP_G
```

В поле операнда A указывается средний интервал времени между прибытием двух смежных заявок. В поле операнда B дано отклонение времени поступления заявок от среднего. В нашем примере отклонение от среднего времени прибытия заявок подчиняется экспоненциальному распределению.

Сбор статистической информации для многоканальной системы можно обеспечить с помощью операторов ENTER и LEAVE. Оператор ENTER может быть записан в таком виде:

```
ENTER NAK
```

В поле операнда A указано имя накопителя, вместимость которого должна быть заранее определена.

Поскольку СМО многоканальная, то необходимо использовать оператор TRANSFER для обеспечения возможности направления заявок к незанятому каналу.

```
TRANSFER ALL,KAN1,KAN3,3
```

Сначала заявка направляется к оператору, имеющему символьную метку KAN1. Этим оператором является SEIZE, который записывается так:

```
KAN1 SEIZE CAN1
```

Если канал обслуживания с символьной меткой KAN1 занят, то заявка направляется к следующему каналу, перешагивая через три оператора. 3 — это число, указанное в поле операнда D в операторе TRANSFER. Таким образом, следующим оператором будет:

```
SEIZE CAN2
```

Если и этот канал будет занят, то заявка снова перешагнет через три

оператора и т.д., пока не найдется незанятый канал обслуживания. В свободном канале обслуживания заявка будет обслужена. Но предварительно заявка должно запомнить канал, в который она попало на обслуживание. Для этого используется оператор ASSIGN (Присвоить) - с его помощью в параметре заявка под номером 1 запоминается имя канала, в который заявка пошла на обслуживание. В каждом канале имеется свой оператор ASSIGN. Например, для первого канала это присвоение будет выглядеть так:

```
ASSIGN 1.CAN1
```

Далее, после определения свободного канала и записи его имени с помощью оператора TRANSFER заявка направляется на обслуживание. Это выглядит так:

```
TRANSFER ,COME
```

Однако перед началом обслуживания должно быть подано сообщение о том, что заявка оставила накопитель под именем NAK, в котором она находилось. Это будет выглядеть так:

```
COME LEAVE NAK
```

После выхода из накопителя заявка поступает в канал на обслуживание. Это действие выполняется с помощью оператора ADVANCE. Время обслуживания определяется с равномерным законом распределения в интервале 8 ± 3 с. Это записывается так:

```
ADVANCE 8,3
```

После обслуживания заявка выходит из канала обслуживания, и должен появится сигнал об освобождении последнего. Это делается с помощью оператора RELEASE (Освободить):

Оператор заявок под номером P1 содержит имя освобождаемого канала обслуживания. Далее заявка выходит из системы с помощью оператора TERMINATE, который записывается в таком виде:

```
TERMINATE 1
```

И наконец, последний оператор - управляющая команда START - определяет, сколько поступит заявок в процессе моделирования системы:

```
START 10000
```

Подготовка системы к моделированию

Для представления имитационной модели выполните следующие действия:

- щелкните по пункту **File** главного меню системы. Появится выпадающее меню;
- щелкните по пункту **New** выпадающего меню. Появится диалоговое окно **Новый документ**;
- выделите пункт **Model** и щелкните по кнопке **OK**. Появится окно модели, в котором введите данную программу. Это будет выглядеть так, как показано на рис. 5.2.

Чтобы вызвать окно для представления имитационной модели в системе GPSSW, можно также нажать комбинацию клавиш **Ctrl+Alt+S**.

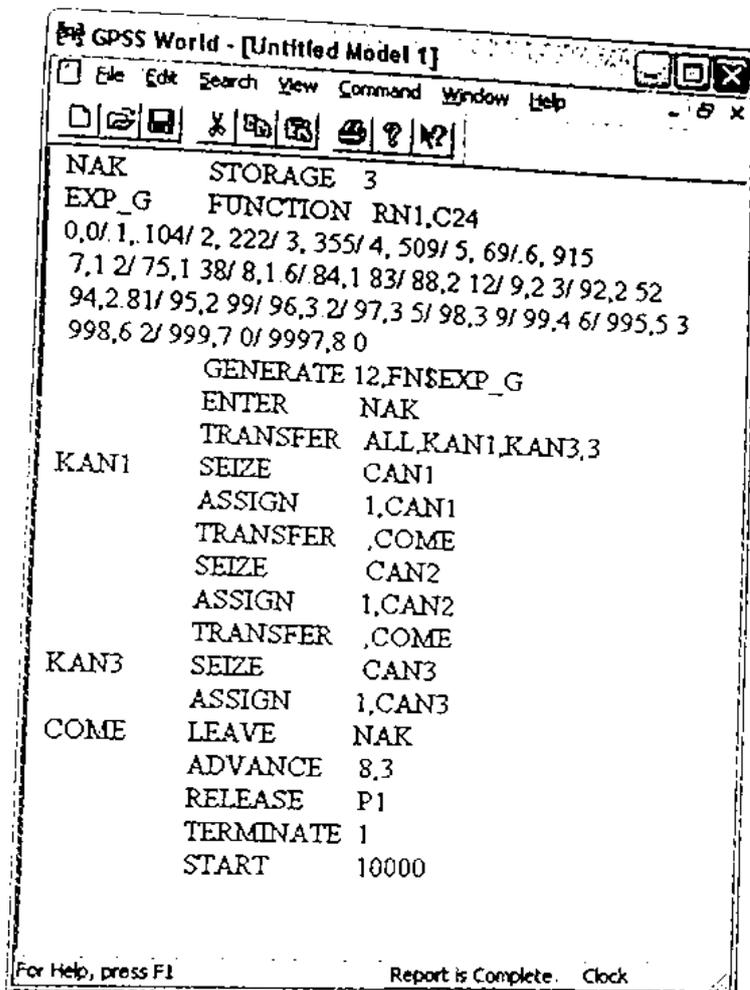


Рис. 5.2. Окно имитационной модели многоканальной разомкнутой СМО с равномерными потоками

Перед началом моделирования можно установить вывод тех параметров, которые необходимо получить в процессе моделирования. Для этого:

- щелкните по пункту Edit (Правка) главного меню системы или нажмите комбинацию клавиш Alt+E. Появится выпадающее меню;

- щелкните по пункту Settings (Установки) выпадающего меню. Появится диалоговое окно SETTINGS для данной модели, в котором можно установить нужные выходные данные. Для нашего примера это может выглядеть так, как показано на рис. 5.3.

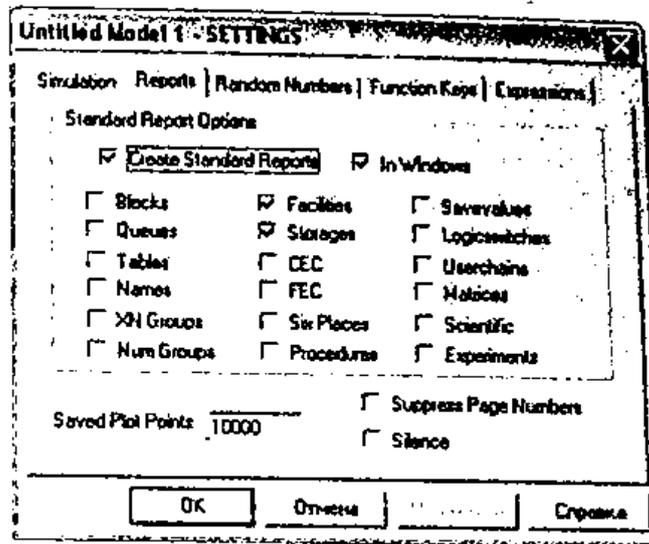


Рис. 5.3 Окно *SETTINGS* с открытой вкладкой *Reports* для имитационной модели многоканальной разомкнутой СМО с равномерными потоками

Наличие галочки в окошках говорит о том, что эта информация будет выведена в окне результатов моделирования. В нашем примере будет выведена информация для следующих объектов:

- Facilities (Каналы обслуживания);
- Storages (Накопители).

Моделирование системы

После создания имитационную модель необходимо оттранслировать и запустить

Для начала моделирования:

- щелкните по пункту *Command* главного меню системы или нажмите комбинацию клавиш *Alt+C* Появится выпадающее меню;
- щелкните по пункту *Create Simulation* (Создать выполняемую модель) выпадающего меню.

Так как в модели имеется управляющая команда *START*, то исходная имитационная модель будет выполняться после транслирования, если в ней нет ошибок.

Будет выполняться то число прогонов, которое указано в поле операнда *A* команды *START* - 200. Затем появится окно *JOURNAL* (Журнал) и результаты работы программы в окне *REPORT* (Отчет), как показано на рис. 5.4. В верхней строке указывается:

GPSS World - [Untitled Model] REPORT

GPSS World Simulation Report - Untitled Model 1.2.1

Monday, May 25, 2009 00:04:59

| START TIME | END TIME | BLOCKS | FACILITIES | STORAGES |
|------------|------------|--------|------------|----------|
| 0.000 | 121196.149 | 15 | 3 | 1 |

| FACILITY | ENTRIES | UTIL. | AVE. TIME | AVAIL. | OWNER | PEND | INTER | RETRY | DELAY |
|----------|---------|-------|-----------|--------|-------|------|-------|-------|-------|
| CAN1 | 6113 | 0.399 | 7.909 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CAN2 | 2899 | 0.192 | 8.009 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CAN3 | 988 | 0.066 | 8.038 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| STORAGE | CAP. | REM. | MIN. | MAX. | ENTRIES | AVL. | AVE.C. | UTIL. | RETRY | DELAY |
|---------|------|------|------|------|---------|------|--------|-------|-------|-------|
| NAK | 3 | 3 | 0 | 3 | 10000 | 1 | 0.006 | 0.002 | 0 | 0 |

For Help, press F1. Report is Complete.

Рис. 5.4. Окно REPORT с результатами моделирования многоканальной разомкнутой СМО с равномерными потоками

- START TIME (Начальное время) - 0.000;
- END TIME (Время окончания) - 121196.149;
- BLOCKS (Число блоков) - 15;
- FACILITIES (Число каналов обслуживания) - 3;
- STORAGES (Число накопителей) - 1.

Ниже указываются результаты моделирования для всех трех каналов обслуживания (FACILITY) соответственно под именами: CAN1, CAN2, CAN3:

- ENTRIES (Число входов) - 6113, 2899, 988;
- UTIL. (Кoeffициент использования) - 0.399, 0.192, 0.066;
- AVE. TIME (Среднее время обслуживания) - 7.909, 8.009, 8.038.

Ниже указываются результаты функционирования накопителя (STORAGE) под именем NAK:

- CAP. (Capacity - Вместимость) - 3;
- REM. (Remove - Удален) - 3;
- MIN. (Минимальное содержимое) - 0;
- MAX. (Максимальное содержимое) - 3;
- ENTRIES (Число входов) - 10000;
- AVL. (Доступность) - 1;
- AVE.C. (Средняя вместимость) - 0.006;
- UTIL. (Кoeffициент использования) - 0.002;
- RETRY (Повтор) - 0;
- DELAY (Отказ) - 0.

Варианты

Таблица 5.1

| № Вариант | Интервалы времени поступления заявок | Интервал времени выполнения заявок |
|--------------|---|---------------------------------------|
| 1 | 15 | 7 |
| 2 | 7 | 5 |
| 3 | 12 | 20 |
| 4 | 20 | 18 |
| 5 | 7 | 11 |
| 6 | 18 | 9 |
| 7 | 13 | 12 |
| 8 | 9 | 15 |
| 9 | 12 | 11 |
| 10 | 28 | 15 |
| 11 | 24 | 8 |
| 12 | 7 | 23 |
| 13 | 16 | 8 |
| 14 | 11 | 12 |
| 15 | 8 | 10 |

Цель: приобретение практических навыков имитационного моделирования многофазных замкнутых СМО с равномерными потоками заявок в среде GPSS World.

Ход работы

Изучить рассматриваемый в лабораторной работе пример моделирования одноканальных разомкнутых СМО с равномерными потоками.

Получить вариант задания у преподавателя для выполнения практического задания. По номеру полученного варианта из Таблицы 9.1 выбрать определённые значения:

- количество заявок в системе;
- интервал времени формирования заявок;
- интервал времени передачи заявок;
- интервал времени обработки заявок;
- интервал времени отправки ответа на заявки

3. Используя листинг программы, представленный на рисунке 9.1 выполнить моделирование в среде GPSS, подставив индивидуальные данные:

4. Подготовить отчет о работе с представлением и объяснением полученных результатов. Содержание отчёта:

Цель лабораторной работы.

Ход выполнения заданий по варианту.

Выводы по результатам проделанной работы.

Постановка задачи

В данной задаче моделируется работа системы «Серверы-запросы».

Один сервер отправляет запросы другому серверу, который отправляет ответ на обработанный запрос. Известно среднее время составления запроса отправляющим сервером. Это время составляет 14 ед. вр. Возможные отклонения от среднего времени составляют 1 ед. вр. Среднее время, необходимое для передачи запроса принимающему серверу составляет 38 ед. вр. А возможное отклонение от этого времени - 2 ед. вр. Известно среднее время обработки запроса принимающим сервером, которое составляет 9 ед. вр. Возможное отклонение от этого времени - 1 ед. вр. Среднее время, необходимое для доставки ответа на запрос составляет 28 ед. вр, а возможное отклонение от него - 2 ед. вр. Число запросов, циркулирующих в системе, равно 6. Требуется определить основные характеристики системы:

1. коэффициент использования первого и второго каналов обслуживания;
2. среднее время пребывания запроса в каналах;
3. максимальное содержимое очереди запросов на обработку в первое и второе устройство;
4. среднее содержимое очереди запросов на обработку в первое и второе устройство;
5. общее число входов заявок в очередь, то есть поступлений запросов на обслуживание в течении работы системы;
6. среднее время пребывания заявки в очередях.

Поскольку заявки возвращаются в систему, то мы имеем замкнутую систему. Каждая заявка проходит две фазы обработки. Таким образом мы имеем двухфазную систему обслуживания.

Построение имитационной модели процесса

Особенности моделирования системы:

Оператор GENERATE используется только для формирования числа заявок, которые обслуживает устройство. Этот режим использования оператора GENERATE предполагает, что поля A, B, C остаются пустыми, то есть ставятся соответственно три запятые, затем в поле D указывается число заявок, которые должно обслуживать устройство.

Заявки приходят на обработку на принимающее устройство, пройдя которое заявки снова возвращаются в систему для обработки. Возвращение заявки в систему происходит при вхождении ее в оператор TRANSFER, который используется в режиме безусловной передачи:

```
TRANSFER ,A
```

3. Время возвращения заявки к отправляющему устройству моделируется оператором:

```
ADVANCE 28,2
```

4. Возвращение заявки в систему происходит до тех пор, пока время моделирования не превысит время моделирования системы. Определение времени моделирования основано на использовании простой модели измерения времени, состоящей из трех операторов:

```
GENERATE 480
```

```
TERMINATE I
```

```
START 1
```

Этот сектор моделирует время работы системы в течение рабочей смены, равной 480 ед вр.

Поступление заявок в систему моделируется оператором GENERATE, который нашей задаче может быть записан так:

```
GENERATE ,, 6
```

Число заявок указывается в поле операнда D.

Затем запрос встает в очередь на обработку в отправляющее устройство. Это можно промоделировать оператором QUEUE, который в совокупности с соответствующим оператором DEPART собирает статистическую информацию о работе моделируемой очереди.

В нашем примере оператор QUEUE будет выглядеть так:

```
QUEUE OCHER1
```

В поле операнда A дается символьное или числовое имя очереди. В нашем примере очереди дано имя OCHER1

Следуя логике, заявка может выйти из очереди только тогда, когда освободится устройство. Для этого вводится оператор SEIZE, который определяет занятость канала обслуживания, и при освобождении последней находящаяся впереди заявка выходит из очереди и идет в канал на обслуживание. Это может выглядеть так:

```
SEIZE COMP1
```

В поле операнда A дается символьное или числовое имя канала обслуживания. В нашей задаче каналу дано имя COMP1.

Выход заявки из очереди на обслуживание фиксируется оператором DEPART с соответствующим названием очереди. В нашем примере это будет выглядеть так:

DEPART OCHER1

Далее должно быть промоделировано время обслуживания заявки. Это время в нашем примере составляет 14 ± 1 ед. вр.. Для моделирования этого процесса используется оператор ADVANCE, который в нашей задаче будет выглядеть так:

ADVANCE 14, 1

После обработки заявок на устройстве должно быть послано сообщение об освобождении канала обслуживания. Это делается с помощью оператора RELEASE, который в нашей задаче записывается так:

RELEASE COMP1

Следует особо подчеркнуть, что парные операторы QUEUE и DEPART для каждой очереди должны иметь одно и то же, но свое уникальное имя. Это же относится и к операторам SEIZE и RELEASE.

После отправления запрос направляется на обработку принимающему серверу, где также возможна очередь. Это можно промоделировать оператором QUEUE, который выглядит так:

QUEUE OCHER2

Заявка может выйти из очереди только тогда, когда освободится устройство. Для этого вводится оператор SEIZE, который определяет занятость канала обслуживания, и при освобождении последней находящаяся впереди заявка выходит из очереди и идет в канал на обслуживание. Это может выглядеть так:

SEIZE COMP2

Выход заявки из очереди на обслуживание фиксируется оператором DEPART с соответствующим названием очереди. В нашем примере это будет выглядеть так:

DEPART OCHER2

Далее должно быть промоделировано время обработки запроса принимающим сервером. Это время в нашем примере составляет 9 ± 1 ед вр. Для моделирования этого процесса используется оператор ADVANCE, который уже был использован ранее.

ADVANCE 9, 1

После обработки заявок на устройстве должно быть послано сообщение об освобождении канала обслуживания. Это делается с помощью оператора RELEASE, который в нашей задаче записывается так:

RELEASE COMP2

Далее используется оператор TRANSFER для возвращения ответа первому серверу:

TRANSFER , A

Метка A определяет оператор, к которому направляется заявка. В нашей задаче это оператор QUEUE, который уже был использован ранее. И в нашем примере он был представлен так:

A QUEUE OCHER1

Текст программы

GENERATE ,,13

A QUEUE OCHER1

SEIZE COMP1

DEPART OCHER1

ADVANCE 20,5

RELEASE COMP1

ADVANCE 10,3

QUEUE OCHER2

SEIZE COMP2

DEPART OCHER2

ADVANCE 20,4

RELEASE COMP2

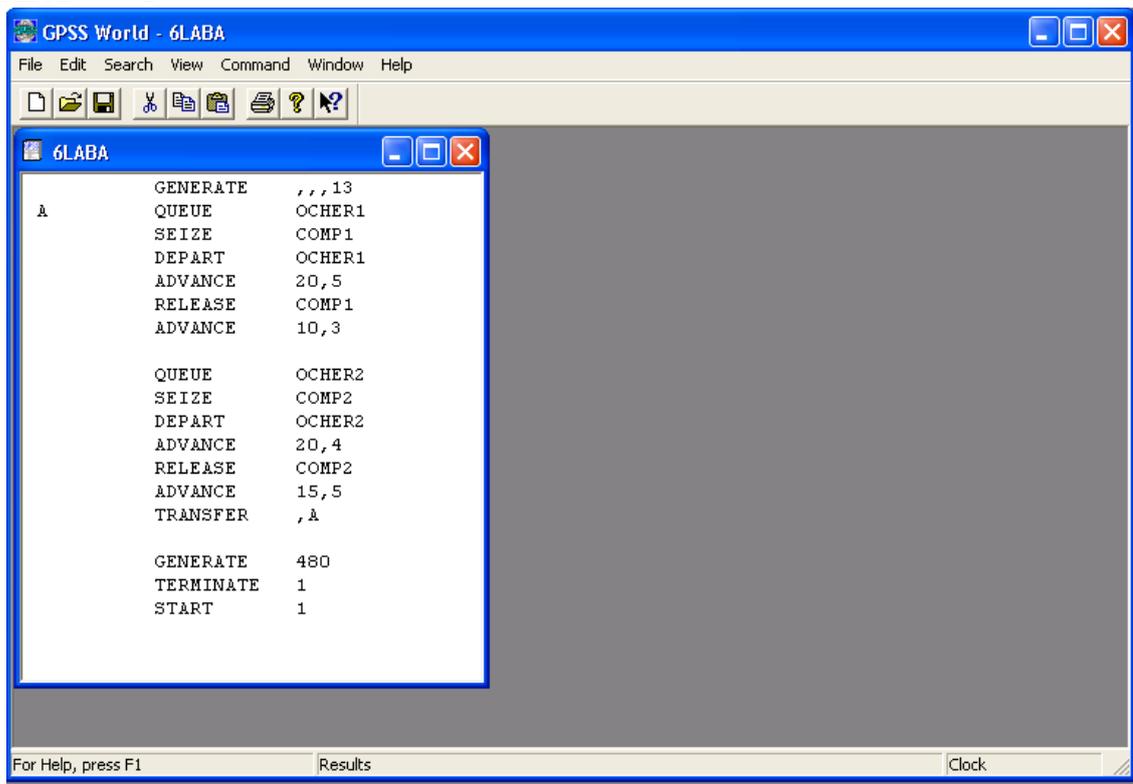
ADVANCE 15,5

TRANSFER ,A

GENERATE 480

TERMINATE 1

START 1





GPSS World Simulation Report - 6LABA.6.1

Sunday, October 25, 2009 11:05:12

| START TIME | END TIME | BLOCKS | FACILITIES | STORAGES |
|------------|----------|--------|------------|----------|
| 0.000 | 480.000 | 16 | 2 | 0 |

| FACILITY | ENTRIES | UTIL. | AVE. TIME | AVAIL. | OWNER | PEND | INTER | RETRY | DELAY |
|----------|---------|-------|-----------|--------|-------|------|-------|-------|-------|
| COMP1 | 25 | 1.000 | 19.200 | 1 | 13 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| COMP2 | 22 | 0.919 | 20.049 | 1 | 10 | 0 | 0 | 0 | 1 |

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY(O) | AVE.CONT. | AVE.TIME | AVE.(-O) | RETRY |
|--------|-----|-------|-------|----------|-----------|----------|----------|-------|
| OCHER1 | 12 | 8 | 33 | 1 | 9.364 | 136.200 | 140.456 | 0 |
| OCHER2 | 2 | 1 | 23 | 2 | 0.603 | 12.592 | 13.792 | 0 |

START TIME (Начальное время)

END TIME (Время окончания)

BLOCKS (Число блоков)

FACILITIES (Число каналов обслуживания)

STORAGES (Число накопителей)

Ниже указываются результаты моделирования для каналов обслуживания (FACILITY) COMP1 и COMP2:

ENTRIES (Число входов)

UTIL. (Коэффициент использования)

AVE. TIME (Среднее время обслуживания)

AVAIL. (Доступность)

OWNER

PEND

INTER

RETRY (Повтор)

DELAY (Отказ)

Ниже указываются результаты функционирования очереди (QUEUE) OCHER1 и OCHER2:

MAX (Максимальное содержание)

CONT. (Текущее содержание)

ENTRY (Число входов)

ENTRY(O) (Число нулевых входов)

AVE.CONT. (Среднее число входов)

AVE.TIME (Среднее время)

AVE.(-O)

RETRY

Ещё ниже указывается значение сохраняемой величины (SAVEVALUE) по имени MASH. При этом выводятся следующие результаты:

RETRY

VALUE (Значение)

коэффициент использования первого и второго каналов обслуживания; 1, 0,919

среднее время пребывания запроса в каналах; 19,200 20,049

максимальное содержимое очереди запросов на обработку в первое и второе устройство;

среднее содержимое очереди запросов на обработку в первое и второе устройство; 12 2

общее число входов заявок в очередь, то есть поступлений запросов на обслуживание в течении работы системы; 33

среднее время пребывания заявки в очередях. 136,200 12,592

Лабораторная работа N2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОКАНАЛЬНЫХ БЕСПРИОРИТЕТНЫХ СИСТЕМ

Цель работы: изучение средств языка GPSS для построения имитационных моделей одноканальных беспriorитетных систем. Исследование моделей на ЭВМ, обработка результатов моделирования.

Пример 1: составить задание на моделирование прохождения заявок, которые могут обрабатываться на одном из двух устройств, причем предпочтительнее на первом. Поступление заявок по равномерному закону распределения с интервалом [6,10] единиц времени, время обработки на первом устройстве в интервале [2,8], на втором - [5,9].

| | | |
|------|-----------|----------------|
| | GENERATE | 8,2 |
| | TRANSFER | BOTH,OAA1,OAA2 |
| OAA1 | SEIZE | OA1 |
| | ADVANCE | 5,3 |
| | RELEASE | OA1 |
| | TRANSFER | ,OUT |
| OAA2 | SEIZE | OA2 |
| | ADVANCE | 7,2 |
| | RELEASE | OA2 |
| OUT | TERMINATE | 1 |

Пример 2: исследовать модель, где заявки поступают на обработку в устройство с ограниченным числом мест в очереди, равным 3. Если очередь заполнена, то заявка покидает систему (рис. 3).

| | | |
|-----|----------|---------|
| MEM | STORAGE | 3 |
| | GENERATE | 8,2 |
| | GATE SNF | MEM,OUT |
| | ENTER | MEM |
| | SEIZE | DEV |
| | LEAVE | MEM |

| | | |
|-----|-----------|------|
| | ADVANCE | 10,4 |
| | RELEASE | DEV |
| OUT | TERMINATE | 1 |

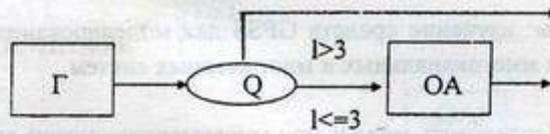


Рис. 3

Порядок выполнения работы

1. Изучить описание лабораторной работы и примеры моделирования.
2. Подготовить и выполнить моделирование задания из примера 1 в двух вариантах: при использовании блока TRANSFER (пример 1) и при использовании блока GATE (самостоятельно).
3. Подготовить и выполнить моделирование задания из примера 2 в двух вариантах: при использовании блока GATE (пример 2) и блока TRANSFER (самостоятельно).
4. Используя операторы RESET и CLEAR выполнить моделирование при различных значениях соотношений времен обслуживания в ОА1 и ОА2 (пример 1) и емкости накопителя (пример 2).
5. Выполнить анализ результатов и подготовить отчет о работе с приведением текстов заданий и выводов по результатам моделирования двух вариантов исполнения программ.

Контрольные задания

1. Операторы TRANSFER и GATE, различие между ними.
2. Объяснить разницу или совпадение результатов моделирования в двух вариантах 1-го и 2-го примеров.

Лабораторная работа N3

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Цель работы: изучение средств GPSS для моделирования и исследования характеристик многоканальных и многомерных систем.

Пример 1. Исследовать модель при многомерном потоке заявок на входе системы и одном обрабатывающем устройстве. Рассмотрим пример решения задачи при двух потоках на входе, одном обслуживающем аппарате и очереди к нему (рис. 4):

```
GEN2  GENERATE 30,5
      TRANSFER ,GEN2
      GENERATE 20,5
      QUEUE   QOA
      SEIZE   OA
      DEPART  QOA
      ADVANCE 10,5
      RELEASE OA
      TERMINATE 1
```

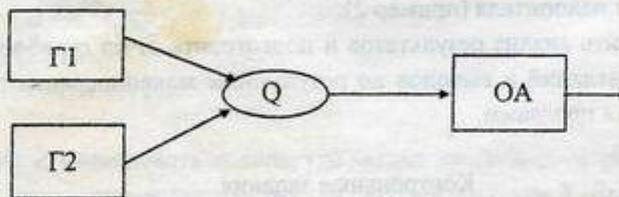


Рис. 4

Пример 2. Исследовать характеристики многоканальной системы. Рассмотрим пример решения задачи при трех идентичных каналах обслуживания с общей очередью к ним (рис. 5):

```
SYST  STORAGE 3
      GENERATE 10,5
```

| | |
|-----------|-------|
| QUEUE | QSYST |
| ENTER | SYST |
| DEPART | QSYST |
| ADVANCE | 15,5 |
| LEAVE | SYST |
| TERMINATE | 1 |

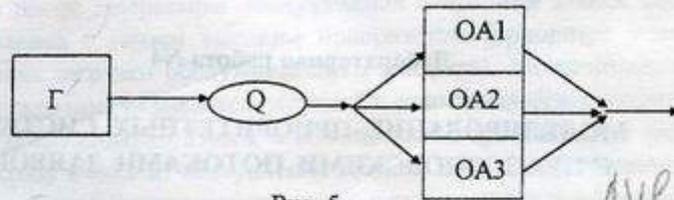


Рис. 5

Порядок выполнения работы

1. Изучить представленные в заданиях к работе примеры моделирования.
2. Исследовать характеристики (коэффициент использования оборудования, средняя и максимальная длина очереди) модели примера 1 при разном числе (2,3,4) источников заявок на входе.
3. Изменить модель примера 1, включив в нее ограничение длины очереди и покидание заявкой системы при превышении данного ограничения. Организовать в модели подсчет покинувших необработанных заявок. Исследовать модель (число покинувших заявок) при различной ограничивающей длине очереди (5,10,15) и при разном числе (2,3,4) источников заявок.
4. Исследовать характеристики (время ожидания, средняя и максимальная длина очереди) модели примера 2 при разном числе (2,3,4,5) обслуживающих аппаратов.
5. Исследовать многоканальную систему обслуживания с потерями, изменив модель примера 2. Работа системы с потерями характеризуется покиданием заявкой системы, если все обслуживающие аппараты (накопитель, память) заняты. Организовать подсчет покинувших заявок. Исследовать зависимость числа покинувших заявок от числа (2,3,4,5) обслуживающих аппаратов.

*Ave. Time
MAX. EV. Count*

Контрольные задания

1. Оператор STORAGE и его использование для моделирования очереди с ограниченной длиной и многоканального обслуживания.
2. Объяснить результаты моделирования.

Лабораторная работа N4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИОРИТЕТНЫХ СИСТЕМ С ПУАССОНОВСКИМИ ПОТОКАМИ ЗАЯВОК

Цель работы: изучение средств GPSS для моделирования и исследование характеристик моделей приоритетного обслуживания, исследование пуассоновских потоков событий, оценка точности моделирования.

Краткие теоретические сведения

Поток событий, наступающих одно за другим в случайные моменты времени, является пуассоновским простейшим, если вероятность появления события K за время T определяется законом Пуассона. Время T между двумя событиями в пуассоновском потоке распределено по экспоненциальному распределению интервалов, соответствующих появлению очередного события. Для экспоненциального распределения в системе GPSS можно воспользоваться функцией вида:

```
EXP      FUNCTION  RN1,C24
0,0/.1,.104/.2,.222/.3,.355/.4,.509/.5,.69/.6,.915
.7,1.2/.75,1.38/.8,1.6/.84,1.83/.88,2.12/.9,2.3/.92,2.52
.94,2.81/.95,2.99/.96,3.2/.97,3.5/.98,3.9/.99,4.6/.995,5.3
.998,6.2/.999,7.0/.9997,8.0
      GENERATE  10,FNSEXP
```

Здесь первый операнд блока GENERATE 10 означает средний интервал между двумя последовательными событиями.

Рассмотрим систему, состоящую из одного обслуживающего прибора (им может быть процессор ЭВМ) с многомерным потоком заявок на входе.

Преимущество при обслуживании заявок одного потока над заявками другого называется приоритетом. Различают три стратегии приоритетного обслуживания: бесприоритетная, с относительными и абсолютными приоритетами.

1. При бесприоритетном (или равном у всех заявок приоритетом) обслуживании заявки всех потоков поступают в конец общей очереди. После завершения обслуживания заявки в приборе из очереди выбирается заявка, поступившая раньше других (первая в очереди).

2. Если после завершения обслуживания очередной заявки следующей выбирается заявка с самым высоким приоритетом (приоритет учитывается только в момент загрузки обслуживающего аппарата), соответствующая дисциплина обслуживания называется системой с относительным приоритетом.

3. При обслуживании заявок с абсолютными приоритетами (приоритет учитывается сразу в момент поступления заявки). Если на обслуживании находится заявка с более низким приоритетом, она снимается с обслуживания, а прибор занимает поступившая заявка. Заявка, обслуживание которой было прервано, может быть затем дообслужена либо с точки прерывания, либо с начала, когда будут обслужены заявки с более высокими приоритетами.

Пример: построить модель обслуживания в системе с относительными приоритетами и с тремя пуассоновскими потоками заявок на входе (с приоритетами 3,2,1 соответственно), одном обслуживающем аппарате и очереди к нему:

```

EXP      FUNCTION      RN1,C24
0,0/.1,.104/.2,.222/.3,.355/.4,.509/.5,.69/.6,.915
.7,1.2/.75,1.38/.8,1.6/.84,1.83/.88,2.12/.9,2.3/.92,2.52
.94,2.81/.95,2.99/.96,3.2/.97,3.5/.98,3.9/.99,4.6/.995,5.3
.998,6.2/.999,7.0/.9997,8.0
      GENERATE      50,FNSEXP,,,3
      TRANSFER      ,IN
      GENERATE      20,FNSEXP,,,2
      TRANSFER      ,VXOD \n
      GENERATE      15,FNSEXP,,,1
IN      QUEUE      QOA
      SEIZE      OA
      DEPART      QOA
      ADVANCE      10,FNSEXP
      RELEASE      OA
      TERMINATE      1
  
```

Порядок выполнения работы

1. Изучить представленные в работе теоретические сведения и пример моделирования.
2. Исследовать и построить таблицу распределения пуассоновского потока заявок (по аналогии с лабораторной работой N1).
3. Исследовать характеристики систем при трех пуассоновских процессах на входе (см. пример) для случаев:
 - а) беспriorитетная система;
 - б) система с относительными приоритетами;
 - в) система с относительными приоритетами, но с отдельными очередями для каждого приоритета.

Контрольные задания

1. Три вида приоритетных систем и способы их моделирования в GPSS.
2. Объяснить результаты моделирования.
3. Объяснить таблицу пуассоновского распределения и сравнить ее с равномерным распределением.

Библиографический список

1. Шрайбер Т.Д. Моделирование на GPSS. М.: Машиностроение, 1980. 278 с.
2. Голованов О.В., Дуванов С.Г., Смирнов В.Н. Моделирование сложных дискретных систем на ЭВМ третьего поколения. М.: Энергия, 1978. 326 с.
3. Системы автоматизированного проектирования: В 9 кн. Кн. 7: Лабораторный практикум/ Под ред. И.П.Норенкова. М.: Высш. шк., 1986. 143 с.
4. Жирков В.Ф. Методы и алгоритмы оптимизации нелинейных задач: Учеб. пособие / Владим. политехн. ин-т. Владимир, 1986. 84 с.
5. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Лабораторный практикум. М.: Высш.шк., 1990. 80 с.