

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Иркутский государственный аграрный университет им. А.А.Ежевского

ЭЛЕКТРОНИКА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
КНИГА 2

Иркутск 2016 г.

УДК [621.3(075.5)+696.6+621.315.29+621.315.68]

ББК [31.279-04: 31.279.2]

Электроника: учебное пособие: в 2 кн. КН2 / А.Д.Епифанов, О.Н.Шпак, А.Г. Черных. – 2-е изд., испр. и доп. – Иркутск: Иркутск. гос. аграрный ун-т, 2016. – 212с.

Книга предназначена для студентов в качестве учебного пособия к лабораторным занятиям по одноименному курсу в математическом пакете MatLab+Simulink. В первом разделе учебного пособия приведены общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, краткие рекомендации по работе с математическим пакетом MatLab+Simulink. Второй раздел пособия включает в себя исследование практически всего спектра силовых преобразователей энергии, как на основе традиционных силовых ключей (тириستоров), так и с применением IGBT транзисторов.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Агроинженерия" в рамках подготовки бакалавров по профилю "Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве" и направлению "Электроэнергетика и электротехника", профиль "Электроснабжение". Может быть рекомендовано студентам обучающихся по профилю "Технические системы в агробизнесе" и "Энергообеспечение предприятий". Будет полезно инженерно-техническими работниками, специализирующимися в области наладки и эксплуатации электронных компонентов и узлов электрооборудования и средств автоматизации.

Авторы-составители: А.Д. Епифанов, О.Н.Шпак, А.Г. Черных.

Рецензенты:

Кафедра электроснабжения и электротехники энергетического института Иркутского национального исследовательского технического университета (Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор В.С. Степанов);

Генеральный директор СРО НП

«Восточно-Сибирское объединение энергоаудиторов»

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. СО РАН В.О.Головщиков

© Епифанов А.Д., Шпак О.Н., Черных А.Г.

© Иркутская государственная аграрный университет, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Значительный прогресс в развитии многих областей науки и техники обусловлен развитием электроники. В настоящее время невозможно найти какую-либо отрасль промышленности, в которой не использовались бы электронные приборы или электронные устройства измерительной техники, автоматики и вычислительной техники. Причем тенденция развития такова, что доля электронных информационных устройств и устройств автоматики непрерывно увеличивается. Это является результатом развития интегральной технологии, внедрение которой позволило наладить массовый выпуск дешевых, высококачественных микроэлектронных функциональных узлов различного назначения.

В настоящее время промышленность выпускает все электронные функциональные узлы, необходимые для создания устройств измерительной и вычислительной техники: интегральные усилители, коммутаторы, логические элементы, цифровые устройства и т.д. Типовые электронные узлы позволяют собрать нужный электронный блок без детального расчета отдельных каскадов.

В целом электроника включает в себя два направления: энергетическое (силовое), связанное с преобразованием переменного и постоянного токов для нужд электроэнергетики, металлургии, электротяги и т.д., и информационное, к которому относятся электронные средства, обеспечивающие измерения, контроль и управление различными процессами во многих инженерных и не инженерных областях.

Учебное пособие выходит в двух книга, из которых содержание первой книги представлено в виде девяти лабораторно-практических работ и служит теоретическим и практическим материалом для углубленного изучения одноименной дисциплины.

В данной книге представлены шесть лабораторных работ, выполнение которых дает возможность получить нагрузочные, регулировочные и энергетические характеристики силовых полупроводниковых преобразователей при помощи виртуального лабораторного практикума в математическом пакете MatLab+Simulink.

Раздел 1

ПРИКЛАДНЫЕ ПАКЕТЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Компьютерное моделирование физических явлений, систем и устройств является наиболее удобным и эффективным способом организации лабораторного практикума.

По сравнению с реальными лабораторными стендами, виртуальные стенды имеют ряд существенных преимуществ:

- отсутствие громоздкой контрольно-измерительной аппаратуры и макетов исследуемых схем;
- малая погрешность измерений;
- время, затрачиваемое на компьютерное моделирование, несравненно меньше времени, расходуемого на изготовление макета и выполнения его экспериментального исследования.

Специально для решения задач проектирования электронных блоков в настоящее время разработано значительное количество прикладных компьютерных пакетов. Рассмотрим подробнее некоторые из них. Для исследования и проектирования электронных блоков хорошо зарекомендовали себя прикладные пакеты, в основе которых лежит программа Pspice, которая является наиболее известной модификацией программы схемотехнического моделирования SPICE, разработанной в начале 70-х годов в Калифорнийском университете (г. Беркли). Она позволяет моделировать аналоговые и смешанные аналого-цифровые устройства и обеспечивает не только текстовый, но и графический ввод принципиальных схем в среде Windows. К этим пакетам относятся Workbench, DesignLab, Micro-Cap, OrCAD и Matlab+Simulink.

1.1 SIMULINK

1.1.1 Система моделирования Simulink

Программа Simulink является основным расширением пакета Matlab, которое позволяет осуществить блочное имитационное моделирование различных систем и устройств с применением визуально-ориентированного программирования.

Основным достоинством расширения Simulink является простота и наглядность его использования при моделировании различных устройств и систем, в том числе и электротехнических. В основном это связано с тем, что вы не имеете дел с написанием строк программы, их редактированием и отладкой, как это имеет место в MATLAB или любом ином языке высокого уровня. В Simulink используется совершенно иной подход – визуально-ориентированный. При таком моделировании используются готовые блоки, которые необходимо с помощью мыши перенести из библиотеки в окно документа Simulink, соединить линиями входы и выходы этих блоков. В результате получаем S-модель, т.е. Simulink модель, которую запускаем простым нажатием кнопки Run.

1.1.2 Состав библиотеки Simulink

Библиотека Simulink представляет собой набор различных визуальных блоков. Для доступа к ним необходимо нажать кнопку Simulink Library  на панели инструментов MATLAB. После запуска все действия выполняются в среде MATLAB+Simulink, т.е. работа с Simulink осуществляется на фоне открытого окна системы MATLAB, в котором можно наблюдать за выполняемыми операциями.

Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов (браузер библиотек) и удобный редактор блок-схем. Окно браузера библиотек показано на рис. 1.

В браузер библиотек пакета Simulink входит большое количество библиотек блоков, например:

а) Simulink – основная библиотека блоков. Она содержит библиотеку источников сигналов и воздействий, регистрирующих устройств, линейных компонентов, дискретных компонентов, математических компонентов, соединительных компонентов, математических операций и др.;

б) Simulink Extras – дополнительная библиотека, в состав которой входят дополнительные дискретные и линейные блоки, регистраторы, триггерные блоки, блоки преобразования, блоки моделирования авиационных систем;

в) пакет DSP Blockset – библиотека, предназначенная для моделирования разнообразных цифровых устройств;

г) пакет SimPower Systems – набор библиотек и компонентов, предназначенный для моделирования энергетических (силовых) систем и устройств;

д) пакет Stateflow – пакет событийного моделирования. Он позволяет представить функционирование системы на основе цепочки правил, которые задают соответствие событий и действий, выполняемых в ответ на эти события. Данный пакет предназначен для анализа, моделирования и проектирования таких систем, как: диспетчерская служба различных транспортных средств, периферийные устройства и контроллеры для компьютеров, наглядные интерактивные уроки по моделированию и проектированию систем и т.д.

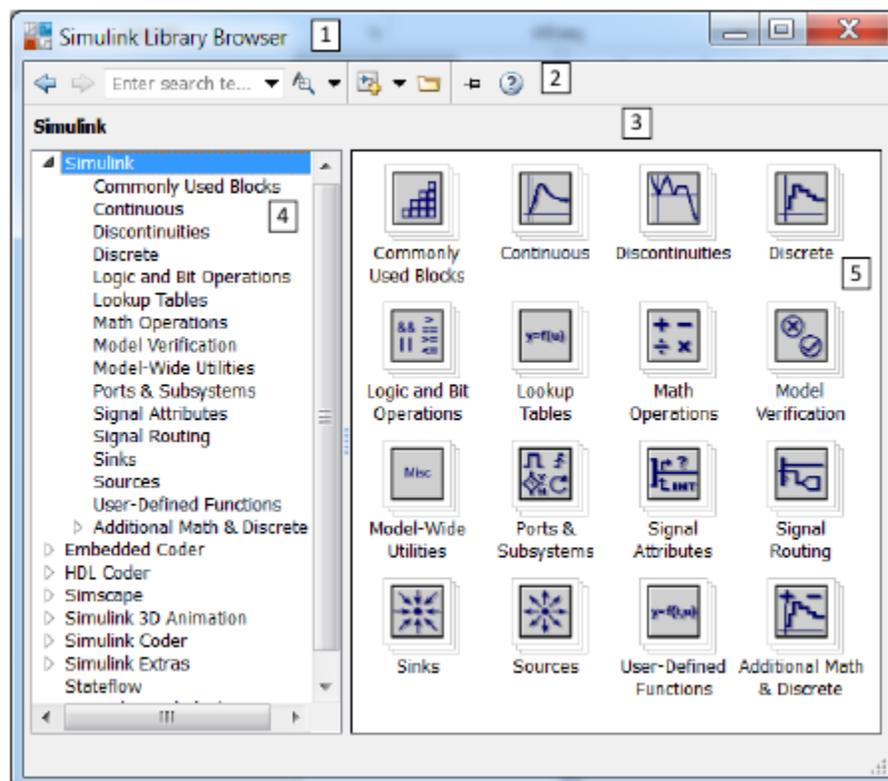
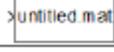


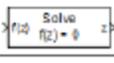
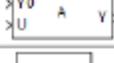
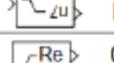
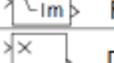
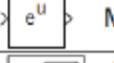
Рис.1 Окно браузера библиотеки Simulink Library Browser

Ниже представлены некоторые разделы и блоки библиотеки Simulink. Полный перечень блоков доступен в Help. Для его получения достаточно два

раза щелкнуть по любому блоку и в открытом окне параметров блока нажать кнопку Help.

Sources – источники сигналов		
1		Band-Limited White Noise Генератор белого шума.
2		Chirp Signal Генератор линейно-изменяющейся частоты.
3		Clock Источник времени.
4		Constant Источник постоянного сигнала.
5		Counter Free-Running Источник сигнала типа «счетчик».
6		Counter Limited Источник типа «счетчик с ограничением».
7		Digital Clock Дискретный источник времени.
8		Enumerated Constant Перечислимая константа.
9		From File Блок считывания данных из файла.
10		From Workspace Блок считывания данных из рабочей области MATLAB.
11		Ground Формирователь сигнала нулевого уровня.
12		In1 Входной порт.
13		Pulse Generator Источник импульсного сигнала.
14		Ramp Источник линейно-изменяющегося воздействия.
15		Random Number Источник случайного сигнала с нормальным распределением.
16		Repeating Sequence Источник периодического сигнала с интерполяцией.
17		Repeating Sequence Inter... Источник периодического сигнала.
18		Repeating Sequence Stair Источник ступенчатого периодического сигнала.
19		Signal Builder Конструктор сигналов.
20		Signal Generator Генератор сигналов.
21		Sine Wave Источник синусоидального сигнала.
22		Step Генератор ступенчатого сигнала.
23		Uniform Random Number Источник случайного сигнала с равномерным распределением.

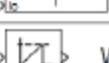
Sinks – приемники сигналов		
1	 Display	Цифровой дисплей.
2	 Floating Scope	«Плавающий» осциллограф.
3	 Out1	Выходной порт.
4	 Scope	Осциллограф.
5	 Stop Simulation	Блок остановки моделирования.
6	 Terminator	Концевой приемник.
7	 To File	Блок записи в файл.
8	 To Workspace	Блок записи в рабочую область MATLAB.
9	 XY Graph	Графопостроитель.

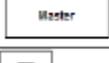
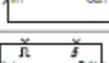
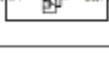
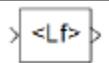
Math Operations – блоки математических операций		
1	 Abs	Блок вычисления модуля.
2	 Add	Сумматор (пиктограмма в виде прямоугольника).
3	 Algebraic Constraint	Блок алгебраического контура.
4	 Assignment	Блок присвоения элементам массива новых значений.
5	 Bias	Смещение.
6	 Complex to Magnitude-...	Блок вычисления модуля и (или) аргумента комплексного числа.
7	 Complex to Real-Imag	Блок вычисления действительной и (или) мнимой части комплексного числа.
8	 Divide	Блок деления.
9	 Dot Product	Блок скалярного умножения векторов.
10	 Find Nonzero Elements	Блок поиска ненулевых элементов.
11	 Gain	Усилитель.
12	 Magnitude-Angle to Co...	Блок расчета комплексного числа по его модулю и аргументу.
13	 Math Function	Математическая функция.
14	 Matrix Concatenate	Блок объединения сигналов в матрицу.

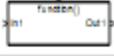
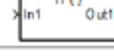
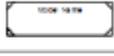
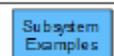
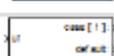
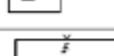
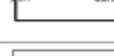
15		MinMax	Блок вычисления максимального или минимального значения с возможностью сброса.
16		MinMax Running Reset...	Блок вычисления максимального или минимального значения.
17		Permute Dimensions	Блок транспонирования.
18		Polynomial	Степенной многочлен.
19		Product	Умножитель.
20		Product of Elements	Блок вычисления произведения элементов вектора.
21		Real-Imag to Complex	Блок расчета комплексного числа по его действительной и мнимой части.
22		Reciprocal Sqrt	Блок вычисления единицы деленной на квадратный корень.
23		Reshape	Преобразователь размерности сигнала.
24		Rounding Function	Блок округления числа.
25		Sign	Блок определения знака числа. При 0 на входе 0 на выходе.
26		Signed Sqrt	Квадратный корень со знаком. Например, при $u = -2$ на выходе получим "- 1.4142".
27		Sine Wave Function	Синусоидальная функция.
28		Slider Gain	Ползунковый регулятор.
29		Sqrt	Квадратный корень
30		Squeeze	Блок сжатия.
31		Subtract	Блок вычисления разности.
32		Sum	Сумматор (круглая пиктограмма).
33		Sum of Elements	Блок вычисления суммы элементов вектора.
34		Trigonometric Function	Тригонометрическая функция.
35		Unary Minus	Унарный минус.
36		Vector Concatenate	Блок объединения векторов.
37		Weighted Sample Tim...	Блок поддержки вычислений, использующих шаг дискретизации.

Continuous – блоки непрерывных моделей			
1		Derivative	Блок вычисления производной.
2		Integrator	Интегратор.
3		Integrator Limited	Интегратор с ограничением.
4		Integrator, Second-Order	Интегратор второго порядка.
5		Integrator, Second-Ord...	Интегратор второго порядка с ограничением.
6		PID Controller	ПИД-регулятор (контроллер).
7		PID Controller (2DOF)	ПИД-регуляторы с двумя степенями свободы (<i>two-degree-of-freedom</i>).
8		State-Space	Объект пространства состояний.
9		Transfer Fcn	Передаточная функция.
10		Transport Delay	Блок фиксированной задержки сигнала.
11		Variable Time Delay	Блок управляемой задержки времени.
12		Variable Transport D...	Блок управляемой задержки сигнала.
13		Zero-Pole	Передаточная функция «нули-полюса».

User-Defined Functions – функции, задаваемые пользователем			
1		Fcn	Блок задания функции.
2		Interpreted MATLAB Fu...	Блок ввода функций или выражений MATLAB.
3		Level-2 MATLAB S-...	Блок задания S-функции второго уровня.
4		MATLAB Function	Блок создания MATLAB-функции для использования в Simulink.
5		MATLAB System	Блок для использования системных объектов.
6		S-Function	S-функция.
7		S-Function Builder	Конструктор S-функции на языке C.
8		S-Function Examples	Примеры S-функции.

Discontinuities – нелинейные блоки		
1		Backlash Люфт.
2		Coulomb & Viscous Fric... Блок сухого и вязкого трения.
3		Dead Zone Зона нечувствительности.
4		Dead Zone Dynamic Управляемая зона нечувствительности.
5		Hit Crossing Блок определения момента пересечения порогового значения.
6		Quantizer Квантователь.
7		Rate Limiter Управляемый блок ограничения сигнала.
8		Rate Limiter Dynamic Управляемый блок ограничения скорости изменения сигнала.
9		Relay Реле.
10		Saturation Ограничитель.
11		Saturation Dynamic Управляемый ограничитель.
12		Wrap To Zero Блок, выполняющий сброс сигнала до нулевого уровня.

Порты и подсистемы Ports & Subsystems		
1		Atomic Subsystem Неделимая подсистемы.
2		CodeReuseSubsystem Подсистема, имеющая общий код для всех ее экземпляров в модели.
3		Configurable Subsystem Блок конфигурации подсистем.
4		Enable Создание порта для управления подсистемой.
5		Enabled Subsystem Блок создания управляемой подсистемы, т.е. E-подсистемы.
6		Enabled and Triggered S... Управляемая уровнем и фронтом сигнала подсистема, т.е. ET-подсистема.
7		For Each Subsystem Позволяет многократно выполнять алгоритм на каждом элементе или подмассиве.
8		For Iterator Subsystem Блок создания подсистемы, выполняющей итерационные действия под управлением цикла типа for.
9		Function-Call Feedback L... Прерывает обратную связь между блоками.
10		Function-Call Generator Внешний блок управления подсистемой с запросом функции.

11		Function-Call Split	Обеспечивает разветвление сигнала.
12		Function-Call Subsystem	Блок создания подсистемы с запросом функции.
13		If	Блок условного оператора.
14		If Action Subsystem	Управляемая условием подсистема.
15		In1	Входной порт.
16		Model	Блок, обеспечивающий подключение файла к текущей модели.
17		Model Variants	Позволяет одну модель использовать как блок в другой модели.
18		Out1	Выходной порт.
19		Subsystem	Блок позволяет создать подсистему.
20		Subsystem Examples	Примеры подсистем.
21		Switch Case	Переключаемая подсистема.
22		Switch Case Action Subs...	Переключаемая активная подсистема.
23		Trigger	Создание триггерного (пускового) порта для запуска подсистемы.
24		Triggered Subsystem	Блок подсистемы с триггерной системой управления.
25		Variant Subsystem	Представляет собой подсистему с несколькими подсистемами.
26		While Iterator Subsystem	Блок создания подсистемы, выполняющей итерационные действия под управлением цикла типа While.

1.1.3 Создание, редактирование и запуск Simulink модели

Для создания Simulink модели нажимаем кнопку New model панели инструментов окна браузера (программы просмотра) библиотеки Simulink Library (рис. 1). К аналогичному результату приводят действия с вкладки основного окна MATLAB: HOME → New → Simulink Model. При этом создается пустое окно с названием файла untitled (рис. 2).

Сохраняем эту модель в новой папке, например, example_1_8, под другим названием, например, example_1_8, с расширением *.slx или *.mdl. Для этого последовательно нажимаем на панели инструментов File → Save As... и т.д.

Следует отметить, что использование кириллицы в названии файла, папки или во всём пути к файлу может стать причиной появления ошибки при сохранении модели в файле с расширением *.mdl (Не совпадают кодовые страницы операционной системы и MATLAB).

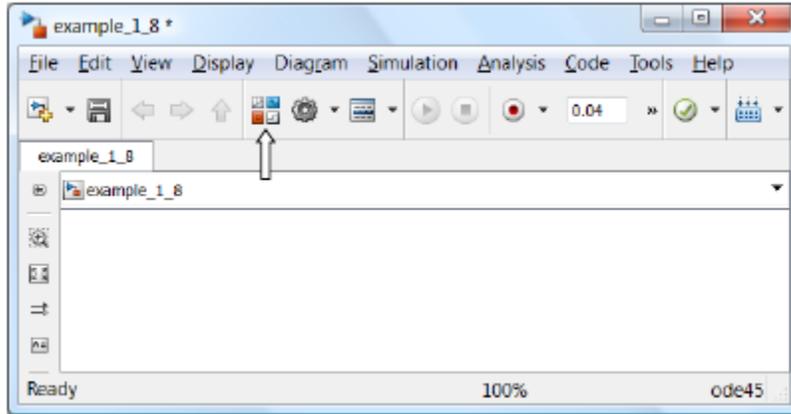


Рис. 2

Предположим, что необходимо вывести на осциллограф синусоиду с действующим напряжением 230,9 В и частотой 50 Гц.

Для этого вызываем Simulink Library Browser путем нажатия в панели инструментов на кнопку Library Browser  (рис. 2). Для удобства окно библиотеки Simulink Library Browser располагаем слева от окна модели таким образом, чтобы они не перекрывали друг друга. В принципе, окно библиотеки можно закрепить поверх остальных открытых окон, нажав на кнопку  Stay on top (Остаться на переднем плане). В библиотеке Simulink переходим в раздел Sources (источники сигналов), в котором наводим курсор на блок синусоидального сигнала Sine Wave. Затем нажимаем правую кнопку мыши, перетаскиваем этот блок к левому краю окна модели и отпускаем кнопку. Аналогично поступаем с блоком осциллографа Scope из раздела Sinks (приемники сигналов), но располагаем справа от первого блока. Теперь можно приступить к соединению выхода источника с входом приемника. Для ">" на правой стороне этого подводим курсор к маленькому треугольнику  стороне блока Sine Wave. После того, как курсор попадет в область этого треугольника его вид изменится на +. Нажимаем на левую кнопку мыши и перетаскиваем красную пунктирную линию к входу блока Sine Wave, который изображен в виде ">".

После изменения цвета и характера линии отпускаем левую кнопку. Соединение установлено (рис. 3).

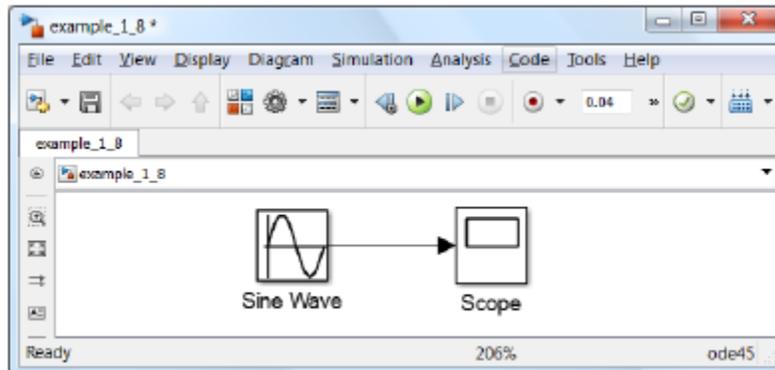


Рис. 3

Аналогичный результат можно получить, если удерживая клавишу Ctrl, вначале выделить первый блок, а после – второй. Для устранения линии связи достаточно её выделить и нажать Delete.

Следует отметить, что для удобного размещения блоков модели в окне Simulink можно воспользоваться кнопкой  на боковой панели инструментов или роликом мыши.

Далее два раза щелкаем левой кнопкой мыши по блоку Sine Wave. В раскрывшемся окне Source Block Parameters: Sine Wave задаем параметры синусоиды: $U_m = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot 220$; $\omega = 2\pi f = 2\pi 50$, и нажимаем на кнопку ОК (рис. 4).

В маленьком окошке, расположенном в панели инструментов, изменяем время окончания расчета 10 с на 0,04 с.

Изменим ещё одну позицию, которая задана по умолчанию, – это максимальный шаг решателя. Для этого на панели инструментов нажимаем на кнопку .

В открывшемся окне Model Configuration Parameters находим окошко Max step size и вводим значение 0,0005 (рис. 5). Такое изменение позволит получить синусоидальную кривую вместо ломаной линии, поскольку возрастет количество точек, выводимых за один период.

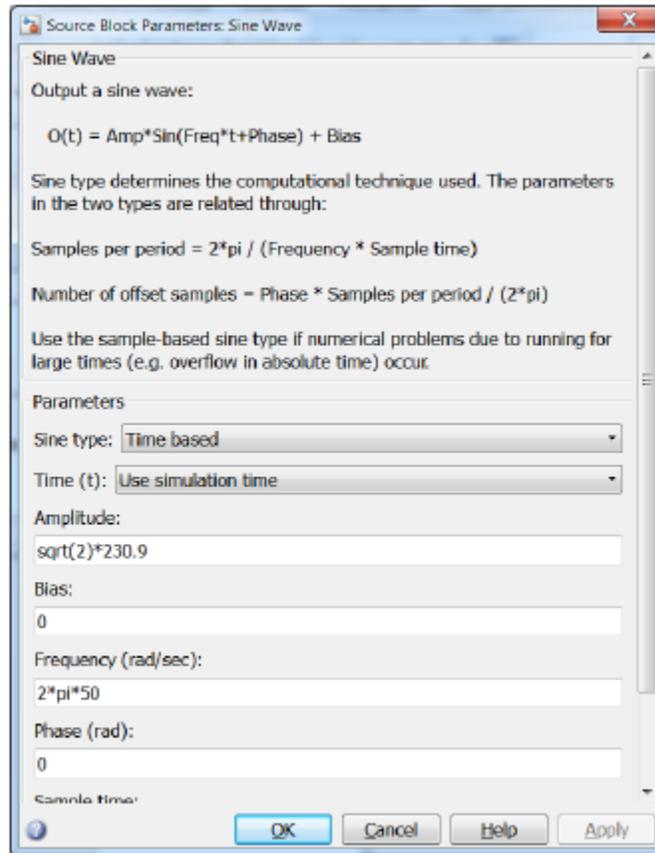


Рис. 4

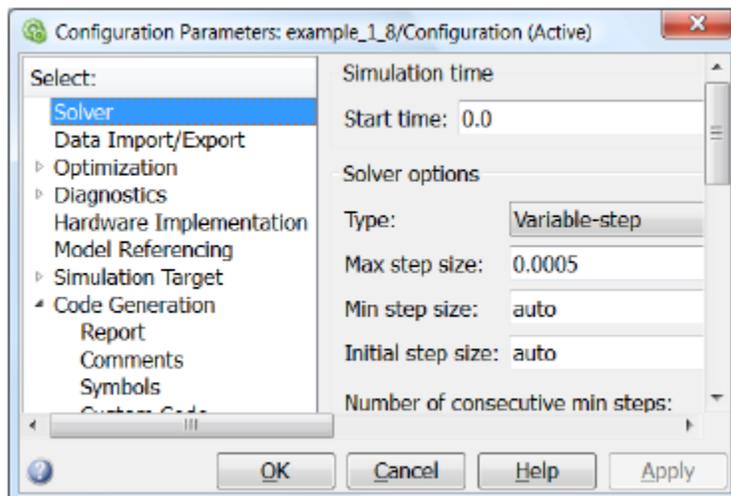


Рис. 5

Нажимаем кнопку  Run, расположенную на панели инструментов, и запускаем расчет. Результаты расчета в виде окна, представленного на рис. 6, раскрываем двойным щелчком мыши по блоку Scope. Если кривые выходят за границы осциллографа, то следует нажать кнопку  Autoscale в панели инструментов.

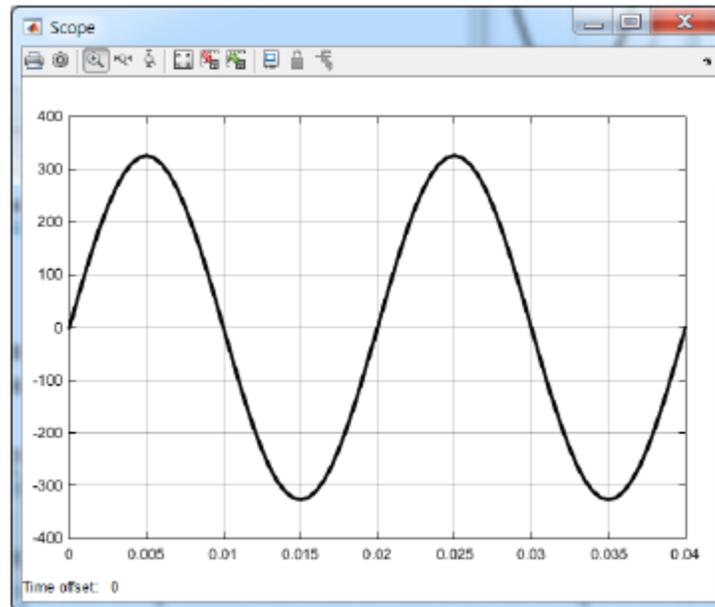


Рис. 6

В данном случае в окне осциллографа изображена черная кривая на светлом фоне, а не наоборот, как установлено по умолчанию. Для изменения стиля осциллографа необходимо нажать в панели инструментов кнопку  Parameters, затем перейти во вкладку Style и далее работать с соответствующими опциями. Единственный минус – нет доступа к шрифтам, к названиям осей. Однако следует отметить, что в старых версиях Simulink такая опция в Scope вообще отсутствовала. В любом случае, как и прежде, имеется возможность сохранять данные в файлах. Подробности – в соседней вкладке History → Save data to workspace.

Возможности Simulink для решения системы дифференциальных уравнений путем составления структурной схемы математической модели, рассмотрим на примере двигателя постоянного тока независимого возбуждения (пример 1.10). Такой двигатель описывается следующей системой электромеханического равновесия.

$$\begin{cases} u = k \cdot \hat{O} \cdot \omega + i \cdot r + L \cdot \frac{di}{dt} \\ M = M_c + J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \end{cases}$$

где r , L – соответственно активное сопротивление и индуктивность якорной цепи; k – конструктивный коэффициент; Φ – магнитный поток двигателя; J – момент инерции двигателя и нагрузки. В свою очередь электромагнитный момент и ЭДС двигателя при постоянном потоке соответственно равны: $M = c i = k \Phi i$; $e_d = k \omega \Phi = c \omega$, здесь: i – ток якоря, $c = k \Phi$; ω – угловая скорость якоря (ротора) ДПТ.

Заменим $d/dt \leftrightarrow s$ (в отечественной литературе – $d/dt \leftrightarrow p$) и перепишем исходную систему уравнений в следующем виде:

$$\begin{cases} i = (u - c \cdot \omega) \cdot \frac{1}{(L \cdot s + R)} \\ \omega = (c \cdot i - M_c) \cdot \frac{1}{(J \cdot s + 0)} \end{cases} \quad (1)$$

Модель для решения системы (1) набирается путем перетаскивания блоков из соответствующих библиотек в окно модели (рис. 7).

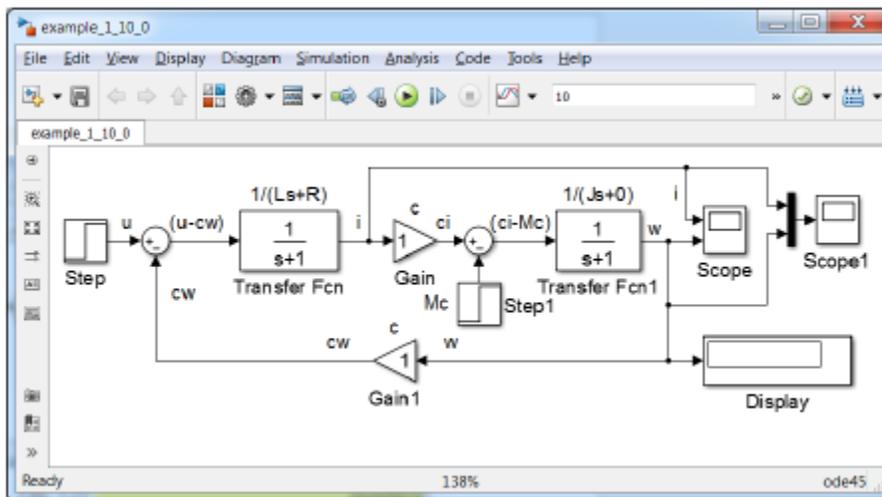


Рис. 7

Выбираем раздел Continuous, выделяем блок Transfer Fcn, нажимаем левую кнопку мыши и перетаскиваем блок в окно модели. Поскольку в модели используются два таких блока, то операцию можно повторить или скопировать

этот блок в окне модели, используя способы, которые применяются при копировании файлов в ОС Windows. Из библиотеки Math Operations потребуются блоки Gain (2 шт.) и Sum (2 шт.), а из библиотек Sinks и Sources соответственно блоки Scope (2 шт.), Step (2 шт.), блок Display, а также из раздела Signal Routing блок Mux.

Для решения первого уравнения системы (1) значение напряжения u заносим в Step, который соединяем с сумматором Sum, в котором осуществляется операция $(u - \omega s)$. Блок Sum соединяем с блоком Transfer Fcn, осуществляющим операцию $1/(R+Ls)$. Для изменения знака сигнала в сумматоре Sum необходимо два раза щелкнуть левой кнопкой мышки на Sum. В открывшемся окне в строчке List of signs изменить последний «+» на «-» и закрыть окно.

Аналогичные изменения следует внести и в блок Sum 1.

Для решения второго уравнения системы (1) ток i на выходе блока Transfer Fcn умножаем на s (с помощью блока Gain) и подаем на сумматор Sum 1. Изменение позиции входа M_c осуществляем путем введения в поле List of signs следующих символов $- + |$. Так же для осуществления операции $(s i - M_c)$ на Sum 1 подаем момент нагрузки M_c (возмущение), значение которого задаем в блоке Step 1. Блок Sum 1 соединяем с блоком Transfer Fcn 1, который реализует операцию $(1/Js+0)$. На выходе этого блока получаем угловую скорость ротора ω , значение которой подаем на осциллограф Scope и на блоке Gain 1. После умножения в этом блоке скорости ω на коэффициент s передаем полученный результат в блок Sum. Для изменения направления входа и выхода блока Gain 1 можно нажать Ctrl+I или выделить блок, нажать правую кнопку мышки и перейти Format → Flip Block. Для создания узла на линии связи необходимо подвести курсор мышки к этой линии, нажать правую кнопку и соединить новую линию с входом блока, например, с входом блока Gain 1.

Полученная структурная схема (рис. 7) полностью соответствует системе уравнений ДПТ (1). Однако она не позволяет исследовать характеристики объекта, пока его параметры не внесены в модель. Предположим, что технические данные и параметры ДПТ в номинальном режиме равны: $P_H = 2 \text{ кВт}$ – номинальная мощность; $u_H = 110 \text{ В}$ – номинальное напряжение; $n_H = 3000$

об / мин – номинальная частота вращения; $\eta_H = 0,785$ – номинальный КПД; $r=0,336\text{Ом}$ – сопротивление цепи якоря двигателя; $L= 6,6 \text{ мГн}$ – индуктивность якоря двигателя; $r_B = 265\text{Ом}$ – активное сопротивление обмотки возбуждения; $J_D = 0,011\text{кг}\cdot\text{м}^2$ – момент инерции якоря двигателя; $k_J = 1,25$ – коэффициент увеличения момента инерции за счет нагрузки, т.е. $J = k_J \cdot J_D = 0,01375\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

В этом случае вносим эти значения в соответствующие окна параметров (рис. 8).

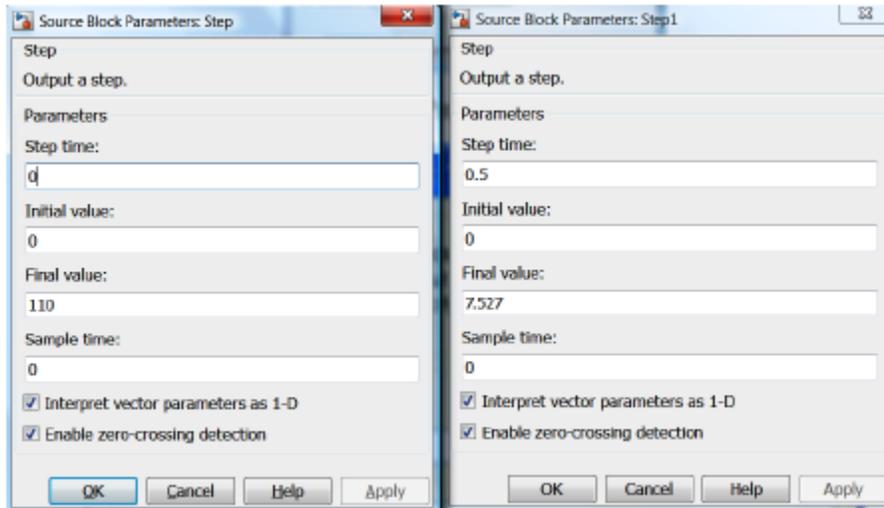


Рис. 8

В окончательном виде модель для решения системы (1) с приведенными выше техническими данными двигателя представлена на (рис. 9).

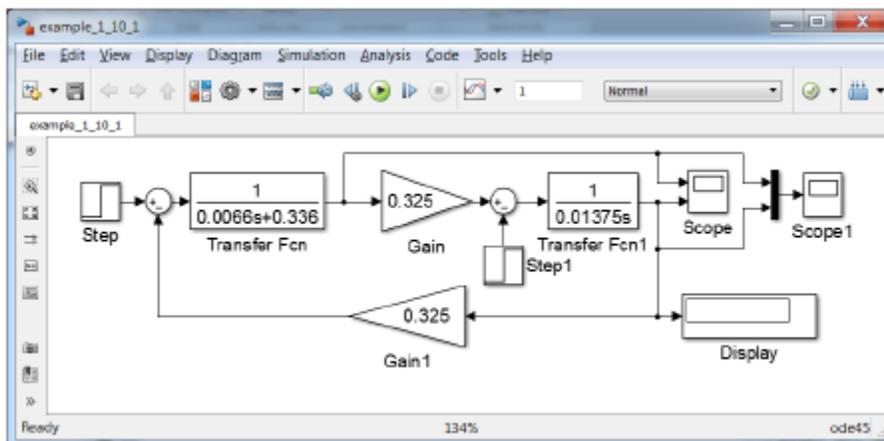


Рис. 9

Если эти численные значения не отображаются в блоках (рис. 9), то их необходимо увеличить, выделив блок и потянув его за угол, как это обычно делают с рисунками или фотографиями в редакторе.

В поле ввода Simulation stop time панели инструментов (рядом с кнопкой  Run) вводим время расчета $t=1$ (рис. 9). Можно воспользоваться и командой меню Simulation → Configuration Parameters → Stop time. В поле Step time блока Step 1. вводим время наброса нагрузки МС (возмущения), равное 0,5 с.

После этого запускаем модель, нажав кнопку  Run. Двойным щелчком левой кнопки мышки на Scope (осциллограф) визуализируем результаты расчета (рис. 10). Однако, на рис. 10 каждая кривая выведена в отдельной координатной плоскости, в первом – момент, а во втором – ток.

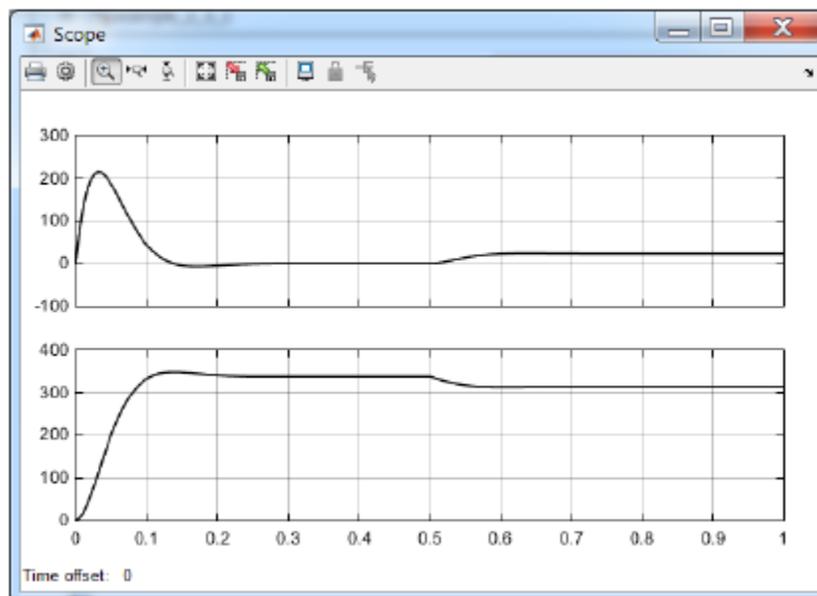


Рис. 10

Количество сигналов, которые могут быть выведены с помощью Scope, может быть любым. Для изменения количества сигналов необходимо открыть Scope, на панели инструментов Scope нажать кнопку  Parameters, затем перейти во вкладку General и ввести необходимое количество осей в окошко Number of axes (рис. 11).

Для того, чтобы вывести несколько сигналов в одной координатной плоскости, необходимо их смешать с помощью блока Mux из раздела Signal

Routing и подать этот сигнал на вход осциллографа, в нашем случае – Scope 1. При этом получим графики, представленные на рис. 12. В блоке Display (рис. 7) показано значение скорости ротора в установившемся режиме (в конце расчета).

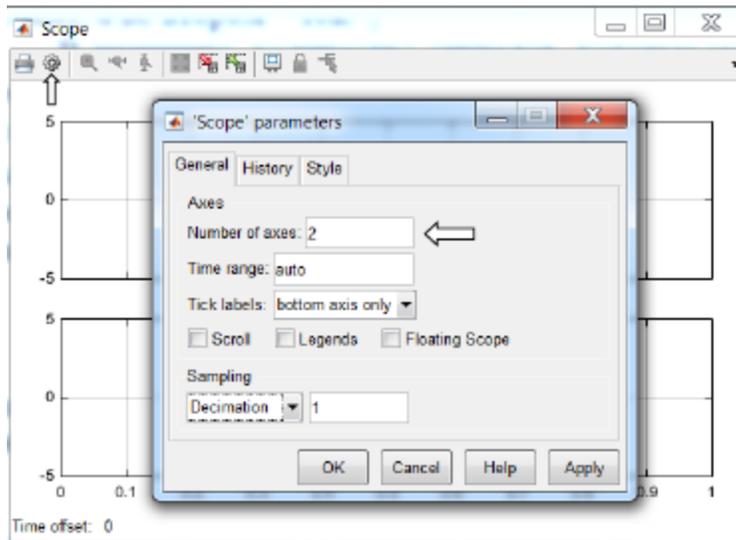


Рис. 11

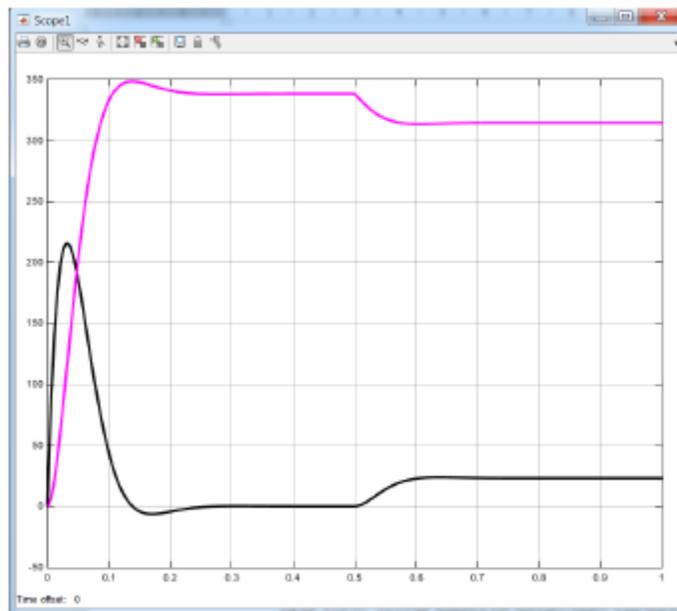


Рис. 12

Очень часто, при подготовке отчетов, возникает необходимость переноса полученных графиков в текстовый редактор, например, в Word. В этом случае,

если к качеству графиков не предъявляется особых требований, следует выделить график Score, нажать сочетание клавиш Alt+PrtScn, перейти в редактор и вставить изображение в документ, нажав Ctrl+V.

При более жестких требованиях к качеству графиков информацию следует записать в переменную, затем с неё передать информацию в Word или Excel, а после строить графики, используя возможности этих программ. Для записи в переменную нажимаем кнопку Parameters, переходим во вкладку History. Снимаем ограничение Limit data points to last, если вместо вывода заключительной части графика предполагается вывод всего графика, т.е. со значения $t=0$ (Start time) до Stop time.

Активизируем Save data to workspace, вводим имя переменной, например, ScopeData_example_1_10, выбираем формат Array (рис. 13).

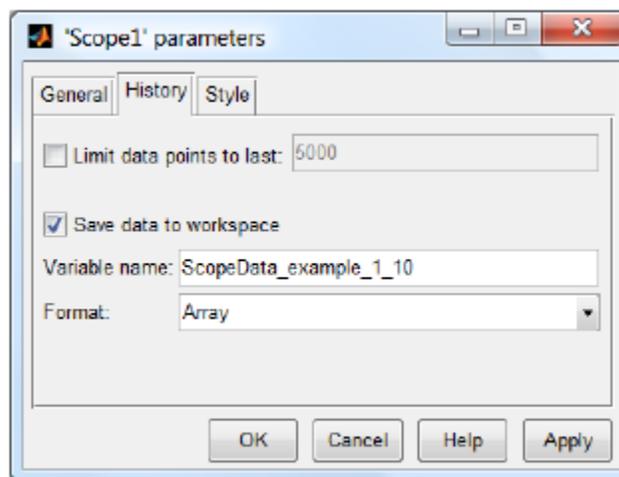


Рис. 13

После этого переходим в MATLAB. В окне Workspace нажимаем на переменную ScopeData_example_1_10. Копируем данные в «карман», нажав Ctrl+C. Запускаем Word. Во вкладке ВСТАВКА нажимаем Диаграмма, выбираем Точечная → Точечная с гладкими кривыми. Вставляем в её таблицу данные из MATLAB, нажав Ctrl+V. Далее выполняем стандартные действия по оформлению диаграммы, например, вводим название осей, легенду, подгоняем оси, изменяем шрифты и т.д. В результате получаем диаграмму, гармонично вписывающуюся в стиль редактора Word (Рис. 14).

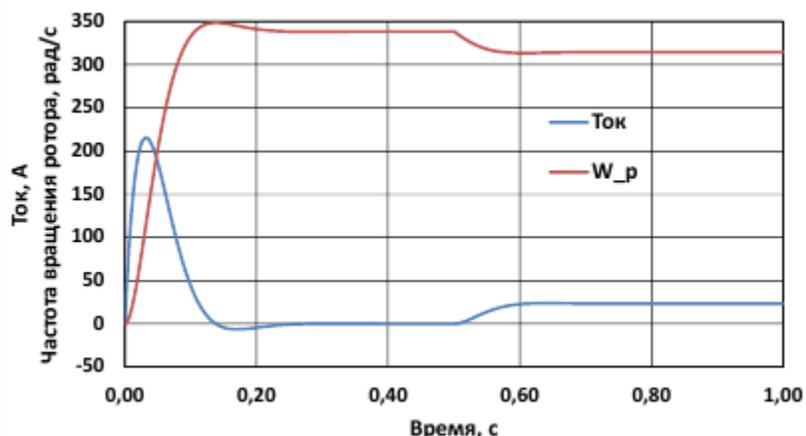


Рис. 14

1.2 SimPowerSystems

1.2.1 Система моделирования SimPowerSystems

Для моделирования электроэнергетических систем, а также устройств электротехники и промышленной электроники служит пакет расширения SimPowerSystems. В этом пакете имеются блоки большинства электротехнических элементов и устройств: трансформаторов, ЛЭП, синхронных генераторов, асинхронных двигателей, полупроводниковых элементов, преобразователей, измерительных приборов и т.д.

Методика построения моделей SimPowerSystems практически не отличается от методики построения Simulink моделей. И в том, и в другом случае используются блоки, которые соединяют между собой. Отличие же заключается в том, что в моделях Simulink это линии передачи сигнала, а в моделях SimPowerSystems линии – некие виртуальные проводники, по которым протекает виртуальный ток. Для измерения этого тока используется блок измерителя тока, который подключается в разрыв проводника (линии), а сигнал с этого блока поступает на осциллограф, дисплей или иной блок расширения Simulink.

Таким образом, эти два блока очень тесно связаны между собой.

В качестве примера (пример 1.11) рассчитаем переходной процесс при трехфазном коротком замыкании трансформатора ТМ-1000/10 без учета намагничивающей ветви (параметры трансформатора приведены в табл. 1).

Таблица 1

Тип S _{2Н} , кВА	U _{1Н} , кВ	U _{2Н} , кВ	P _{хх} , кВт	P _{кз} , кВт	I _{хх} , %	u _{кз} , %	Схема, группа соединения обмоток
ТМ 1000	10	0,4	1,9	12,2	1,7	5,5	Y/Y _н – 0

Мгновенное значение напряжения изменяется по закону:

$$u_{2xx} = \sqrt{2} \cdot U_{2\text{фазxx}} \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot t),$$

где $U_{2\text{фазxx}}$ – действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки в режиме холостого хода; f_1 – частота напряжения первичной обмотки.

Дифференциальное уравнение напряжения одной фазы трансформатора имеет следующий вид:

$$u_{2\delta\delta} = i_{\hat{e}} \cdot r_{\hat{e}} + L_{\hat{e}} \cdot \frac{di_{\hat{e}}}{dt} \quad (2)$$

Представим уравнение (2) в виде

$$\frac{di_{\hat{e}}}{dt} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2\delta\delta} \cdot \sin(\omega t + \alpha_0) - i_{\hat{e}} \cdot r_{\hat{e}}}{L_{\hat{e}}} \quad (3)$$

Ниже по тексту представлена программа расчета переходного процесса на языке MatLab.

```
% example_1_11. Программа расчета переходного процесса
% при трехфазном коротком замыкании трансформатора.
% Вызывает функцию funa(файл:funam) с правыми частями системы
% дифференциальных уравнений.
U_2faz_XX = 230.9; f_1=50; r_k = 0.00192; L_k = 2.734e-5;;
w=2*pi*f_1 % Угловая частота сети.
Fi_k = atan(L_k*w/r_k) % Угол в треугольнике короткого
замыкания
% Начальная фаза напряжения, при которой:
% alfa_0 = Fi_k; % 1) аperiodический ток отсутствует;
% alfa_0 = Fi_k + pi/2 % 2) аperiodический и ударный токи
максимальны.
tspan = [0:0.0005: 0.1]; % Время начала, шаг вывода данных,
время завершения.
y_0 = [0]; % Начальные значения переменных.
```

```

options =[]; % Опции решателя – по умолчанию.
[T,Y]=ode45(@funa, tspan, y_0, options, U_2faz_XX, w, r_k, L_k, alfa_0);
u = sqrt(2)*U_2faz_XX*sin(w*T + alfa_0);
plotyy(T,Y,T,u) % Построение графиков по двум осями, т.е.
Y=f(T) и u=f(T).
grid on % Сетка.
% Функция правых частей СДУ funa (файл: funa.m) для программы
example_1_11.
function dydt= funa(t, y, U_2faz_XX, w, r_k,L_k, alfa_0)%
Объявление матрицы dydt
dydt=zeros(1,1); % Инициализация заданной матрицы
dydt(1) = (sqrt(2)*U_2faz_XX*sin(w*t + alfa_0) –
r_k*y(1))/L_k; % Уравнение (2)
end

```

Результаты расчета тока короткого замыкания при благоприятной фазе напряжения ($\alpha_0 = \varphi_k = \arctg(\omega L_k/r_k) = 1,3509$) представлены на рис. 15, при неблагоприятной ($\alpha_0 = \varphi_k + \pi/2 = 1,3509 + \pi/2 = 2,9217$) – на рис. 16. В последнем случае, при $t = \pi / \omega = 0,01$ с, ударный ток достигает максимального значения.

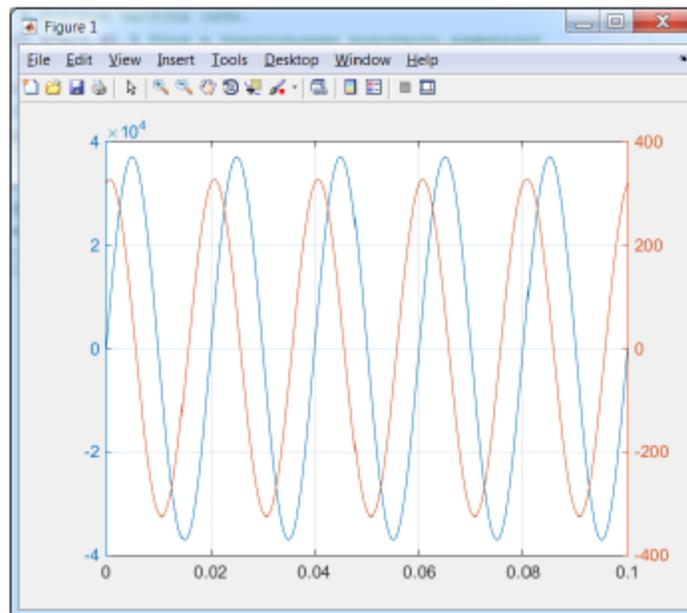


Рис. 15

Следует отметить, что при появлении ломаной линии вместо синусоидальной кривой, необходимо уменьшить шаг вывода данных в `tspan`.

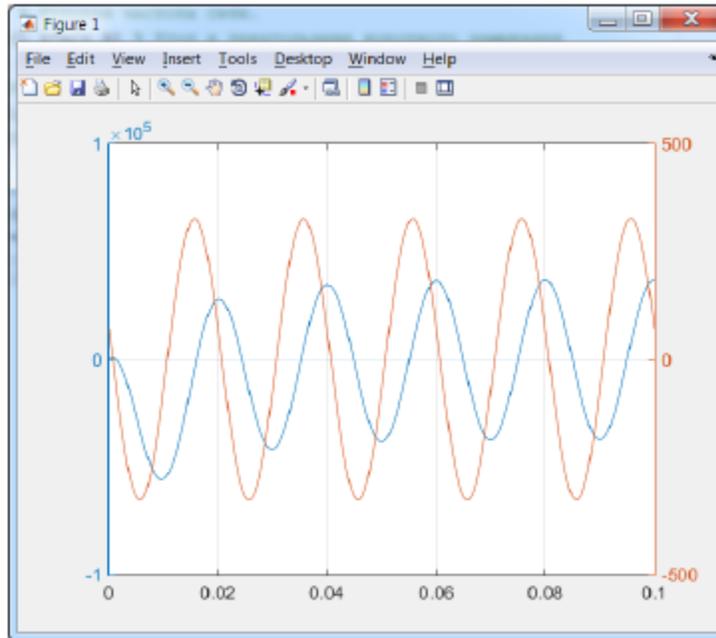


Рис. 16

1.2.2 Создание, редактирование и запуск модели *SimPowerSystems*

Рассмотрим, как можно решить задачу Примера 1.11 с помощью блоков *SimPowerSystem*.

Запускаем MATLAB, нажимаем на панели инструментов кнопку *Library Browser* , в панели инструментов библиотеки нажимаем на кнопку *New model*. При этом создается пустое окно с названием файла `untitled`. Сохраним это окно в новой папке, например, `example_1_11`, под названием `example_1_11`, с расширением файла `*.slx` или `*.mdl`. Для этого нажимаем на панели инструментов `File` → `Save As...` и т.д. Следует еще раз напомнить, что использование кириллицы в названии файла, папки или во всём пути к файлу может стать причиной появления сообщения об ошибке при сохранении модели в формате `*.mdl` (Не совпадают кодовые страницы операционной системы и MATLAB).

После этого переходим к окну библиотеки блоков *Library Browser*, если оно не перекрыто другими окнами. В противном случае, на панели

инструментов окна модели следует нажать кнопку Library Browser  и закрепить его поверх остальных открытых окон, нажав на кнопку  Stay on top.

В списке разделов библиотеки переходим к папке Simscape → SimPowerSystems → Specialized Technology → Electrical Sources (рис. 17).

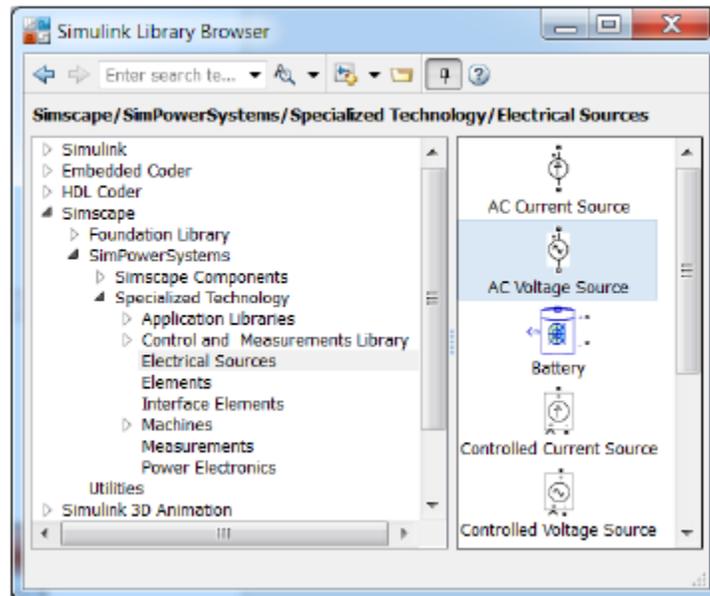


Рис. 17

В этом разделе (папке) выбираем источник переменного напряжения AC Voltage Source (Alternate Current – переменный ток) и перетаскиваем его в окно модели. Для измерения тока нам потребуется блок Current Measurement, который находится в разделе Measurements (рис. 18). Этот блок также перетаскиваем в окно модели.

Блок измерения тока Current Measurement при его включении в цепь SimPowerSystems вырабатывает сигнал, который может подаваться на любой приемник расширения Simulink. Остановим свой выбор на блоке Scope и перенесем его из библиотеки в окно модели.

В данном случае ток короткого замыкания ограничивается только активно-индуктивным сопротивлением короткого замыкания трансформатора. В связи с этим, при создании модели воспользуемся блоком Series RLC Branch (последовательная RLC ветвь), который находится в разделе Elements (рис. 19).

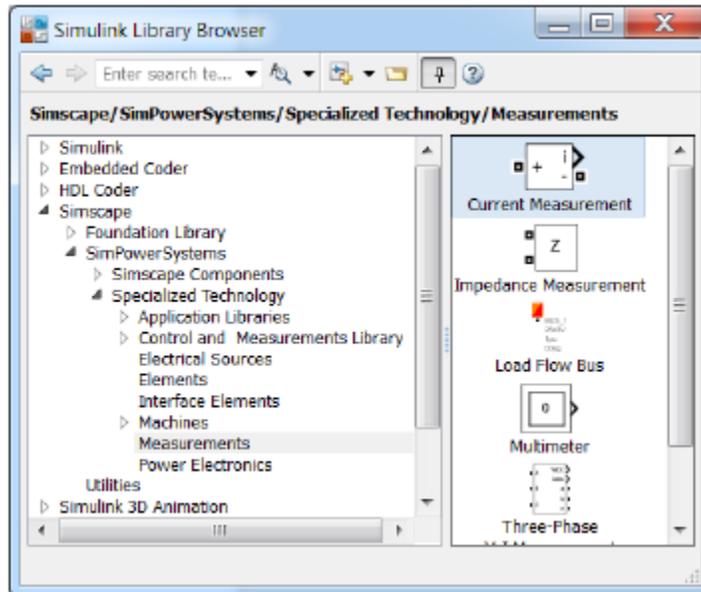


Рис. 18

Поскольку блоки SimPowerSystems отличаются от блоков Simulink, то отличаются и способы их подключения. Так, в блоках Simulink выход и вход обозначены треугольником "▷" и знаком больше ">", т.е. сигнал передается от выхода к входу. В блоках SimPowerSystems условные клеммы для подключения блоков SimPowerSystems обозначены квадратом "□".

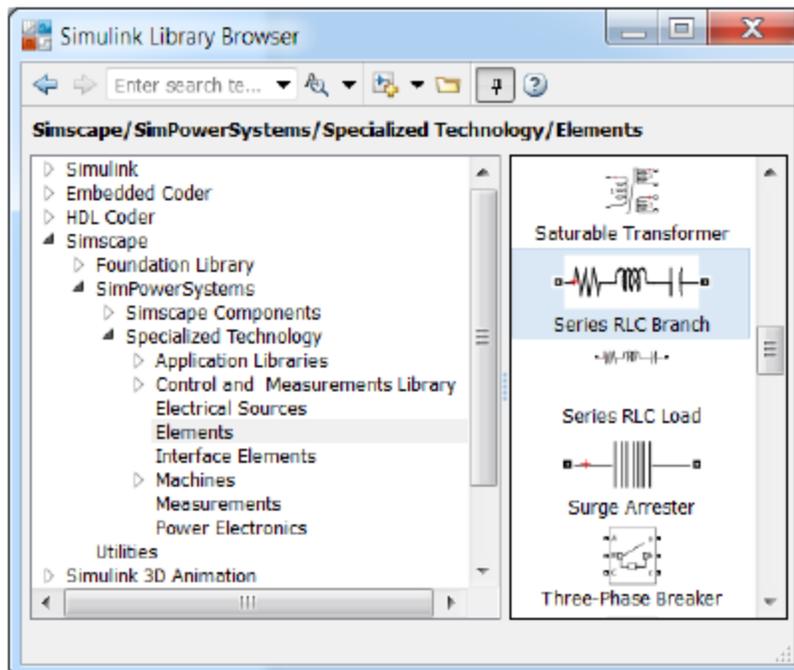


Рис. 19

После того, как все блоки соединены, вводим из Примера 1.11 в соответствующие блоки значения напряжения сети и параметры короткого замыкания трансформатора (рис. 20). Устанавливаем время расчета 0,1 с. Для работы модели необходимо установить ещё один блок, который называется Powergui block и находится в разделе Specialized Technology. Как и в случае с Simulink необходимо установить в решателе максимальный шаг равный 0,0005 с (рис. 5).

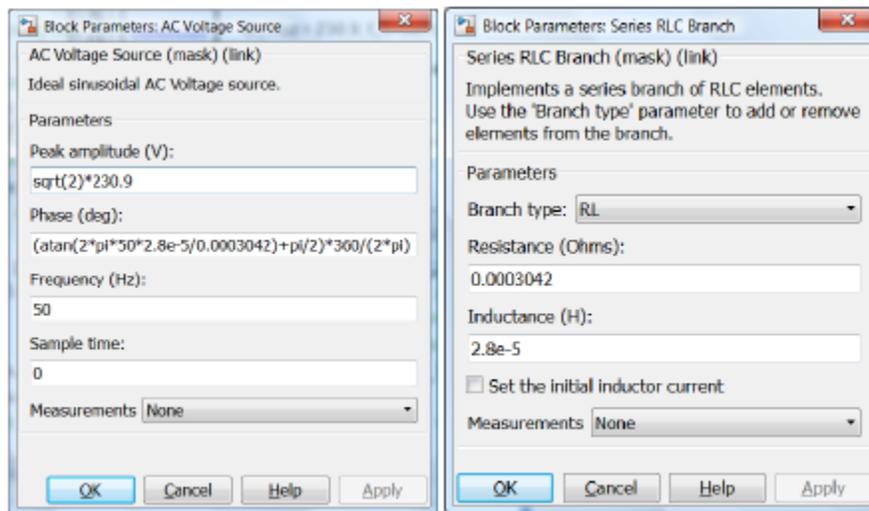


Рис. 20

В итоге получается модель, показанная на рис. 21. Следует отметить, что результаты работы этой модели (рис. 22) совпали с результатами расчета, которые были осуществлены средствами MATLAB, представленными на рис. 16.

Сравнительный анализ всех трех подходов показывает, что наиболее комфортным является моделирование в расширениях Simulink и SimPowerSystems, т.к. в них процесс создания модели сводится к элементарному соединению необходимых блоков, заданию их параметров и настройке решателя. В отличие от Simulink, блоки SimPowerSystems наиболее близки реальным элементам и объектам электротехники, что позволяет говорить о его неоспоримых преимуществах при моделировании электротехнических систем и устройств.

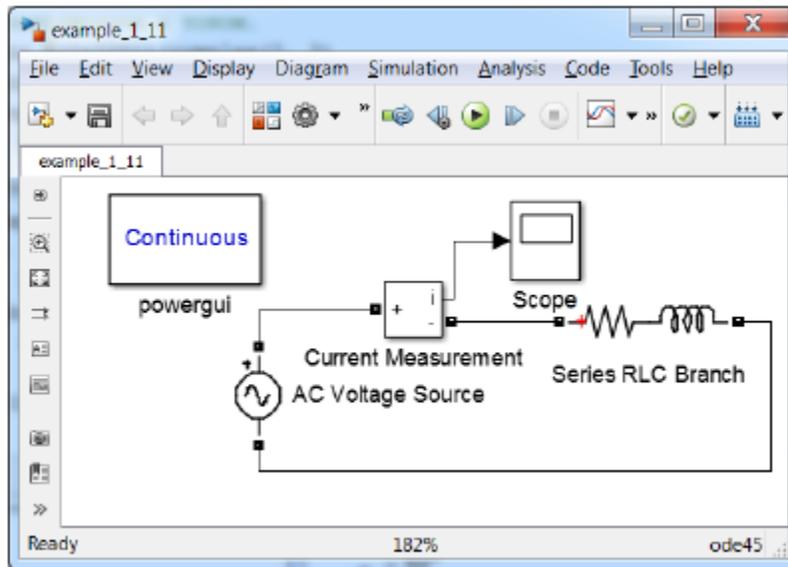


Рис. 21

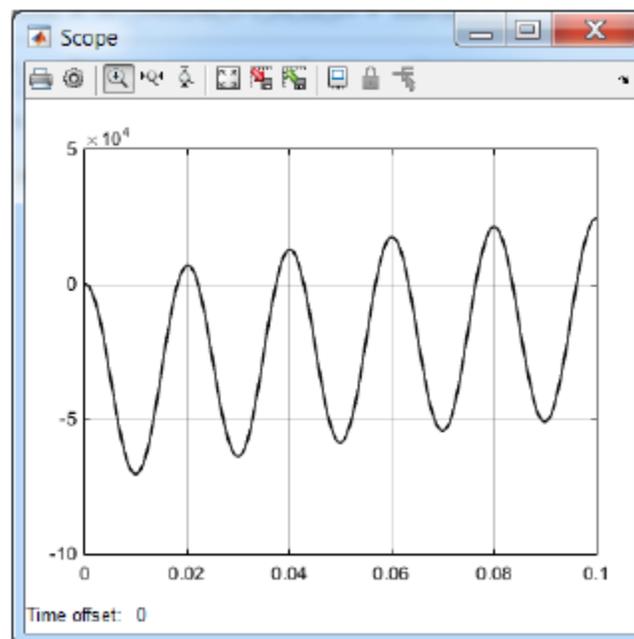


Рис. 22

При оценке эффективности любого стандартного языка программирования определяющее значение имеет количество доступных функций в его библиотеках. В этом плане эффективность MATLAB не вызывает сомнений, поскольку расширения системы MATLAB+Simulink, которых более 80, имеют в своем составе огромное количество специализированных блоков,

позволяющих создать модель всего объекта с учетом взаимодействия его узлов различной физической природы.

Например, в модели автомобиля с помощью расширений SimMechanics, SimDriveline и SimPowerSystems учитывается взаимодействие механических и электрических узлов. Далее кратко рассмотрим библиотеку блоков расширения SimPowerSystems Specialized Technology (рис. 23).

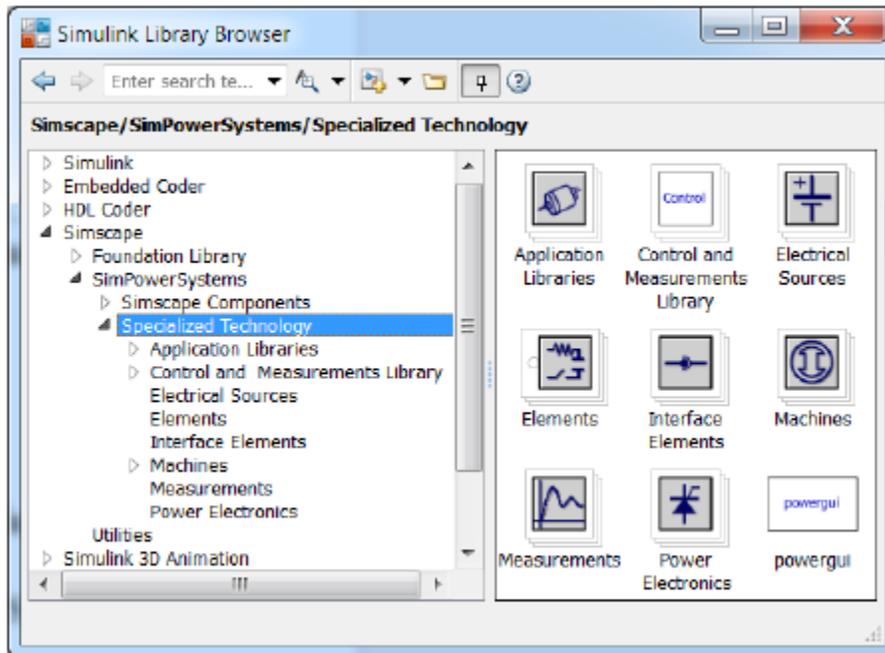


Рис. 23

1.2.3 Состав библиотек SimPowerSystems Specialized Technology

В состав библиотеки входят следующие разделы (рис. 23):

1) Application Libraries – библиотеки блоков прикладного характера представлены на рис. 24 (Глубина раскрытия подпунктов библиотек зависит от актуальности представленных в них блоков):

1.1 Electric Drives library – библиотека электроприводов:

1.1.1 AC drives – электроприводы переменного тока:

– Brushless DC Motor Drive – электропривод на базе бесконтактного (бесщеточного) двигателя постоянного тока, выполненного на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами;

- DTC (direct torque and flux control) Induction Motor Drive – электропривод, в котором обеспечивается прямое управление моментом и полем асинхронного двигателя;
- Field-Oriented Control Induction Motor Drive – электропривод, с полеориентированным управлением асинхронного двигателя;
- Five-Phase PM Synchronous Motor Drive – электропривод с векторным управлением 5-ти фазного синхронного двигателя с постоянными магнитами;
- PM Synchronous Motor Drive – электропривод с векторным управлением синхронного двигателя с постоянными магнитами;
- Self-Controlled Synchronous Motor Drive – электропривод с вентильным синхронным двигателем;
- Six-Step VSI (voltage source inverter) Induction Motor Drive – электропривод с АД на основе шести шагового инвертора напряжения;
- Space Vector PWM (pulse width modulation) VSI (voltage source inverter) Induction Motor Drive – электропривод с векторным управлением асинхронного двигателя на основе инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией.

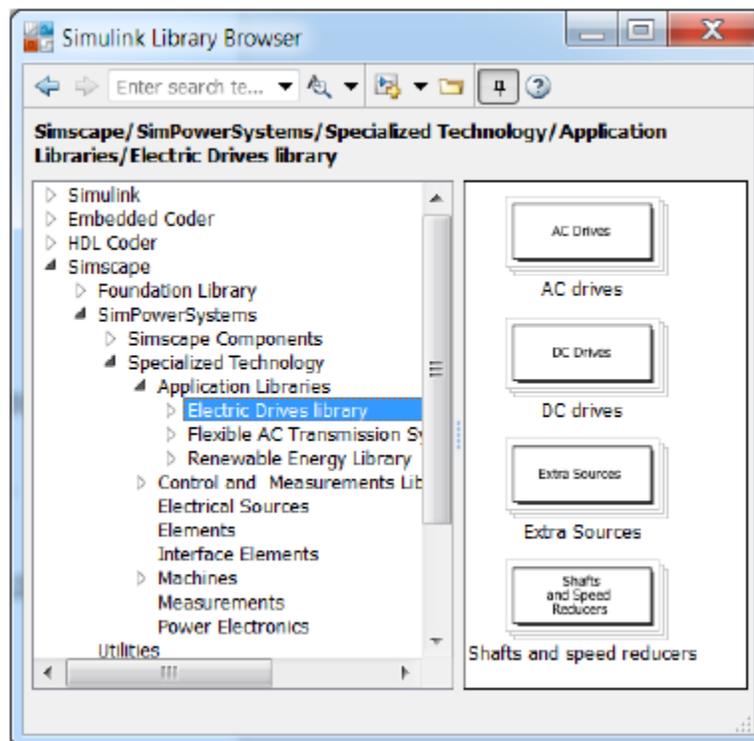


Рис. 24

1.1.2 DC drives – электроприводы постоянного тока:

- Four-Quadrant Chopper DC Drive – реверсивный электропривод постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем (ШИП);
- Four-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Drive – реверсивный электропривод постоянного тока с однофазным выпрямителем;
- Four-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive – четырех квадрантный (реверсивный) электропривод постоянного тока с трехфазным выпрямителем;
- One-Quadrant Chopper DC Drive – одно-квадрантный электропривод постоянного тока с ШИП;
- Two-Quadrant Chopper DC Drive – двухквадрантный (нереверсивный) электропривод постоянного тока;
- Two-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Drive – двухквадрантный (нереверсивный) электропривод постоянного тока с однофазным выпрямителем;
- Two-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive – двухквадрантный (нереверсивный) электропривод постоянного тока с трехфазным выпрямителем.

1.1.3 Extra Sources – дополнительные источники:

- Battery – батарея; аккумулятор;
- Fuel Cell Stack – батарея топливных элементов;
- Supercapacitor – суперконденсатор.

1.1.4 Shafts and speed reducers – валы и редукторы.

1.2 Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Library – гибкие системы передачи переменного тока:

1.2.1 HVDC (High-Voltage Direct Current) Systems – высоковольтные системы передачи постоянного тока. Для знакомства с моделями HVDC нажимаем клавишу F1, переходим в SimPowerSystems, выбираем Examples и нужную модель. При отсутствии SimPowerSystems после F1 нажимаем на .

1.2.2 Power-Electronics Based FACTS – гибкие системы передачи переменного тока на базе силовой электроники:

- Static Synchronous Compensator (Phasor Type) (STATCOM) – статический синхронный компенсатор (Векторный тип);

- Static Synchronous Series Compensator (Phasor Type) (SSSC) – последовательный статический синхронный компенсатор (Векторный тип);
- Static Var Compensator (Phasor Type): – статический компенсатор реактивной мощности (Векторный тип);
- Unified Power Flow Controller (Phasor Type) – объединенный регулятор потока мощности (Векторный тип).

1.2.3 Transformers – трансформаторы с системой регулирования под нагрузкой (On-load tap changer – РПН).

1.3 Renewable Energy Library – библиотека возобновляемых источников энергии:

- Wind Generation – ветроэнергетическая установка (ВЭУ).

2) Control and Measurements Library – библиотека блоков контроля и измерений (рис. 25):

2.1 Additional Components – дополнительные компоненты;

2.2 Filters – фильтры;

2.3 Logic – блоки логики;

2.4 Measurements – блоки измерений (рис. 26):

- Fourier – блок преобразования Фурье;
- Fundamental (PLL-Driven) – блок определения основной гармоники путем использования фазовой автоподстройки частоты;
- Mean – вычисляет среднее значение сигнала;
- Mean (Phasor) – представляет среднее значение входного сигнала за один цикл основной гармоники в виде комплексного числа (Phasor – комплексное число, вектор на комплексной плоскости);
- Mean (Variable Frequency) – вычисляет среднее значение сигнала за один период другого сигнала, подаваемого на второй вход блока;
- Positive-Sequence (PLL-Driven) (Phase Locked Loop) – вычисляет положительную (прямую) последовательность путем использования системы фазовой автоподстройки частоты;
- Power – блок вычисления активной и реактивной мощностей по значениям синусоидальных тока и напряжения за один период;

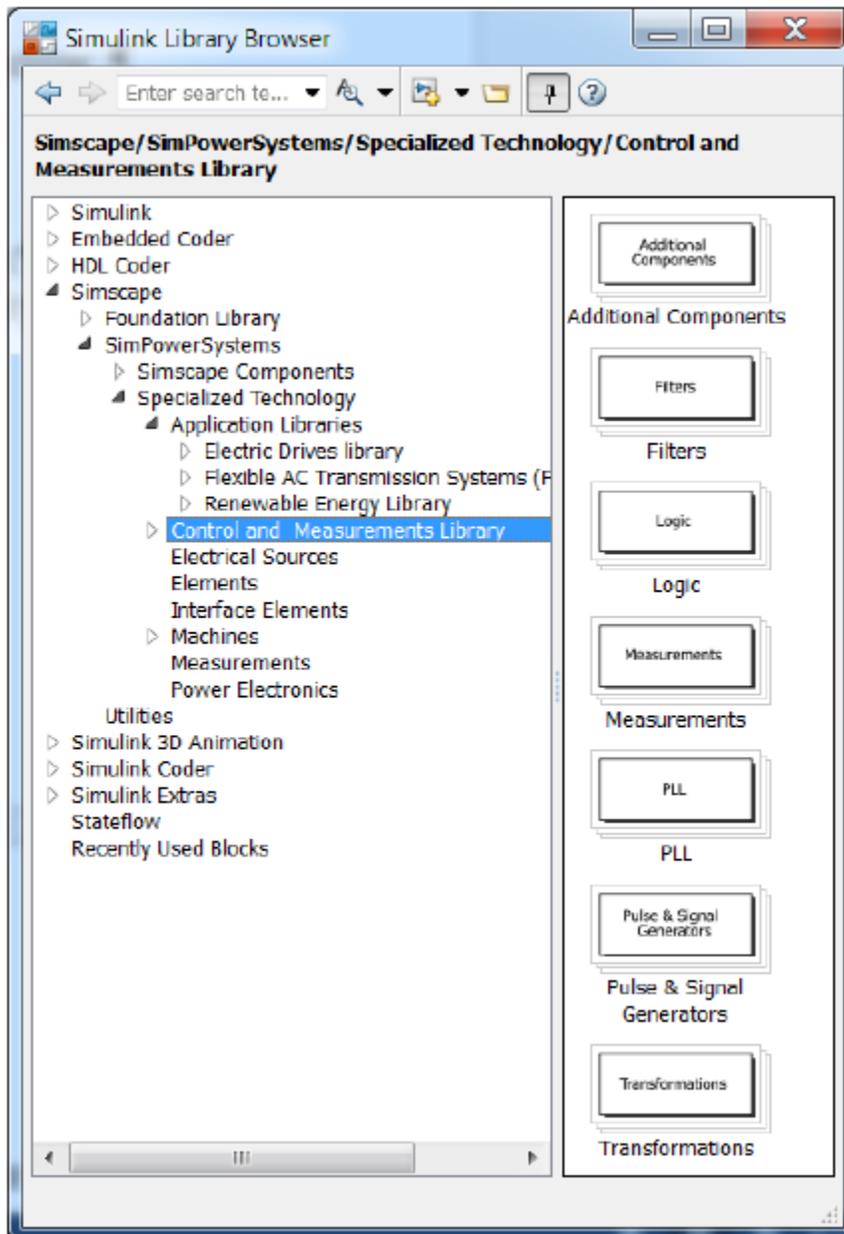


Рис. 25

- Power (3ph, Instantaneous) – блок вычисления мгновенных (Instantaneous) значений активной и реактивной мощностей трехфазной симметричной синусоидальной системы токов и напряжений;
- Power (3ph, Phasor) – блок вычисления активной и реактивной мощностей по трехфазным комплексным значениям тока и напряжения;

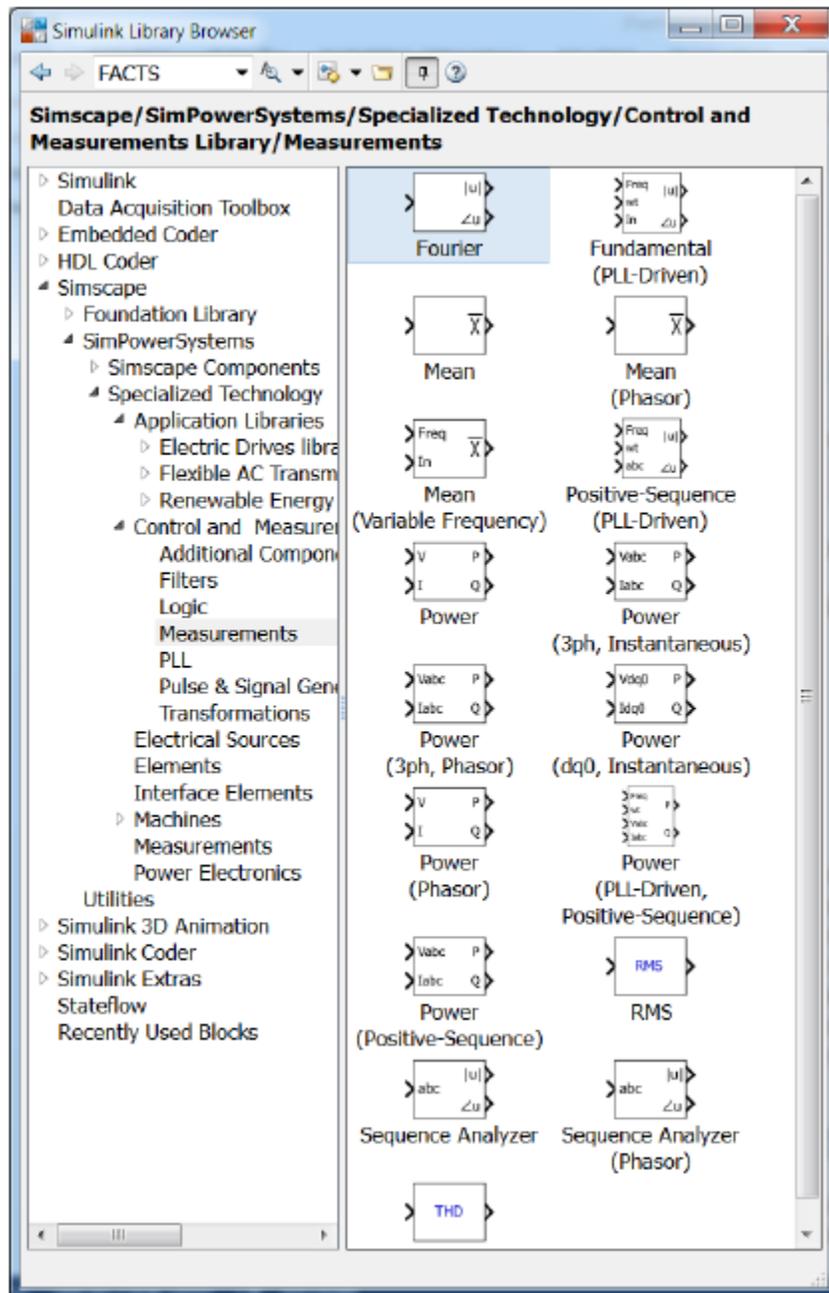


Рис. 26

– Power (PLL-Driven, Positive-Sequence) – блок рассчитывает активную и реактивную мощности положительной (прямой) последовательности токов и напряжений по частоте, определяемой с помощью фазовой автоподстройки;

– Power (Phasor) – блок вычисляет активную и реактивную мощности тока и напряжения в виде комплексного числа (сигнала);

– Power (Positive-Sequence) – блок рассчитывает активную и реактивную мощности положительной (прямой) последовательности токов и напряжений за период, установленный для этих синусоидальных трехфазных токов и напряжений;

– Power (dq0, Instantaneous) – рассчитывает мгновенные значения мощностей в осях dq с учетом нулевой последовательности;

– RMS (root mean square) – среднеквадратичное (действующее) значение сигнала (например, напряжения или тока);

– Sequence Analyzer – блок вычисляет прямую, обратную и нулевую последовательности трехфазного сигнала;

– Sequence Analyzer (Phasor) – блок вычисляет прямую, обратную и нулевую последовательности при подаче на вход трех сигналов в виде комплексных чисел;

– THD (Total Harmonic Distortion) – блок, рассчитывающий коэффициент гармонических искажений.

2.5 PLL (Phase Locked Loop) – блоки системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ);

2.6 Pulse & Signal Generators – блоки генераторов импульсов и сигналов;

2.7 Transformations – блоки преобразователей координат.

3) Electrical Sources – источники электрической энергии и сигналов (рис. 27):

– AC Current Source – блок источника переменного тока;

– AC Voltage Source – блок источника переменного напряжения;

– Battery – блок обобщенной модели батареи;

– Controlled Current Source – блок управляемого источника тока;

– Controlled Voltage Source – блок управляемого источника напряжения;

– DC Voltage Source – блок источника постоянного напряжения;

– Three-Phase Programmable Voltage Source – блок трехфазного программируемого источника напряжения;

– Three-Phase Source – блок трехфазного источника.

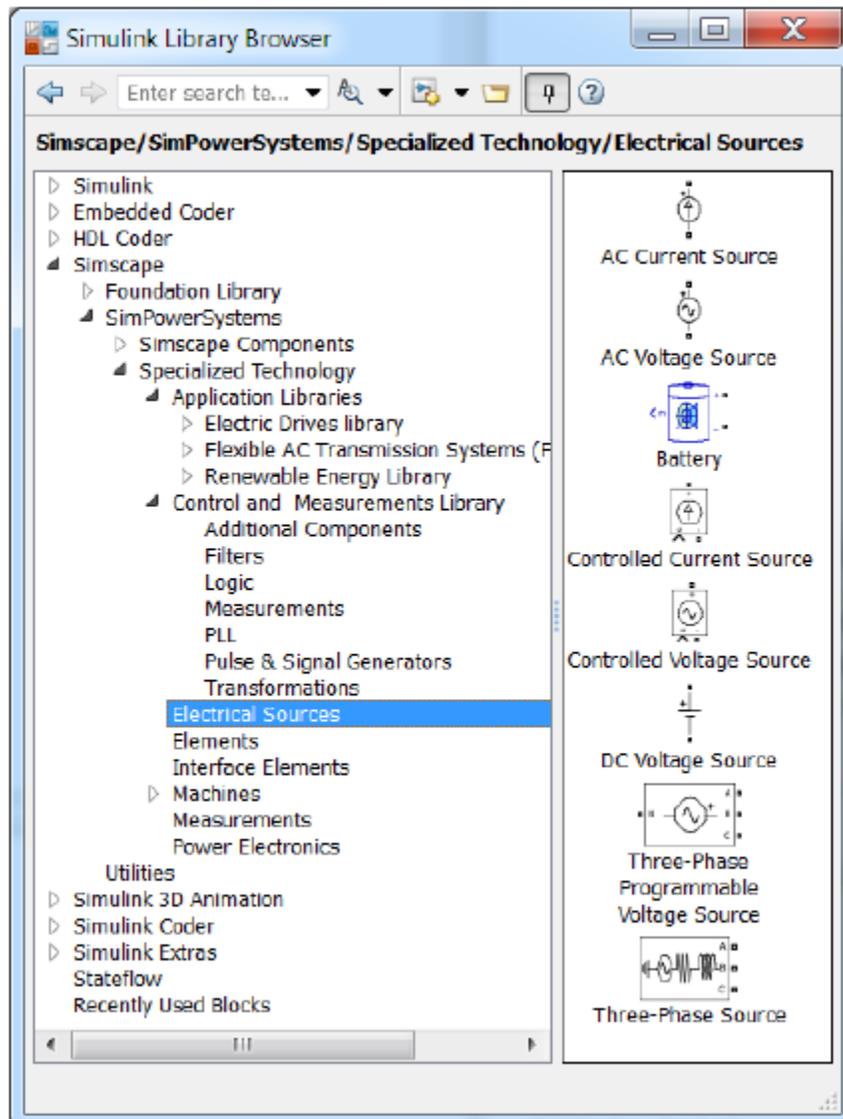


Рис. 27

4) Elements – линейные и нелинейные компоненты электротехнических и электронных устройств:

- Breaker – выключатель, отключающий цепь при прохождении кривой тока через нулевое значение (рис. 28);
- Connection Port – порт соединения; о Distributed Parameters Line – линия с распределенными параметрами;
- Ground – заземление;
- Grounding Transformer – заземляющий трансформатор;
- Linear Transformer – трансформатор без учета насыщения;

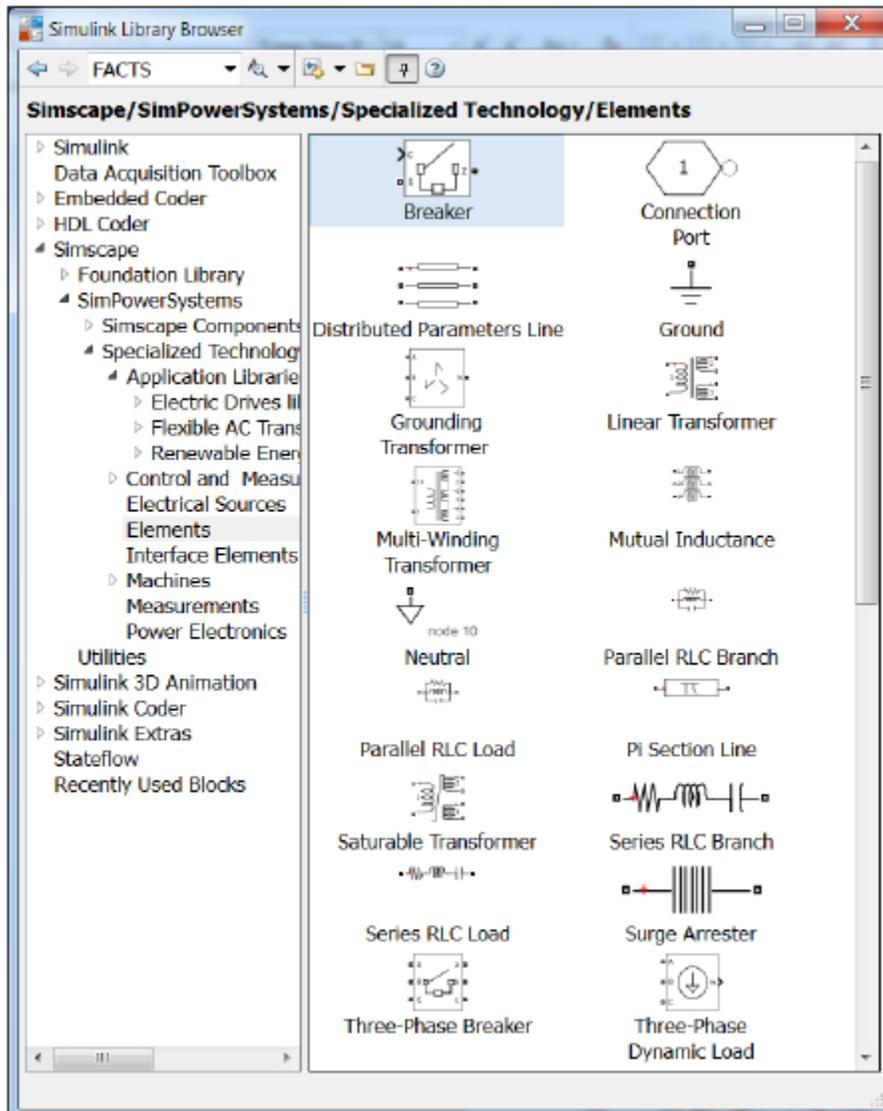


Рис. 28

- Multi-Winding Transformer – многообмоточный трансформатор;
- Mutual Inductance – взаимная индуктивность;
- Neutral – блок служит для создания общих узлов между блоками;
- Parallel RLC Branch – однофазная параллельная RLC цепь;
- Parallel RLC Load – параллельная RLC нагрузка;
- Pi Section Line – линия электропередачи с сосредоточенными параметрами;
- Series RLC Branch – последовательная RLC цепь;
- Series RLC Load – последовательная RLC нагрузка;

- Surge Arrester – разрядник для защиты от перенапряжений;
- Three-Phase Breaker – трехфазный выключатель, отключающий токи фаз при прохождении их кривых через нулевые значения;
- Three-Phase Fault – блок трехфазных повреждений, который позволяет моделировать различные замыкания (рис. 29);

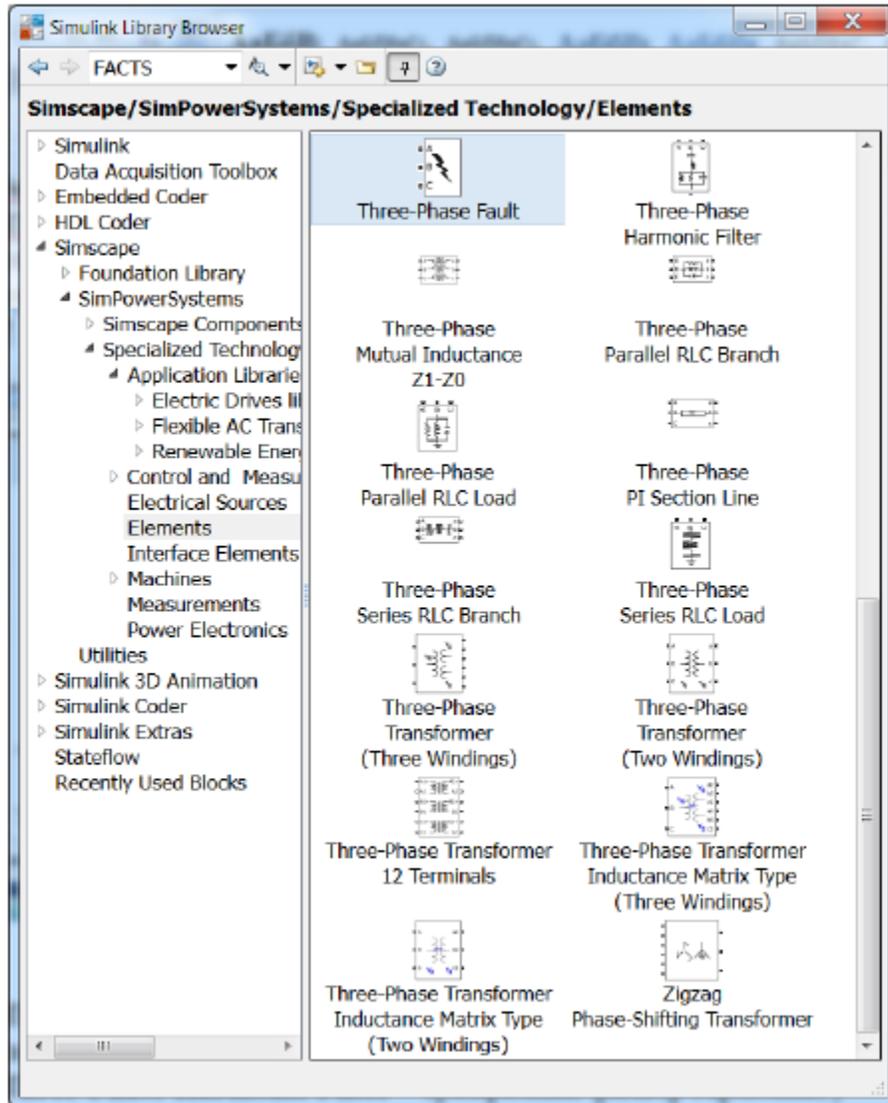


Рис. 29

- Three-Phase Harmonic Filter – трехфазный фильтр гармоник;
- Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0 – трехфазная взаимная индуктивность;

- Three-Phase PI Section Line – трехфазная линия электропередачи с сосредоточенными параметрами;
- Three-Phase Parallel RLC Branch – трехфазная параллельная RLC цепь;
- Three-Phase Parallel RLC Load – трехфазная параллельная RLC нагрузка;
- Three-Phase Series RLC Branch – трехфазная последовательная RLC цепь;
- Three-Phase Series RLC Load – трехфазная последовательная RLC нагрузка;
- Three-Phase Transformer (Three Windings) – трехобмоточный трехфазный трансформатор;
- Three-Phase Transformer (Two Windings) – блок трехфазного двухобмоточного трансформатора;
- Three-Phase Transformer 12 Terminals – трехфазный трансформатор с 12 выводами (клеммами);
- Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings) – блок трехфазного трехобмоточного трансформатора (автотрансформатора) со стержневой (броневой) конструкцией магнитопровода;
- Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings) – блок трехфазного двухобмоточного трансформатора (автотрансформатора) со стержневой (броневой) конструкцией магнитопровода;
- Zigzag Phase-Shifting Transformer – трансформатор с соединением "зигзаг".

5) Interface Elements – элементы интерфейса между SimPowerSystems и электрическими цепями расширения Simscape:

- Current-Voltage Simscape Interface – ампер-вольтный интерфейс, который позволяет соединять цепи SimPowerSystems и электрические цепи Simscape (рис. 30);
- Current-Voltage Simscape Interface (gnd) – ампер-вольтный интерфейс, который позволяет соединять SimPowerSystems и электрические цепи Simscape с использованием заземления;
- Voltage-Current Simscape Interface – вольт-амперный интерфейс, который позволяет соединять цепи SimPowerSystems и Simscape;

– Voltage-Current Simscape Interface (gnd) вольт-амперный интерфейс, который позволяет соединять SimPowerSystems и электрические цепи Simscape с использованием заземления

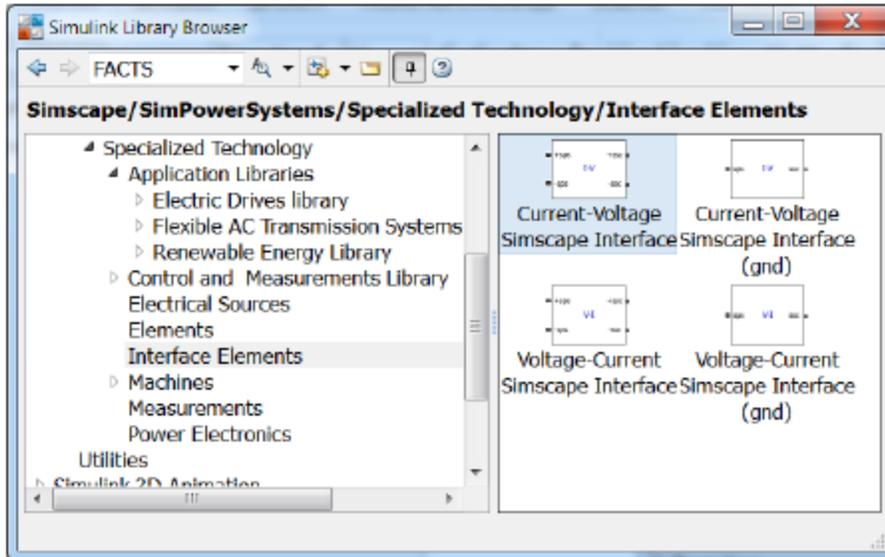


Рис. 30

б) Machines – блоки для электрических машин (рис. 31):

Excitation Systems – блоки систем возбуждения синхронных машин (папка);

– Asynchronous Machine SI Units – блок асинхронной машины с параметрами, заданными в международной системе единиц;

– Asynchronous Machine pu Units – блок асинхронной машины с параметрами в относительных единицах;

– DC Machine – блок машины постоянного тока;

– Excitation System – блок системы возбуждения синхронных машин;

– Generic Power System Stabilizer – универсальный стабилизатор энергетической системы;

– Hydraulic Turbine and Governor – гидравлическая турбина и регулятор;

Multi-Band Power System Stabilizer – многополосный стабилизатор энергосистемы;

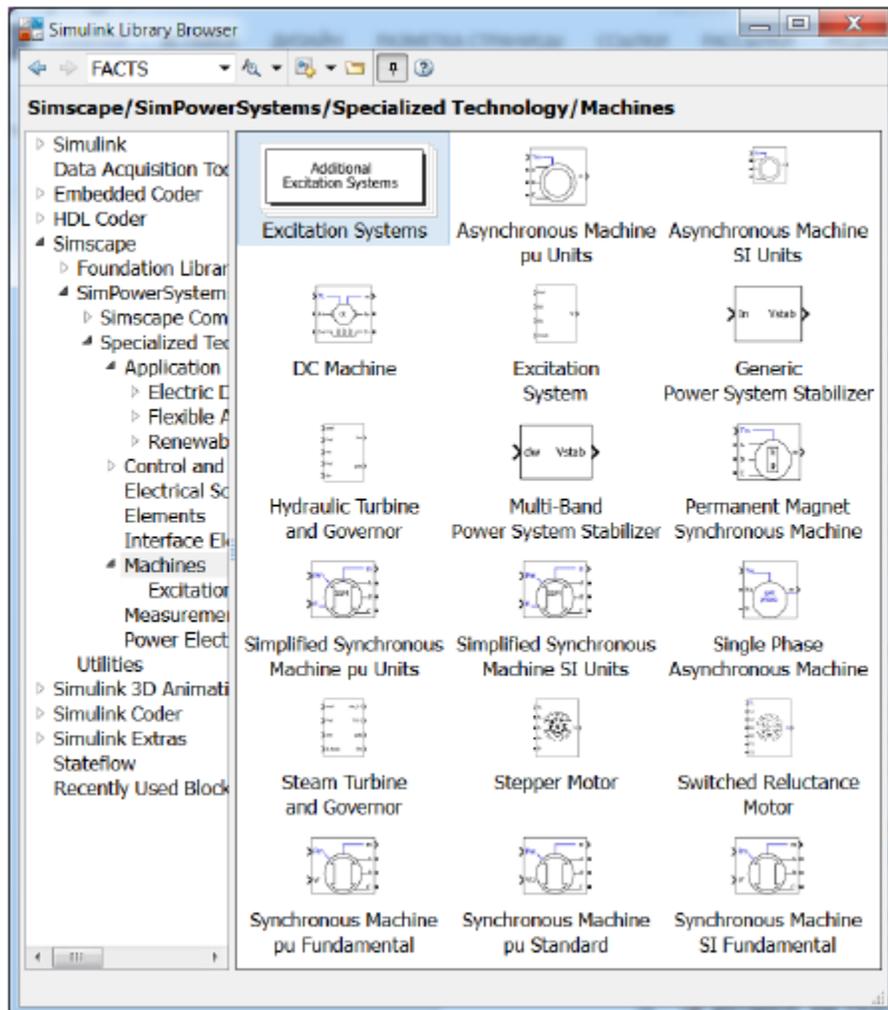


Рис. 31

- Permanent Magnet Synchronous Machine – синхронная машина с постоянными магнитами;
- Simplified Synchronous Machine SI Unit – блок на основе упрощенной модели синхронной машины с параметрами, заданными в международной системе единиц;
- Simplified Synchronous Machine pu Units – блок на основе упрощенной модели синхронной машины в относительных единицах;
- Single Phase Asynchronous Machine – однофазная асинхронная машина;
- Steam Turbine and Governor – паровая турбина и регулятор;
- Stepper Motor – шаговый двигатель;
- Switched Reluctance Motor – вентильный реактивный двигатель;

- Synchronous Machine SI Fundamental – фундаментальная синхронная машина с параметрами в системе СИ;
- Synchronous Machine pu Fundamental – фундаментальная синхронная машина с параметрами в относительных единицах;
- Synchronous Machine pu Standard – стандартная синхронная машина с параметрами в относительных единицах.

7) Measurements – блоки измерений (рис. 32):

- Current Measurement – блок измерения тока;
- Impedance Measurement – блок измерения полного сопротивления;
- Load Flow Bus (BUS_1) – блок шины потока нагрузки (мощности), с помощью которого можно определить потоки нагрузки (мощности) в ветвях, подключенных к шине (узлу). Для получения результатов необходимо двойным щелчком по блоку powergui вызвать его окно и нажать кнопку Load Flow. Появится окно Power Load Flow Tool с данными системы (сети).

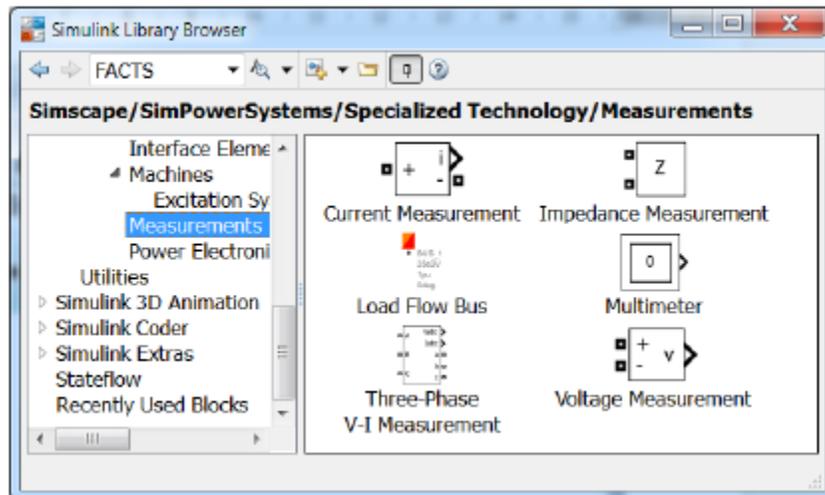


Рис. 32

После нажатия кнопки Compute получим численные значения потоков мощности в соответствующих ветвях, отходящих от шин (узлов). При необходимости, изменяем параметры системы, возвращаемся в окно Power Load Flow Tool, нажимаем кнопки Update, Compute и получаем новый результат. Следует отметить, что программу powergui можно вызвать и из окна команд MATLAB, как и пример power_turbine использования блока Load Flow Bus.

- Multimeter – блок универсального измерительного прибора;
 - Three-Phase V-I Measurement – блок измерения напряжения и тока трехфазной системы;
 - Voltage Measurement – блок измерения напряжения.
- 8) Power Electronics – блоки устройств силовой электроники (рис. 33):

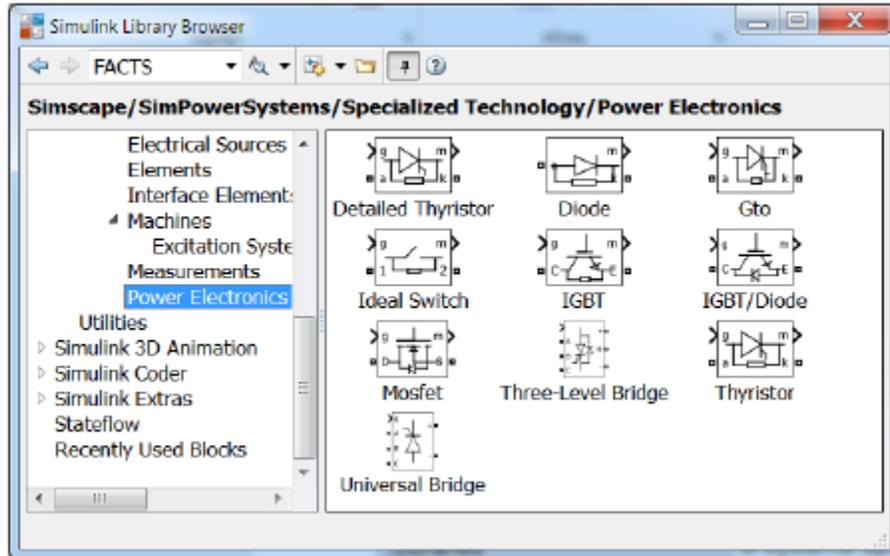


Рис. 33

- Detailed Thyristor – блок точной модели тиристора;
 - Diode – блок диода;
 - Gto Thyristor – блок полностью управляемого тиристора;
 - Ideal Switch – блок идеального ключа;
 - IGBT – блок биполярного транзистора с изолированным затвором;
 - IGBT/Diode – блок биполярного транзистора с изолированным затвором и шунтированного обратным диодом;
 - Mosfet – блок силового полевого транзистора с параллельно включенным обратным диодом;
 - Three-Level Bridge – блок трехуровневого моста;
 - Thyristor – блок упрощенной модели тиристора;
 - Universal Bridge – блок универсального моста.
- 9) Powergui – графический интерфейс пользователя расширения SimPowerSystems.

1.3 Библиотека Power Electronics пакета SimPowerSystems

Рассмотрим подробно библиотеку Power Electronics, специально предназначенную для моделирования схем силовой электроники. Ее состав показан на рис. 33.

Эта библиотека содержит восемь типов одиночных силовых элементов и модели различных полупроводниковых преобразователей, представленных универсальным блоком (Universal Bridge) и его трехфазным аналогом Three-level Bridge.

Следует отметить, что модели силовых элементов в библиотеке, в отличие от моделей в других компьютерных программах, сильно упрощены. Если в пакеты Workbench, DesignLab, Micro-Cap, OrCAD, Pspice и др. включаются модели, учитывающие все мельчайшие особенности именно данного типа или марки электронного компонента, с учетом особенностей его производства, разброса параметров и рабочей температуры, то в программе MATLAB, модели электронных компонентов выполнены как обобщенные функциональные блоки имеющие некоторые основные параметры, присущие данному элементу. Эти параметры можно изменять, настраивая характеристики блока ближе к заданным значениям реальных элементов, но в целом считать блок полным аналогом определенной марки электронного компонента нельзя.

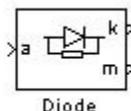
Эту особенность блоков нельзя считать недостатком, так как для анализа общих закономерностей работы силовых схем нет необходимости учитывать все мельчайшие нюансы работы того или иного электронного компонента.

Рассмотрим подробно блоки этой библиотеки.

1.3.1 Блок Diode

Diode	Силовой диод
--------------	---------------------

Пиктограмма:



Назначение:

Блок моделирует полупроводниковый силовой диод.

Принцип действия полупроводникового диода основан на использовании свойств *p-n* электронно-дырочного перехода, возникающего в полупроводниковой пластине между двумя слоями с различными типами электрической проводимости.

В ней можно выделить две ветви: прямую и обратную. Прямая ветвь характеризуется малыми значениями прямого напряжения на *p-n* переходе, а обратная – малыми значениями тока (называемого обратным), обусловленного неосновными носителями заряда. Однако если обратное напряжение, приложенное к *p-n* переходу, превысит определенное значение, то возникнет электрический пробой *p-n* перехода, характеризующийся резким возрастанием обратного тока диода при незначительном изменении обратного напряжения. В силовых диодах пробой называется лавинным и приводит к выходу диода из строя (из-за резкого повышения выделяемой при этом мощности).

Диоды, рассчитанные на работу в условиях кратковременных обратных перенапряжений с наступлением лавинного пробоя, называются лавинными или с лавинной характеристикой. Такие диоды используются также в качестве стабилитронов, т. е. приборов, на которых при пробое сохраняется практически постоянное напряжение, несмотря на резкое возрастание обратного тока. При приложении прямого напряжения вольтамперная характеристика лавинного диода такая же, как и у обычного диода.

Основными параметрами, характеризующими возможности диодов, являются:

- предельно допустимые значения повторяющегося импульсного обратного напряжения;
- максимального среднего прямого тока (усредненного по всему периоду для периодических токов).

Кроме предельных параметров, важными параметрами являются:

- падение напряжения на выводах диода, обусловленное прямым током;
- обратный ток (ток через диод при приложении обратного напряжения);
- время обратного восстановления (параметр, характеризующий время восстановления блокирующих свойств диода).

В настоящее время созданы силовые диоды на токи свыше 1000 А и напряжения свыше 1000 В.

Значительно более высоким быстродействием при сравнении с обычными кремниевыми диодами обладают диоды Шоттки (для мощных приборов десятки наносекунд). В основе механизма их действия лежат электрофизические процессы, возникающие при контакте между металлом и полупроводником. Современные мощные диоды Шоттки выпускаются на низкие (десятки вольт) напряжения и токи (сотни ампер).

Кроме диодов Шоттки разработаны еще две группы быстродействующих диодов: диффузионные *p-n* диоды и эпитаксиальные, в зависимости от технологии их изготовления. Эти приборы рассчитаны на более высокие напряжения. Наиболее высоковольтными (800÷1600 В) являются диоды, изготовленные по диффузионной технологии.

По значению прямого напряжения быстродействующие силовые диоды распределяются следующим образом:

- диоды Шоттки 0,5÷0,9 В;
- эпитаксиальные 0,8÷1,3 В;
- диффузионные 1,1÷1,6 В.

В программе MATLAB модель диода сильно упрощена. Она состоит из последовательно включенных: резистора R_{on} ; индуктивности L_{on} ; источника постоянного напряжения V_f и ключа SW (рис. 34).

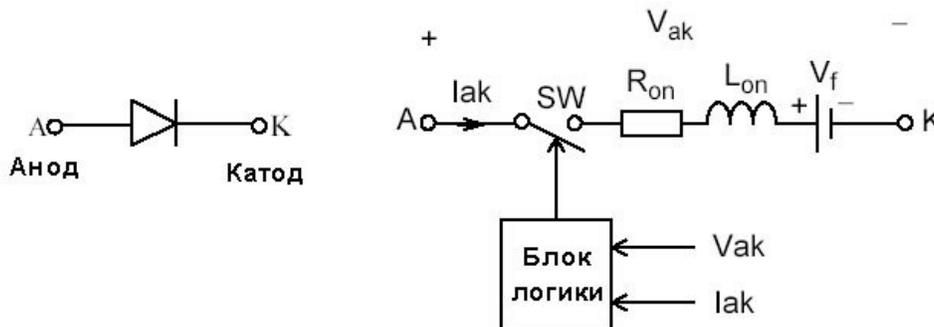


Рис. 34

Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на диоде ($V_{ak} \div V_f$) происходит замыкание ключа и через прибор начинается

протекать ток. Размыкание ключа (выключение диода) выполняется при снижении тока I_{ak} , протекающего через диод, до нуля.

Статическая вольтамперная характеристика модели диода показана на рис. 35.

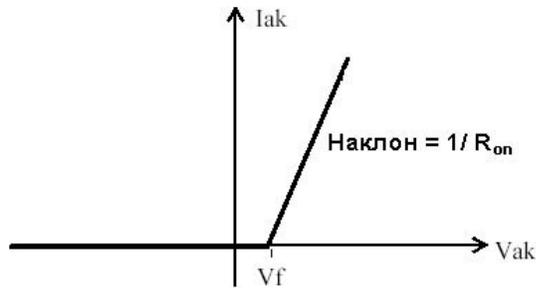
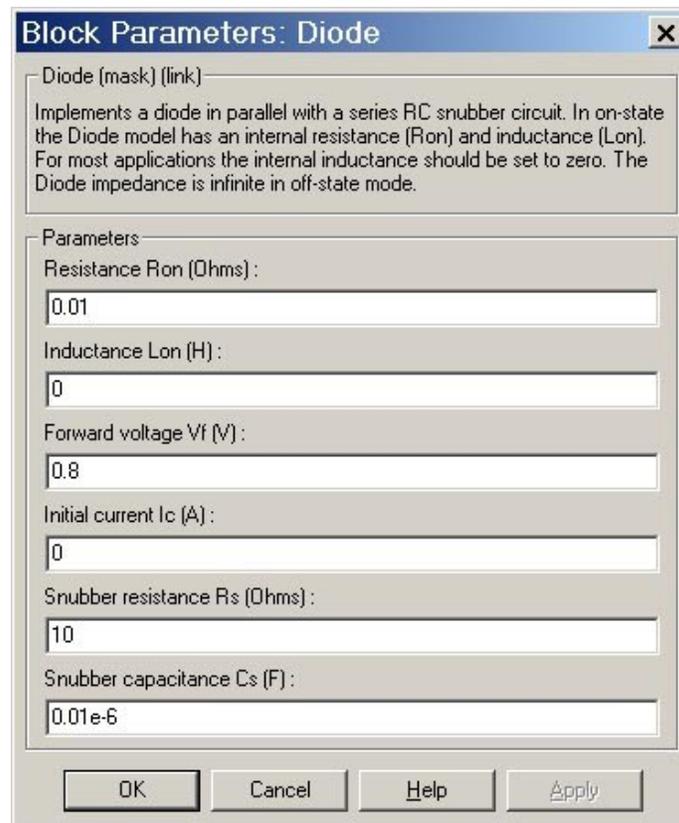


Рис. 35

В модели параллельно самому диоду включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

Окно задания параметров:



Данному окну соответствует пиктограмма, обозначенная буквой «а». Если поставить галочку в поле Show measurement port [Показать измерительный порт], то пиктограмма примет вид «б».

На измерительном порту блока, обозначенном m, формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент – анодный ток диода, второй – напряжение анод-катод диода.

На рис. 36 показана схема модели, однополупериодного выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку.

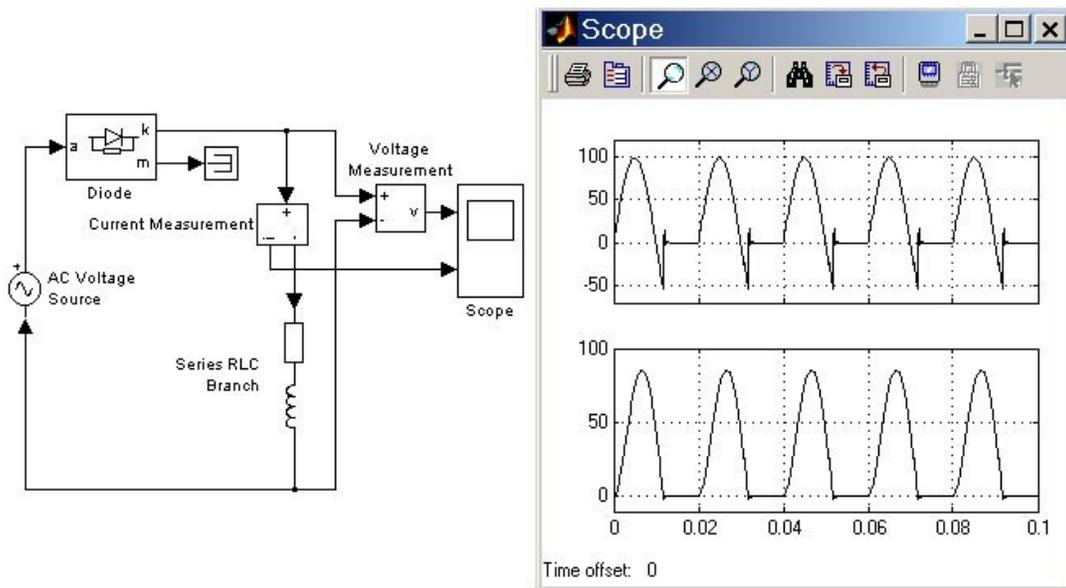


Рис. 36

Параметры 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_c (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)].

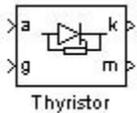
Snubber capacitance C_s (F):

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

1.3.2 Блоки *Thyristor* и *Detailed Thyristor*

Thyristor, Detailed Thyristor	Тиристор
--------------------------------------	-----------------

Пиктограмма:



Назначение:

Блоки, моделирующие тиристор. В библиотеке SimPowerSystem имеется две модели тиристора: Thyristor (упрощенная модель) и Detailed Thyristor (уточненная модель).

Тиристоры являются силовыми полупроводниковыми приборами, отличающимися высокими значениями коэффициентов усиления по току управления (более 1000), а также большими значениями рабочих токов и напряжений. Это один из наиболее распространенных полупроводниковых приборов в силовой электронике. Тиристор – ключевой полупроводниковый прибор с односторонней проводимостью и неполной управляемостью, включающийся по сигналу управления, а выключающийся при спадании прямого тока до нуля.

Основой тиристора является полупроводниковая структура, в которой чередуются слои с p- и n-типами проводимости. Прибор имеет три вывода, соответствующих аноду А, катоду К и управляющему электроду УЭ.

Если к аноду прибора приложено отрицательное напряжение относительно катода, то тиристор оказывается в закрытом состоянии, которое не может быть изменено подачей положительного напряжения на управляющий электрод (относительно катода), т. е. воздействием на цепь управления.

Если к аноду тиристора подключить плюс источника постоянного напряжения, а к катоду минус, то при отсутствии управляющего импульса (т. е. напряжения на управляющем электроде) тиристор остается в закрытом состоянии. Для того чтобы тиристор перешел в проводящее состояние, необходимо обеспечить протекание через управляющий электрод определенного тока.

Тиристор с четырехслойной p-n-p-n структурой, как и диод, обладает односторонней проводимостью. Для электрических цепей переменного тока разработан специальный прибор – симметричный тиристор (симистор), который может быть в проводящем состоянии в обоих направлениях (т. е. независимо от полярности приложенного к нему напряжения). Управление симистором производится так же, как и тиристором.

Для перевода тиристора (или симистора) в закрытое состояние необходимо обеспечить спадание протекающего через него прямого тока до нуля.

При обратном напряжении вольтамперная характеристика у тиристора такая же, как и у диода (у некоторых типов тиристорov обратная ветвь соответствует характеристике лавинного диода).

Ветви характеристики, соответствующие области прямого напряжения, зависят от тока управления и при достаточном его значении практически совпадают с аналогичной ветвью вольтамперной характеристики диода. При отсутствии управляющего тока тиристор будет находиться в закрытом состоянии до тех пор, пока прямое напряжение не превысит определенного для данного типа тиристора значения, после чего он перейдет в проводящее состояние. Включение тиристора прямым напряжением обычно соответствует аварийным режимам.

Большинство типов тиристорov включаются токами со значениями несколько сотен миллиампер при напряжении на управляющем электроде, не превышающем 10 В. Длительность управляющего импульса должна быть больше нескольких десятков микросекунд (в зависимости от типа тиристора). Для четкого и быстрого включения тиристора управляющие импульсы должны иметь крутой фронт (около 1 мкс).

Некоторые параметры, которыми характеризуются тиристоры, аналогичны параметрам, указанным выше для диодов. Кроме того, в технических условиях, помимо параметров цепи управления, обычно указываются:

1. Время включения t_{qt} тиристора. Это время от момента подачи управляющего импульса до момента снижения анодного напряжения на тиристоре до 10% начального значения при работе тиристора на активную нагрузку.

2. Время выключения t_q (T_q – в модели) тиристора (называемое также временем восстановления запирающей способности тиристора). Это время от момента, когда прямой ток становится равным нулю, до момента, когда прибор снова будет способен выдерживать (не открываясь) напряжение, прикладываемое в прямом направлении с определенной амплитудой и скоростью нарастания.

3. Критическая скорость нарастания прямого напряжения dU_d/dt . Это максимально допустимое значение скорости нарастания прямого напряжения при разомкнутой цепи управляющего электрода. При превышении допустимого значения dU_d/dt происходит самопроизвольное включение тиристора.

4. Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии dI_T/dt . Это наибольшее значение скорости нарастания тока в открытом состоянии, которую тиристор может выдержать без повреждения.

5. Ток в закрытом состоянии тиристора I_D . Это анодный ток тиристора в закрытом состоянии.

6. Ток удержания тиристора I_H (I_i – в модели). Это наименьший анодный ток, необходимый для поддержания тиристора в открытом состоянии.

Ток I_H необходимо учитывать при расчете минимальных нагрузок тиристорных преобразователей. Обычно для мощных тиристорных устройств этот ток равен нескольким сотням миллиампер и зависит от температуры.

Современные наиболее мощные тиристоры имеют предельный ток 3000÷4000 А и напряжение до 6000 В. При этом критическая скорость нарастания напряжения достигает 1000 В/мкс, а тока (1000÷1500) А/мкс. Время

выключения наиболее быстродействующих мощных тиристоров не превышает нескольких единиц, микросекунд.

В схемах многих типов преобразователей к тиристорам подключаются встречно-параллельные диоды, шунтирующие тиристор при появлении на нем обратного напряжения. В таких случаях обратное напряжение на тиристоре становится малым и не превышает значений прямого падения напряжения на диодах (как правило, долей вольта).

Упрощенная модель тиристора состоит из последовательно включенных резистора R_{on} , индуктивности L_{on} , источника постоянного напряжения V_f и ключа SW (рис. 37).

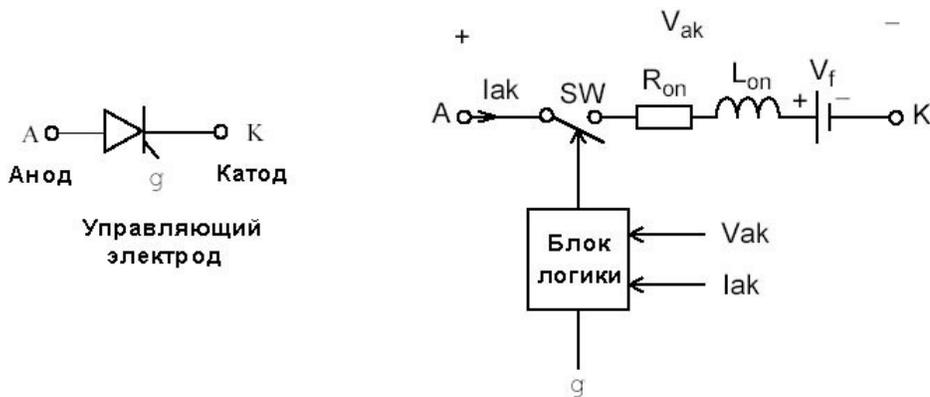


Рис. 37

Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на тиристоре ($V_{ak} - V_f$) и наличии положительного сигнала на управляющем электроде (g) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Размыкание ключа (выключение тиристора) выполняется при снижении тока I_{ak} , протекающего через тиристор, до нуля.

В уточненной модели тиристора длительность управляющего импульса должна быть такой, чтобы, при включении, анодный ток тиристора превысил ток удержания (I_i). В противном случае включение не произойдет. При выключении тиристора длительность приложения отрицательного напряжения анод-катод должна превышать время выключения тиристора (T_q). В противном случае произойдет автоматическое включение тиристора даже, если управляющий сигнал равен нулю.

Статические вольт-амперные характеристики модели тиристора для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 38.

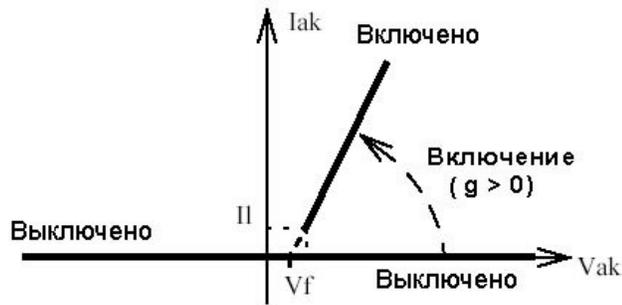
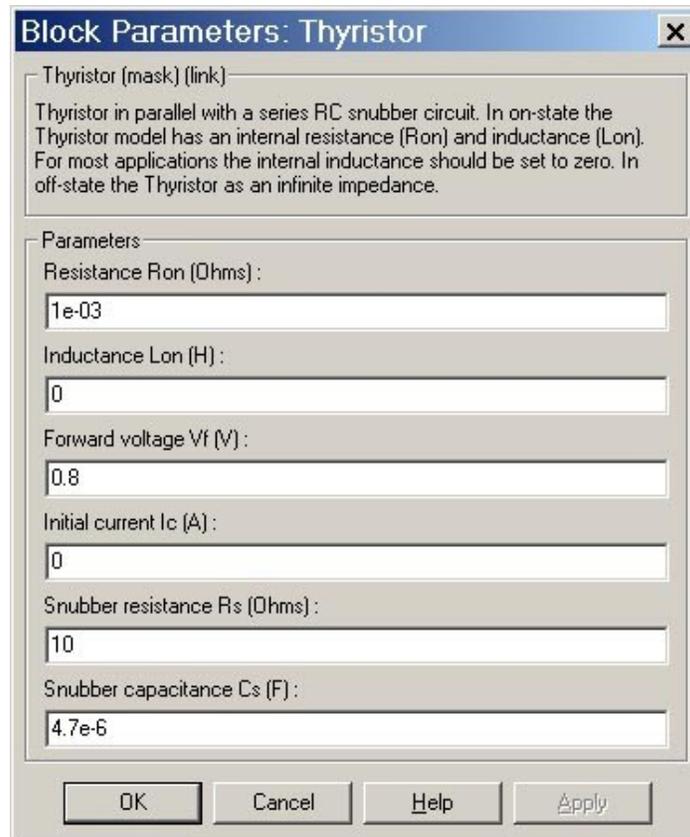


Рис. 38

В модели параллельно самому тиристор включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Resistance Ron (Ohm):

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)],

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_c (A):

[Начальное значение тока (А)]. При значении параметра равном нулю моделирование начинается при закрытом состоянии тиристора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии тиристора.

Snubber resistance R_s (Ohm):

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

Snubber capacitance C_s (F):

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

Для модели Detailed Thyristor (уточненная модель), в окне задания параметров появляются еще две строчки:

Latching current I_i (A):

[Величина тока удержания (А)]. Параметр задается в уточненной модели тиристора.

Turn of time T_q (s):

[Время выключения (с)]. Параметр задается в уточненной модели тиристора.

На выходном порту блока, обозначенном m , формируется векторный Simulink – сигнал из двух элементов. Первый элемент – анодный ток тиристора, второй – напряжение анод-катод тиристора.

Выходной порт m может быть отключен, если в поле Show measurement port окна задания параметров, галочка отсутствует, тогда порт не изображается на пиктограмме.

На рис. 39 показана схема модели и результат моделирования, управляемого однополупериодного выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку. В качестве моделируемых величин выведены ток и напряжение на нагрузке.

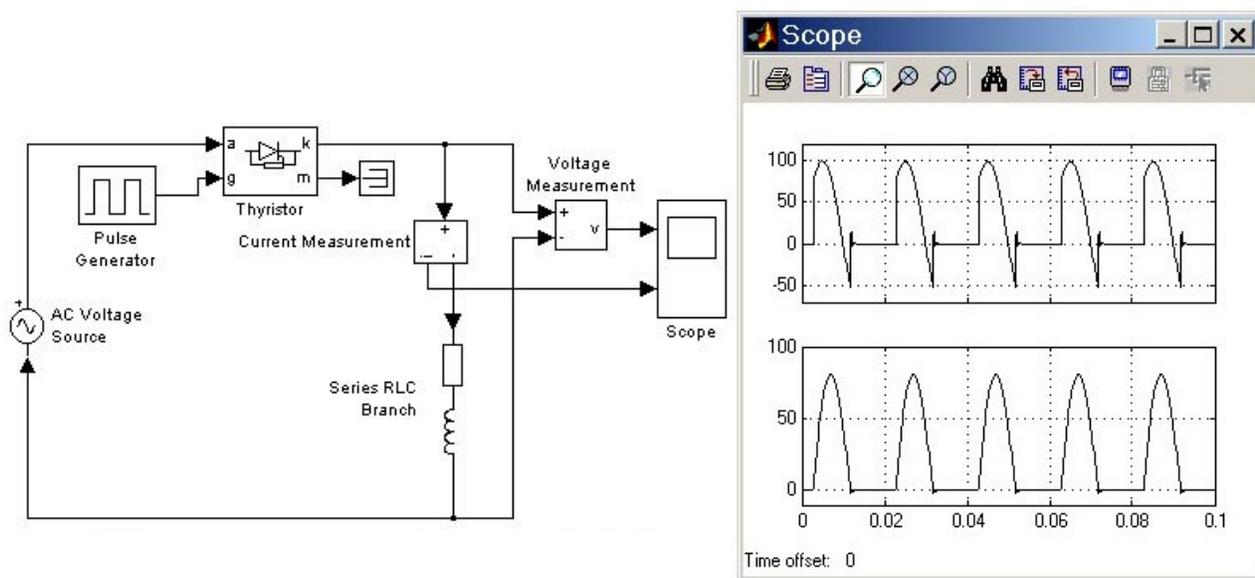


Рис. 39

Импульсы управления тиристором формируются блоком Pulse Generator, при этом величина угла управления тиристором определяется длительностью фазовой задержки (Phase Delay) генератора.

Угол управления тиристором в данной модели равен:

$$\alpha = 360^\circ \cdot (\text{Phase delay}) / T = 360^\circ \cdot 0,0025 / 0,02 = 45^\circ,$$

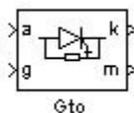
где Phase delay [Фазовая задержка], измеряемая в секундах – параметр блока Pulse Generator; T – период напряжения, определяемый как 1/Frequency [Hz].

Величина Frequency [Частота (Гц)] – параметр блока AC Voltage Source.

1.3.3 Блоки GTO Thyristor

GTO Thyristor	Полностью управляемый тиристор
----------------------	---------------------------------------

Пиктограмма:



Назначение:

Обычный тиристор имеет принципиальный недостаток – неполную управляемость. Он включается подачей импульса на электрод управления при положительном напряжении между анодом и катодом. Выключение тиристора

обеспечивается снижением протекающего через него прямого тока до нуля, для чего разработано множество схем индуктивно-ёмкостных контуров коммутации. Они не только увеличивают стоимость преобразователя, но и ухудшают его массогабаритные показатели, снижают надёжность.

Поэтому параллельно с разработкой тиристоров проводились исследования возможности их выключения по управляющему электроду путем подачи на него отрицательного управляющего импульса.

Для включения и выключения запираемого тиристора обычно используются два отдельных источника напряжения. При выключении запираемого тиристора следует стремиться обеспечить оптимальную (по времени выключения и коммутационным потерям мощности) скорость нарастания тока управления. Это может быть достигнуто введением соответствующего значения индуктивности в цепь управления по выключению. Схема управления должна обеспечивать: мощные импульсы токов включения и выключения, длительный ток управления при малых нагрузках тиристора, длительное отрицательное запирающее напряжение для надежного выключения тиристора. Коэффициент запираения (отношение выключаемого анодного тока к запирающему току управления) обычно не превышает 5. Следует отметить, что запираемые тиристоры более критичны к скорости нарастания прямого напряжения, чем тиристоры, и поэтому рекомендуется, как правило, шунтировать их цепью, состоящей из конденсатора C , резистора R и диода VD , а для ограничения значения анодного тока при включении последовательно с запираемым тиристором включить насыщающийся дроссель L . Параметры коммутируемых токов и напряжений современных запираемых тиристоров приближаются к аналогичным параметрам тиристорам.

Модель полностью управляемого тиристора состоит из последовательно включенных резистора R_{on} , индуктивности L_{on} , источника постоянного напряжения V_f и ключа SW (рис. 40). Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на тиристоре ($V_{ak} - V_f$) и наличии положительного сигнала на управляющем электроде (g) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Для выключения прибора достаточно управляющий сигнал снизить до величины равной нулю.

Выключение ГТО- тиристора произойдет также при спадании анодного тока до нуля не смотря на наличие управляющего сигнала.

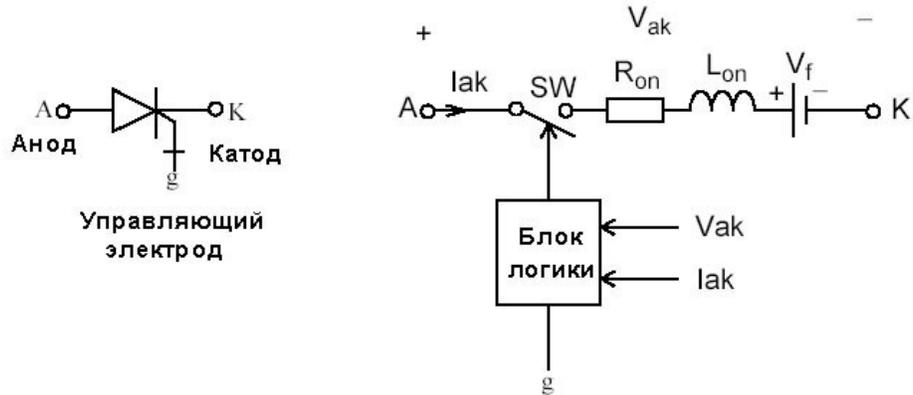


Рис. 40

Статические вольт-амперные характеристики модели полностью управляемого тиристора для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 41.

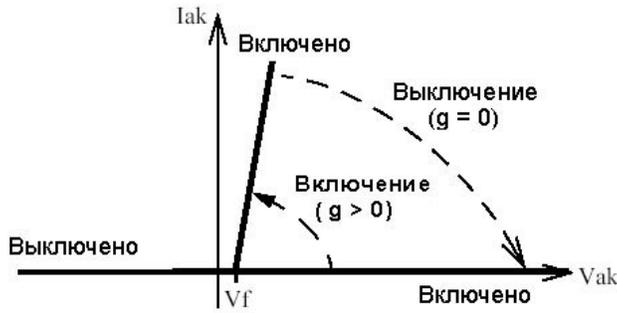


Рис. 41

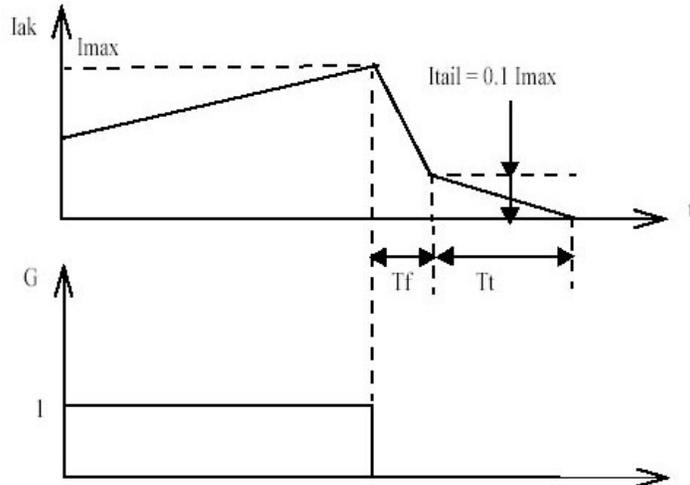


Рис. 42

В модели параллельно самому тиристорам включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

В модели учитывается также конечное время выключения тиристора. Процесс выключения разбит на два участка (рис. 42) и характеризуется, соответственно, временем спада (T_f), при котором анодный ток уменьшается до 0.1 от тока в момент выключения (I_{max}) и временем затягивания (T_t), при котором анодный ток уменьшается до нуля.

Окно задания параметров:

Block Parameters: Gto

Gto (mask) (link)

Implements a GTO thyristor in parallel with a series RC snubber circuit. In on-state the GTO model has internal resistance (R_{on}) and inductance (L_{on}). In off-state the GTO model has infinite impedance. The internal inductance cannot be set to zero.

Discretization of the GTO is available only through the Universal Bridge block.

Parameters

Resistance R_{on} (Ohms):
0.01

Inductance L_{on} (H):
1e-6

Forward voltage V_f (V):
1

Current 10% fall time T_f (s):
10e-6

Current tail time T_t (s):
20e-6

Initial current I_c (A):
0

Snubber resistance R_s (Ohms):
10

Snubber capacitance C_s (F):
0.01e-6

OK Cancel Help Apply

Параметры блока:

Resistance R_{on} (Ohm):

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)],

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)].

Current 10% fall time T_f (s):

[Время спада тока до уровня 0.1 от тока в момент выключения (с)].

Current tail time T_t (s):

[Время затягивания (с)]. Время, за которое ток уменьшится до нуля от уровня 0.1 тока в момент выключения.

Initial current I_c (A):

[Начальное значение тока (А)]. При значении параметра равном нулю моделирование начинается при закрытом состоянии прибора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии прибора.

Snubber resistance R_s (Ohm):

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

Snubber capacitance C_s (F):

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

На выходном порту блока, обозначенном m , формируется векторный Simulink – сигнал из двух элементов. Первый элемент – анодный ток тиристора, второй – напряжение анод-катод тиристора.

Как и в предыдущих моделях, выходной порт m может быть отключен. Если в поле Show measurement port окна задания параметров, галочка отсутствует, тогда порт не изображается на пиктограмме.

На (рис. 43, а) показана схема модели, импульсного регулятора напряжения. Величина среднего значения напряжения на нагрузке такого регулятора зависит от скважности управляющих импульсов.

На (рис. 43, б) представлены графики напряжения (верхний график) и тока в нагрузке (нижний график).

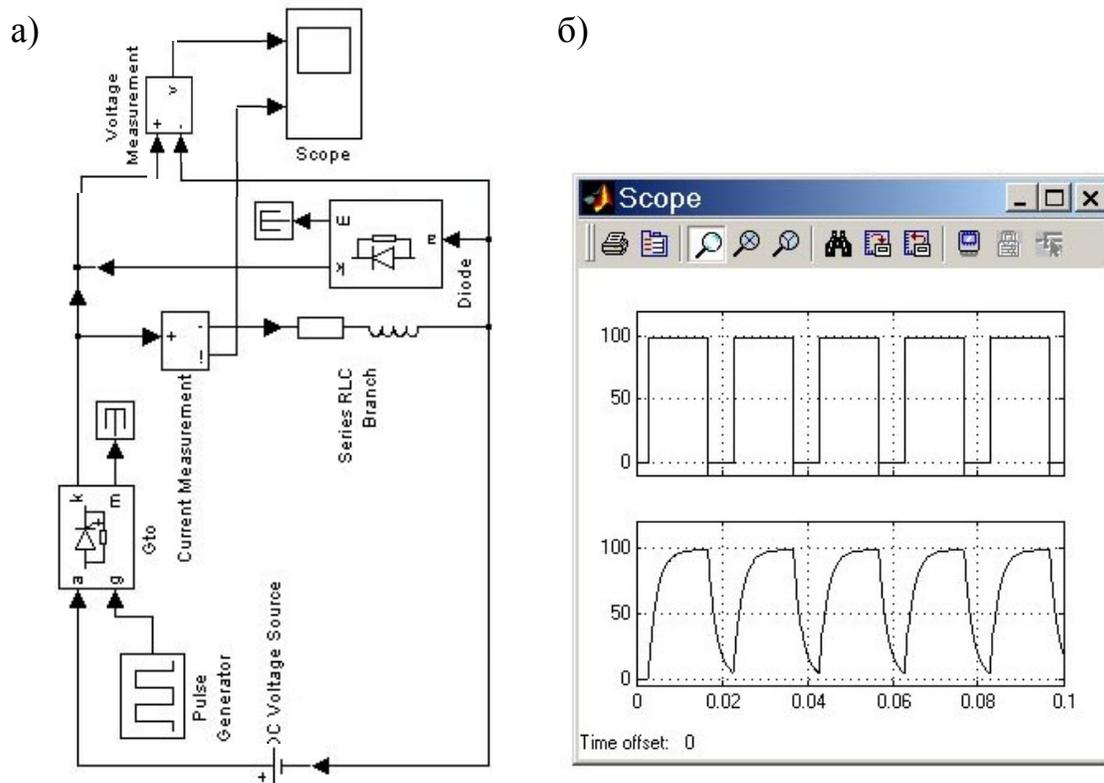
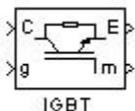


Рис. 43

1.3.4 Блоки IGBT Transistor

IGBT	Биполярный IGBT транзистор
-------------	-----------------------------------

Пиктограмма:



Назначение:

Блок моделирует биполярный транзистор с изолированным затвором.

Биполярный транзистор с изолированным затвором – полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого трёхслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком.

IGBT являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой металл-оксид-полупроводник, управляемых электрическим полем (MOSFET-Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor) и сочетают в себе

два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Прибор введён в силовую цепь выводами биполярного транзистора Э (эмиттер) и К (коллектор), а в цепь управления – выводом УЭ (затвор).

Таким образом, IGBT имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Соединения эмиттера и стока, базы и истока являются внутренними. Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включённом состоянии.

Исследования показывают, что у транзистора IGBT отсутствует участок вторичного пробоя, характерный для классических биполярных транзисторов. Быстродействие IGBT, ниже быстродействия транзисторов MOSFET, а значит, их трудно использовать в источниках питания с высокими частотами преобразования. Однако IGBT быстрее биполярных транзисторов.

Процесс включения IGBT можно разделить на два этапа: после подачи положительного напряжения между затвором и истоком происходит открытие полевого транзистора. Это приводит к открытию биполярного транзистора и возникновению тока от эмиттера к коллектору. Таким образом, полевой транзистор управляет работой биполярного.

Для IGBT с номинальным напряжением в диапазоне 600÷1200 В в полностью включённом состоянии прямое падение напряжения, так же как и для биполярных транзисторов, находится в диапазоне 1,5÷3,5 В. Это значительно меньше, чем характерное падение напряжения на силовых MOSFET в проводящем состоянии с такими же номинальными напряжениями.

С другой стороны, MOSFET с номинальными напряжениями 200 В и меньше имеют более низкое значение напряжения во включённом состоянии, чем IGBT, и остаются непревзойдёнными в этом отношении в области низких рабочих напряжений и коммутируемых токов до 50 А.

По быстродействию IGBT уступают MOSFET, но значительно превосходят биполярные. Типичные значения времени рассасывания

накопленного заряда и спада тока при выключении IGBT находятся в диапазонах $0,2 \div 0,4$ и $0,2 \div 1,5$ мкс, соответственно.

Область безопасной работы IGBT позволяет успешно обеспечить его надёжную работу без применения дополнительных цепей формирования траектории переключения при частотах от 10 до 20 кГц для модулей с номинальными токами в несколько сотен ампер. Такими качествами не обладают биполярные транзисторы, соединённые по схеме Дарлингтона.

Так же как и дискретные, MOSFET вытеснили биполярные в ключевых источниках питания с напряжением до 500 В, так и дискретные IGBT делают то же самое в источниках с более высокими напряжениями (до 3500 В).

Модель IGBT транзистора состоит из последовательно включенных резистора R_{on} , индуктивности L_{on} , источника постоянного напряжения V_f и ключа SW (рис. 44).

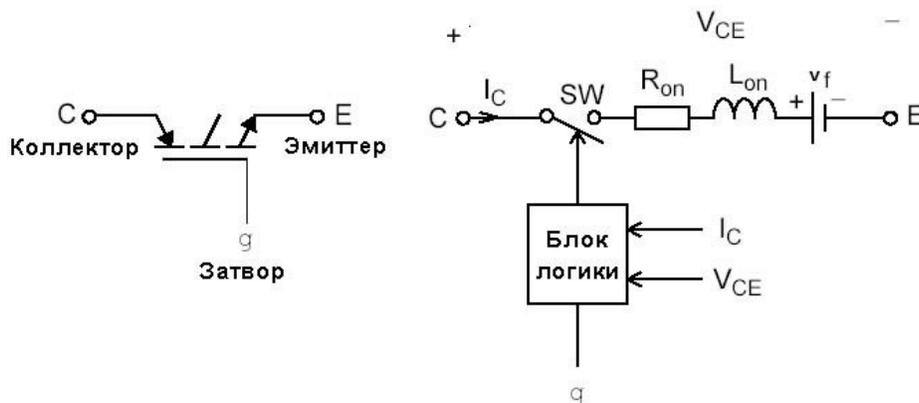


Рис. 44

Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если напряжение коллектор-эмиттер положительно и больше, чем V_f и на затвор транзистора подан положительный сигнал ($g > 0$). Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе до нуля ($g = 0$). При отрицательном напряжении коллектор-эмиттер транзистор находится в выключенном состоянии. В модели параллельно самому прибору включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

Статические вольтамперные характеристики модели IGBT транзистора для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 45.

В модели учитывается также конечное время выключения транзистора. Процесс выключения разбит на два участка (рис. 46) и характеризуется, соответственно, временем спада (T_f), при котором ток коллектор-эмиттер уменьшается до 0.1 от тока в момент выключения (I_{max}) и временем затягивания (T_t), при котором ток уменьшается до нуля.

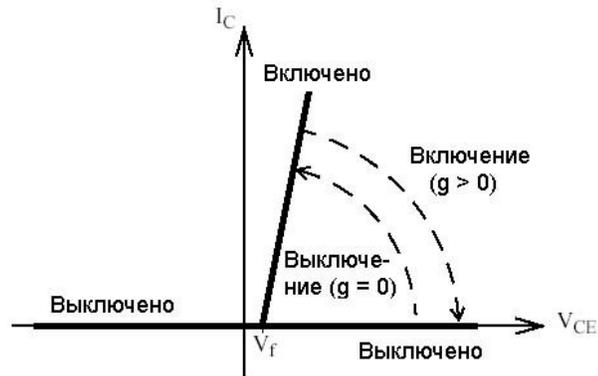


Рис. 45

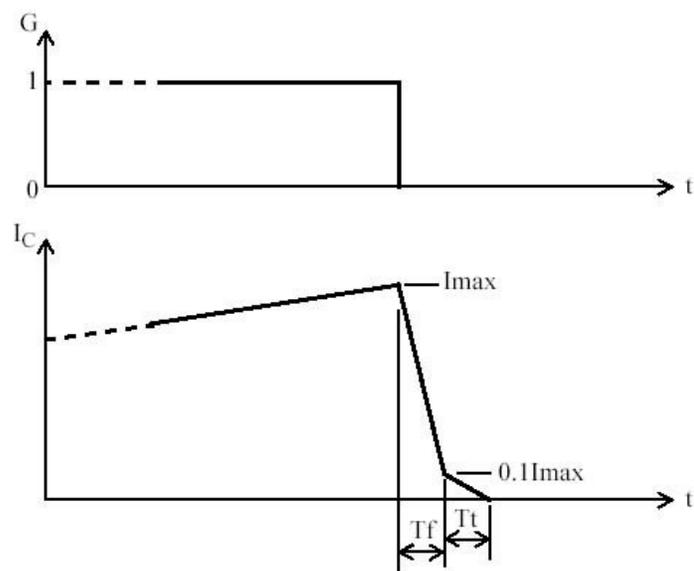


Рис. 46

Окно задания параметров:

Block Parameters: IGBT

IGBT (mask) (link)

Implements an IGBT device in parallel with a series RC snubber circuit. In on-state the IGBT model has internal resistance (R_{on}) and inductance (L_{on}). In off-state the IGBT model has infinite impedance. The internal inductance cannot be set to zero.

Discretization of the IGBT is available only through the Universal Bridge block.

Parameters

Resistance R_{on} (Ohms):
0.01

Inductance L_{on} (H):
1e-6

Forward voltage V_f (V):
1

Current 10% fall time T_f (s):
1e-6

Current tail time T_t (s):
2e-6

Initial current I_c (A):
0

Snubber resistance R_s (Ohms):
0

Snubber capacitance C_s (F):
0.01e-6

OK Cancel Help Apply

Параметры блока:

Resistance R_{on} (Ohm):

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)],

Inductance L_{on} (H):

[Индуктивность во включенном состоянии (Гн)].

Forward voltage V_f (V):

[Падение напряжения в прямом направлении (В)].

Current 10% fall time T_f (s):

[Время спада тока до уровня 0.1 от тока в момент выключения (с)].

Current tail time T_t (s):

[Время затягивания (с)]. Время, за которое ток уменьшится до нуля от уровня 0.1 тока в момент выключения.

Initial current I_c (A):

[Начальное значение тока (A)]. При значении параметра равном нулю моделирование начинается при закрытом состоянии прибора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии прибора.

Snubber resistance R_s (Ohm):

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

Snubber capacitance C_s (F):

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

На выходном порту блока обозначенном m , формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент – ток коллектор-эмиттер транзистора, второй – напряжение коллектор-эмиттер транзистора.

На (рис. 47, а) показана схема модели неперевсивного широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения с параллельным включением транзистора по отношению к нагрузке.

На (рис. 47, б) представлены графики напряжения (нижний график) и тока в нагрузке (верхний график).

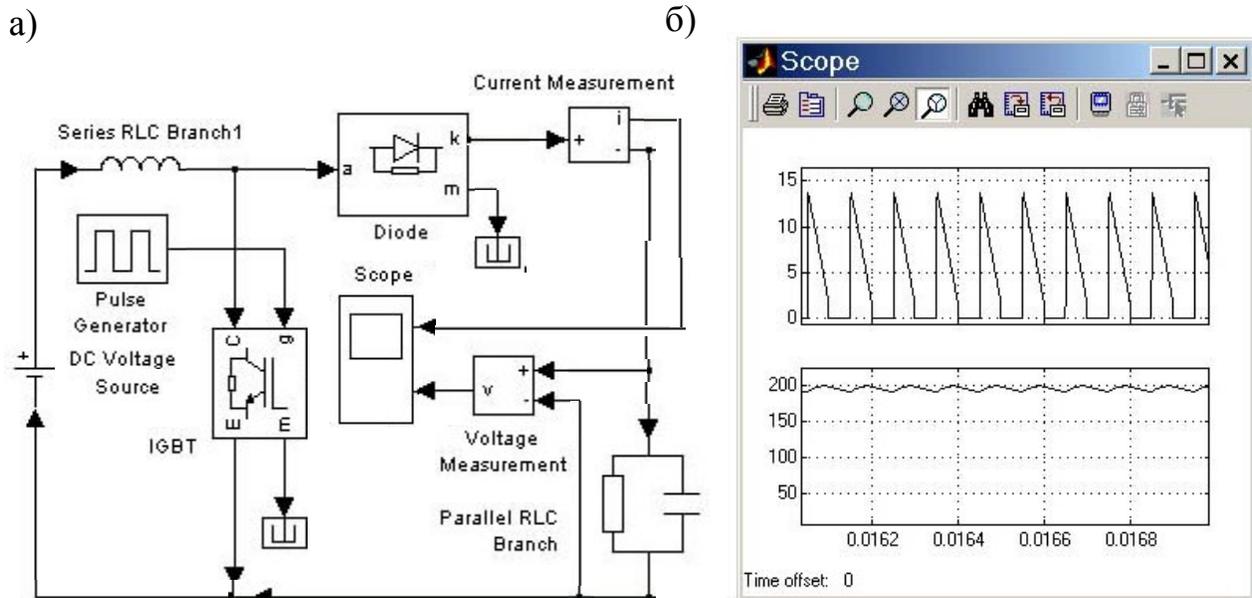
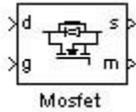


Рис. 47

1.3.5 Блок Mosfet Transistor

Mosfet	Mosfet транзистор
---------------	--------------------------

Пиктограмма:



Назначение:

Блок моделирует силовой полевой транзистор с изолированным затвором и параллельно включенным обратным диодом.

Управление транзистором осуществляется через затвор, который изолирован от силового р-п перехода тонким слоем окисла, следовательно, сопротивление постоянному току цепи управления очень велико.

Для того чтобы перевести транзистор из открытого состояния в закрытое и наоборот, нужно приложить к затвору, относительно истока, напряжение. При этом ток в цепи затвора практически отсутствует: транзистору не нужен ток. Поддержание открытого состояния осуществляется электрическим полем. Но в момент открытия или закрытия ток в цепи затвора все же течет, но этот процесс занимает очень незначительный промежуток времени.

Первое преимущество полевого транзистора очевидно: поскольку он управляется не током, а напряжением (электрическим полем), это значительно упрощает схему и снижает затрачиваемую на управление мощность.

Второе преимущество полевого транзистора заключается в их высоком быстродействии – они могут переключаться с гораздо более высокой скоростью, чем биполярные транзисторы.

Третье преимущество обусловлено повышенной теплоустойчивостью. Рост температуры полевого транзистора при подаче на него напряжения приведет, согласно закону Ома, к увеличению сопротивления открытого транзистора и, соответственно, к уменьшению тока. Поведение биполярного транзистора более сложно, повышение его температуры ведет к увеличению тока. Это означает, что биполярные транзисторы не являются термоустойчивыми приборами. В них может возникнуть очень опасный саморазогрев, который легко выводит транзистор из строя.

Последнее преимущество полевого транзистора связано с его тепловыми свойствами – полное отсутствие вторичного пробоя. Это преимущество позволяет эффективнее использовать полевой транзистор по передаваемой мощности.

Таким образом, эти приборы выгодно отличаются от биполярных транзисторов большими допустимыми токами, низким сопротивлением в открытом состоянии и практически бесконечным (на низких частотах) входным сопротивлением. Благодаря этим достоинствам MOSFET-транзисторы успешно вытесняют биполярные транзисторы из импульсных и переключающих схем.

Для защиты канала транзистора от пробоя обратным напряжением в его состав введен мощный диод, включенный параллельно каналу.

Модель MOSFET транзистора состоит из последовательно включенных резистора R_{on} , индуктивности L_{on} и ключа SW (рис. 48). Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если напряжение сток-исток положительно и на затвор транзистора подан положительный сигнал ($g > 0$). Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе до нуля ($g = 0$). При отрицательном напряжении коллектор- эмиттер транзистор находится в выключенном состоянии, и ток проводит обратный диод.

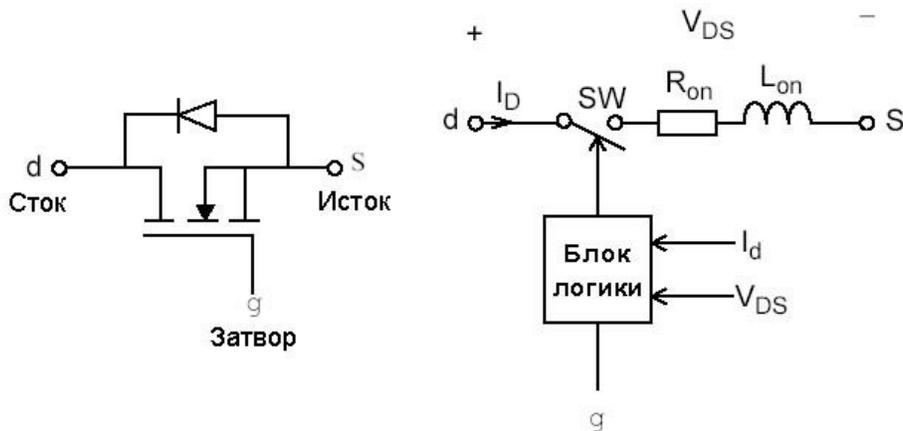


Рис. 48

Статические вольтамперные характеристики модели MOSFET транзистора для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 49.

В модели параллельно самому прибору включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

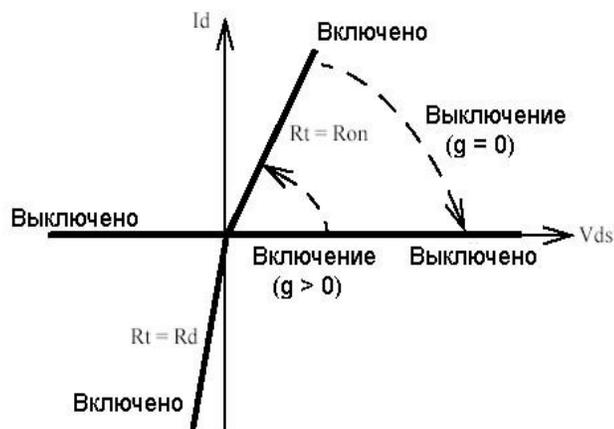
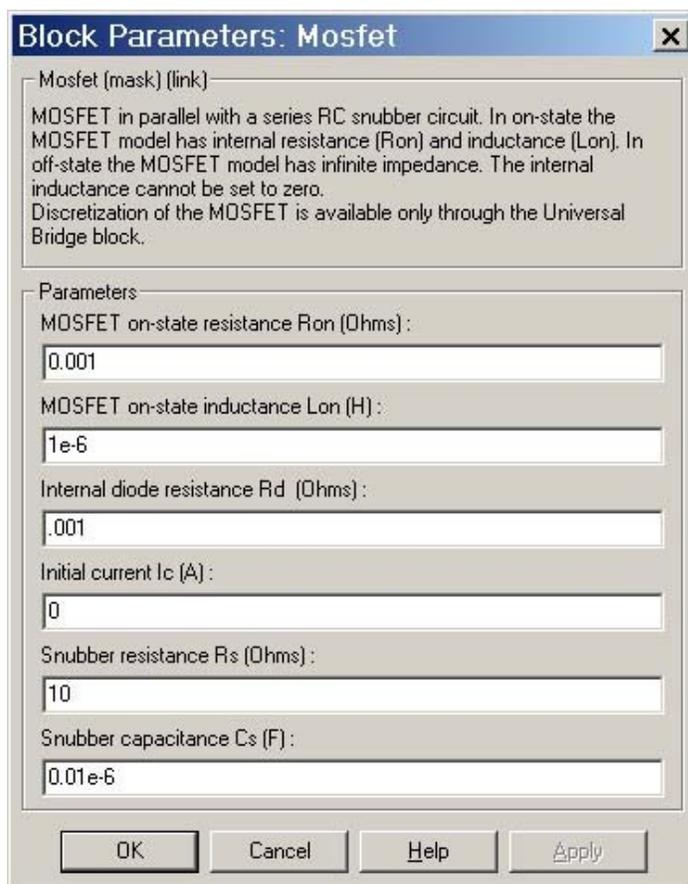


Рис. 49

Окно задания параметров:



Параметры блока:

MOSFET on-state resistance R_{on} (Ohm):

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)].

MOSFET on-state inductance L_{on} (H):

[Индуктивность во включенном состоянии (Гн)].

Initial current I_c (A):

[Начальное значение тока (А)]. При значении параметра равном нулю моделирование начинается при закрытом состоянии прибора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии прибора.

Snubber resistance R_s (Ohm):

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

Snubber capacitance C_s (F):

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

На выходном порту блока обозначенном m , формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент – ток сток-исток транзистора, второй – напряжение сток-исток транзистора.

На (рис. 50, а) показана модель полумостового однофазного инвертора, работающего на резонансную нагрузку.

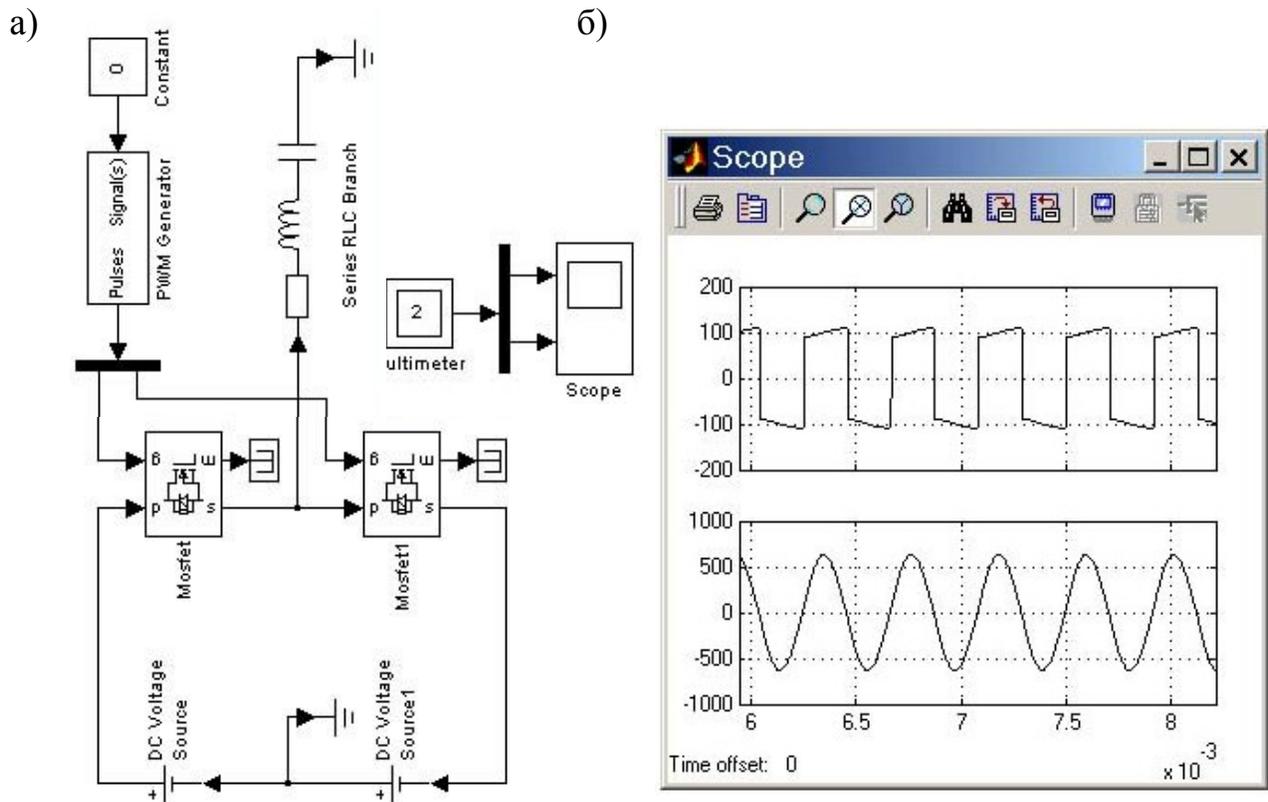


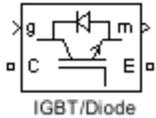
Рис. 50

На (рис. 50, б) представлены графики напряжения (верхний график) и тока в нагрузке (нижний график).

1.3.6 Блок IGBT/Diode

IGBT/Diode	Биполярный IGBT транзистор
-------------------	-----------------------------------

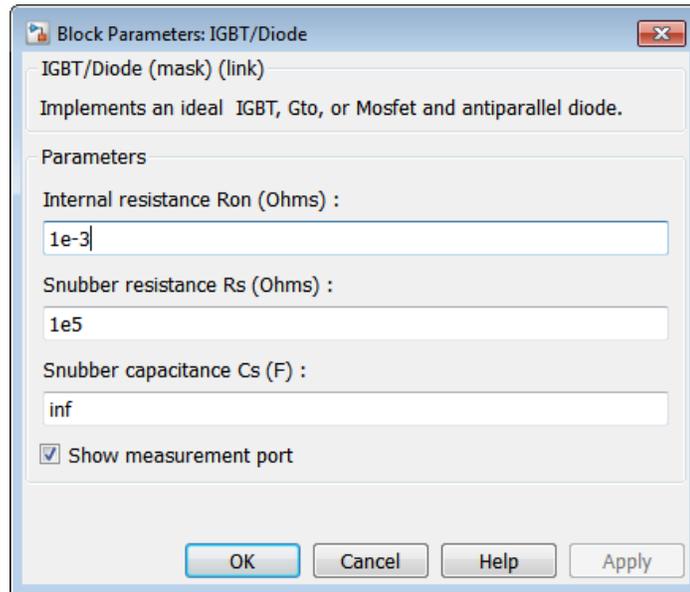
Пиктограмма:



Назначение:

Упрощенная модель биполярного транзистора с изолированным затвором. В блоке учтены лишь сопротивление канала транзистора во включенном состоянии R_{on} , сопротивление и емкость демпферной цепи Snubber resistance R_s и Snubber capacitance C_s , соответственно.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Internal resistance R_{on} (Ohm):

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)];

Snubber resistance R_s (Ohm):

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)];

Snubber capacitance C_s (F):

[Емкость демпфирующей цепи (Φ)].

На выходном порту блока, обозначенном m , формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент - ток транзистора, второй - напряжение коллектор-эмиттер тиристора.

Так же, как и в предыдущих моделях, выходной порт m может быть отключен. Если в поле Show measurement port окна задания параметров, галочка отсутствует, тогда порт не изображается на пиктограмме.

На рис. 51 показана схема модели, однофазного инвертора с широтно-импульсной модуляцией (полу мостовой преобразователь). От импульсного генератора на затворы IGBT транзисторов поступает противофазный широтно-импульсный сигнал. В результате на нагрузке формируется переменное напряжение прямоугольной формы с частотой равной несущей.

Ток в нагрузке, вследствие наличия в ней индуктивности имеет характер близкий к синусоидальному виду.

Принцип широтно-импульсного формирования синусоиды позволяет резко снизить долю высших гармоник в выходном напряжении инвертора, что в ряде случаев способствует повышению коэффициенту полезного действия преобразователя.

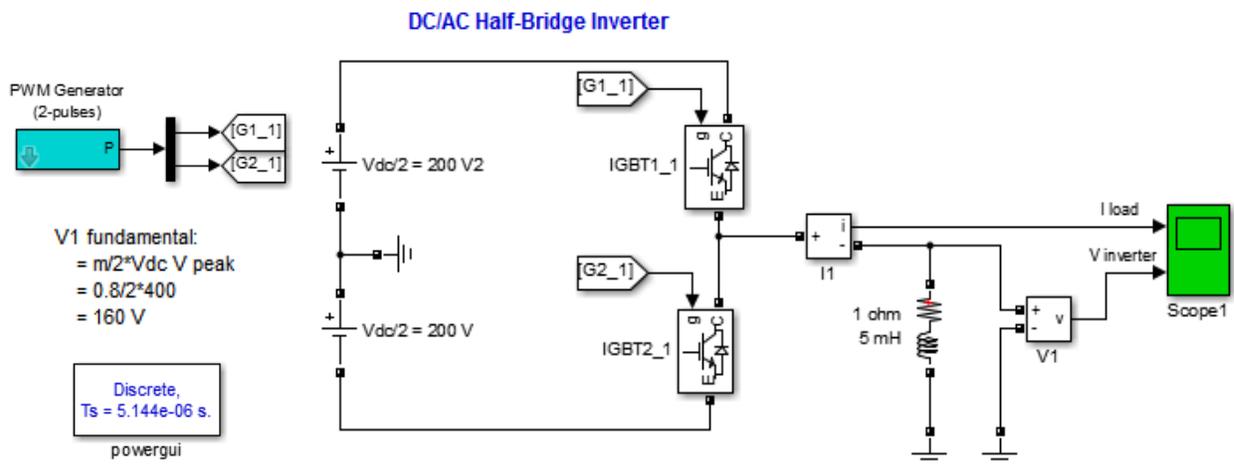
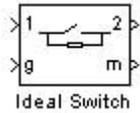


Рис. 51

1.3.7 Блок Ideal Switch

Ideal Switch	Идеальный ключ
---------------------	-----------------------

Пиктограмма:



Назначение:

Моделирует идеальный ключ.

Модель ключа состоит из последовательно соединенных резистора R_{on} и ключа SW (рис. 52). Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если на управляющий вход подан единичный положительный сигнал ($g \geq 1$). Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе до нуля ($g = 0$).

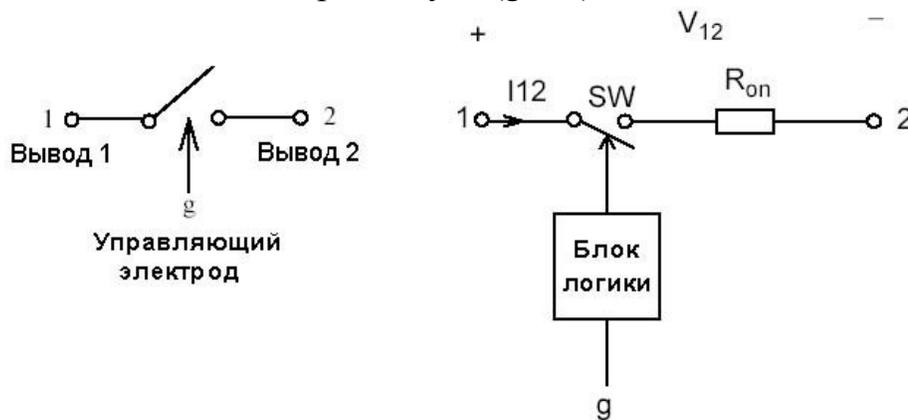


Рис. 52

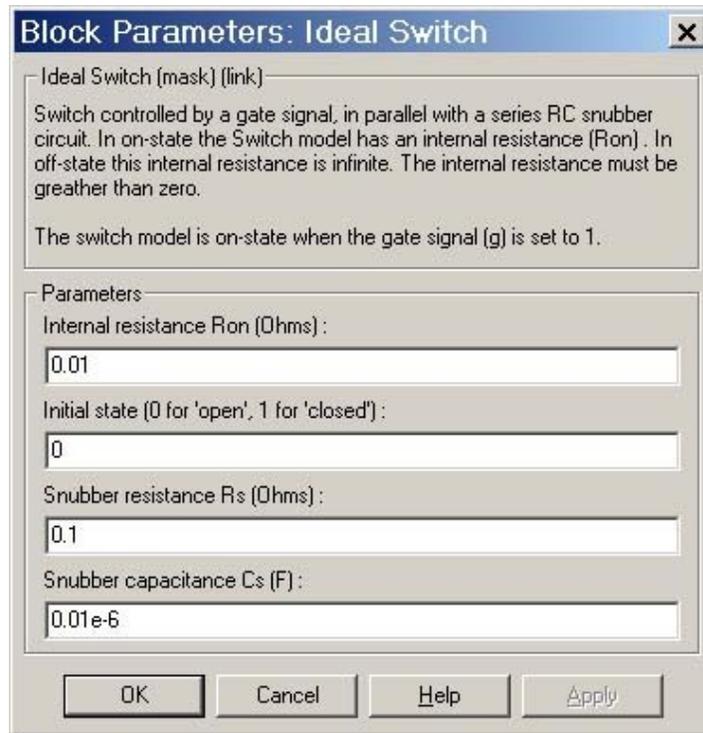
Статические вольт-амперные характеристики модели ключа для включенного и выключенного состояний показаны на рис. 53.



Рис. 53

В модели параллельно контактам ключа подсоединена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Resistance R_{on} (Ohm):

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)],

Initial state:

[Начальное состояние]. Параметр задается равным 0 для открытого состояния ключа и 1 для закрытого состояния.

Snubber resistance R_s (Ohm):

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

Snubber capacitance C_s (F):

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)].

На выходном порту блока обозначенном m , формируется векторный Simulink – сигнал из двух элементов. Первый элемент – ток ключа, второй – напряжение ключа. Выходной порт можно отключить, установив галочку в поле Snow measurement port.

Блок идеального ключа смоделирован как токовый источник, поэтому, он не может включаться последовательно с индуктивностью, если цепь демпферов не используется.

На (рис. 54, а) показана схема модели в которой подключение питания асинхронного электродвигателя производится при замыкании трех ключей Ideal Switch. Управляющий сигнал для каждого ключа формируется блоком Step.

На (рис. 54, б) представлены графики изменения скорости (верхний график) и момента в двигателе (нижний график).

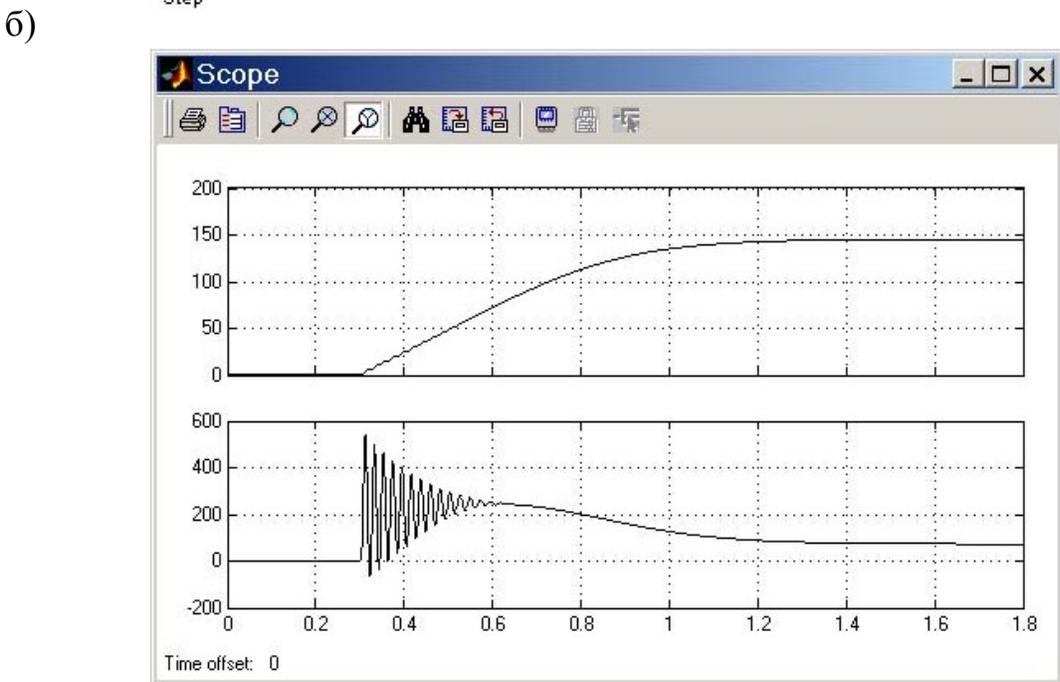
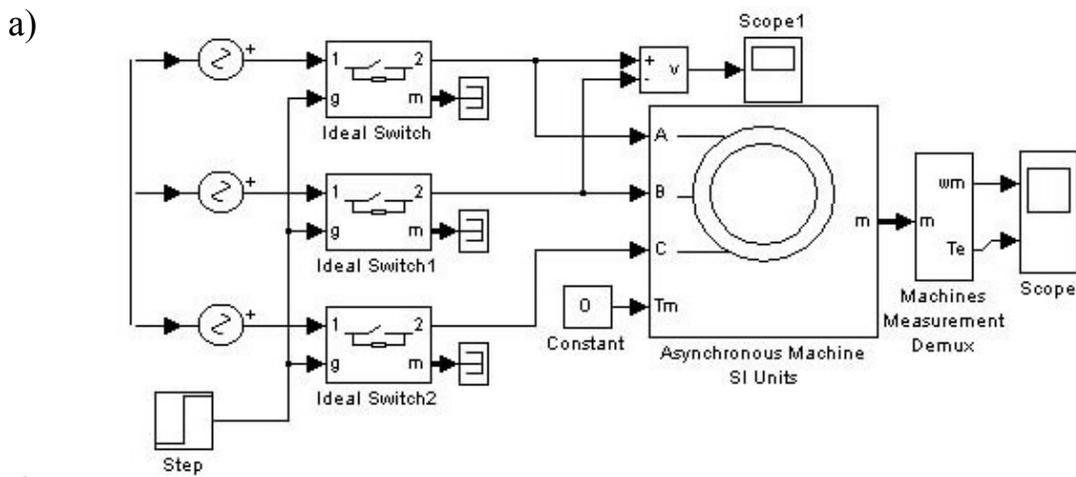


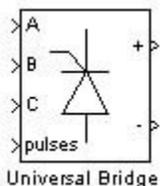
Рис. 54

1.3.8 Блок *Universal Bridge*

Universal Bridge

Универсальный мост

Пиктограмма:



Назначение:

Блок моделирует универсальный мост.

Мостовые схемы – одни из самых распространенных схемотехнических элементов преобразовательной техники. Они широко используются в выпрямителях, инверторах и других устройствах преобразования электрической энергии. Мостовые схемы строятся на базе различных полупроводниковых элементов и отличаются числом фаз.

Модель универсального моста позволяет выбирать 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 зависимости от варианта выбранных полупроводниковых элементов моста, внешний вид блока **Universal Bridge** может быть различным, как показано на рис. 55.

Электрические схемы блоков в двухфазном и трехфазном варианте (как наиболее сложном) для различных видов элементов приведены на том же рис. 55.

В модели можно также выбрать вид зажимов А, В и С (входные или выходные).

Первый вариант применяется для моделирования выпрямительных схем, второй – для инверторных.

Автономный инвертор – устройство, преобразующее постоянное напряжение (ток) в переменное напряжение (ток) с неизменной или регулируемой частотой и работающее на автономную (не связанную с сетью) нагрузку. Инверторы широко применяются в регулируемом электроприводе и

устройствах бесперебойного питания. В первом случае обычно используются трехфазные инверторы с возможностью регулирования частоты напряжения, во втором – однофазные или трехфазные с частотой выходного напряжения 50 Гц.

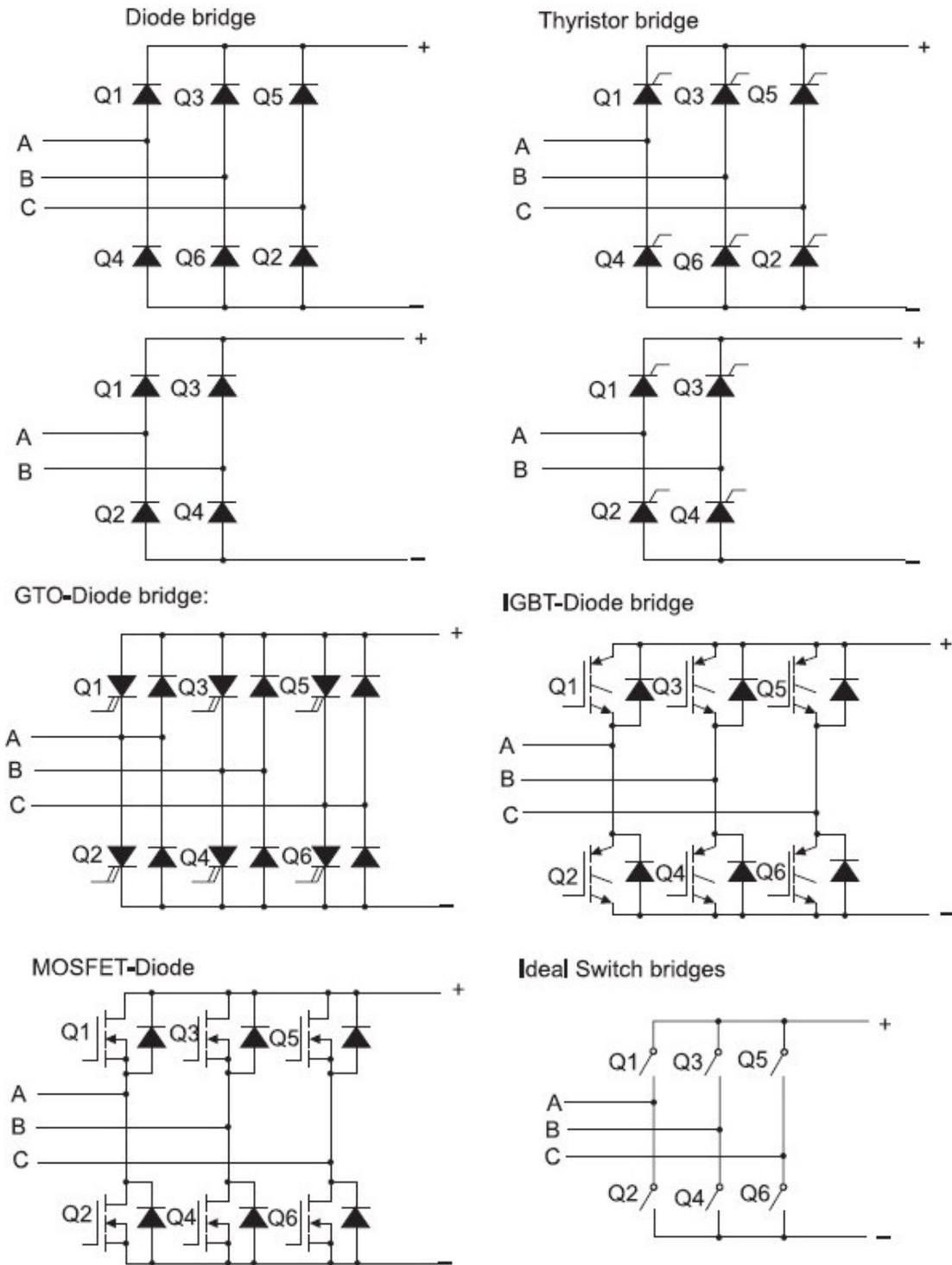
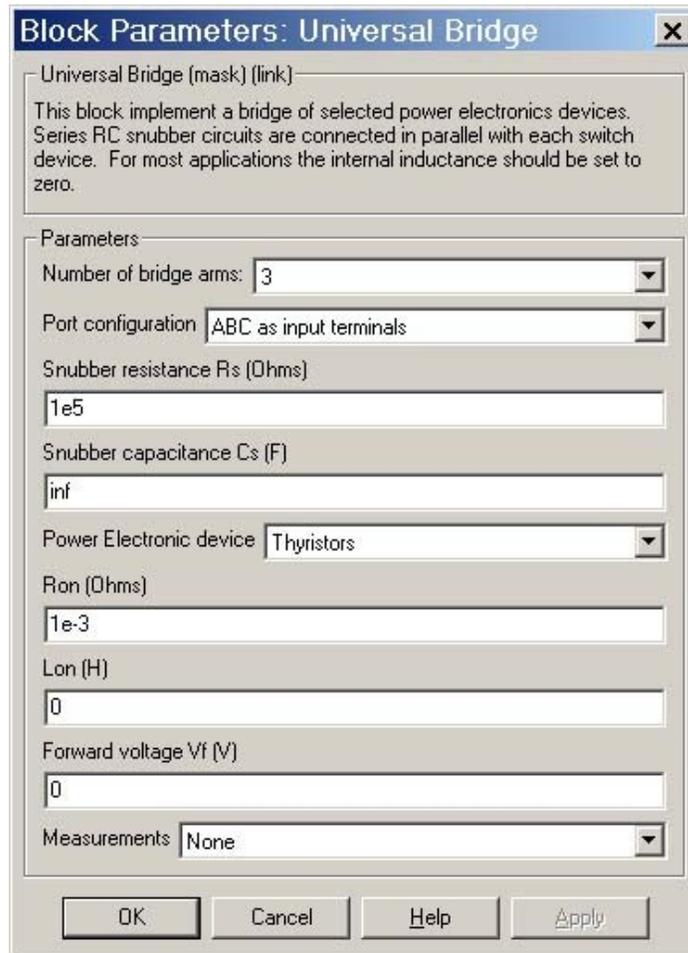


Рис. 55

Окно задания параметров:

Окно задания параметров модели универсального моста включает в себя список из восьми возможных моделей полупроводниковых приборов, на которых может строиться модуль, и в зависимости от выбора типа прибора составляющих мост – несколько изменяется.



Параметры блока:

Number of bridge arms:

[Число плеч моста]. Выбирается из списка: 1, 2 или 3.

Port configuration:

[Конфигурация портов]. Параметр определяет, какие зажимы порта будут входными, а какие – выходными. Значение параметра выбирается из списка:

- 1) ABC as input terminals – зажимы А, В и С являются входными,
- 2) ABC as output terminals – зажимы А, В и С являются выходными.

Snubber resistance R_s (Ohm):

[Сопротивление демпфирующей цепи (Ом)].

Snubber capacitance C_s (F):

[Емкость демпфирующей цепи (Ф)]. Емкость демпфера устанавливается равной 0, чтобы устранить влияние демпфирующей цепи, и равной ∞ , чтобы получить чисто активную демпфирующую цепь, состоящую из одного сопротивления R_s .

Power Electronic device:

[Вид полупроводниковых устройств моста]. Значение параметра выбирается из списка:

- 1) Diodes – диоды,
- 2) Thyristors – тиристоры,
- 3) GTO/Diodes – полностью управляемые тиристоры, шунтированные обратными диодами,
- 4) MOSFET/Diodes – MOSFET-транзисторы, шунтированные обратными диодами,
- 5) IGBT/Diodes – IGBT-транзисторы, шунтированные обратными диодами,
- 6) Ideal Switches – идеальные ключи.

Measurements:

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок Multimeter, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- 1) None – нет переменных для отображения,
- 2) Device voltages – напряжения на полупроводниковых устройствах,
- 3) Device currents – токи полупроводниковых устройств,
- 4) UAB UBC UCA UDC voltages – напряжения на зажимах моста.
- 5) All voltages and currents – все напряжения и токи моста.

Отображаемым сигналам в блоке Multimeter присваиваются метки:

- 1) Usw1, Usw2, Usw3, Usw4, Usw5, Usw6 – напряжения ключей,
- 2) Isw1, Isw2, Isw3, Isw4, Isw5, Isw6 – токи ключей,
- 3) Uab, Ubc, Uca, Udc – напряжения на зажимах моста.

Кроме приведенных выше параметров, в окне диалога задаются параметры и для выбранных полупроводниковых приборов:

Ron (Ohm):

[Сопротивление во включенном состоянии (Ом)]. Этот параметр доступен, когда выбрано силовое электронное устройство – Ideal Switches или MOSFET/Diodes;

Lon (H):

[Индуктивность во включенном состоянии (Гн)];

Forward voltage Uf (V):

[Падение напряжения в прямом направлении (В)]. Этот параметр доступен только, когда выбрано силовое электронное устройство в виде диодов или тиристоров;

Forward voltages [Device Vf(V), Diode Vfd(V)]:

[Падения напряжения в прямом направлении на силовом элементе и диоде (В)]. Этот параметр доступен, когда выбрано силовое электронное устройство – GTO/Diodes или IGBT/Diodes;

Current 10% fall time Tf (s):

[Время спада тока до уровня 0,1 от тока в момент выключения (с)]. Этот параметр доступен, когда выбрано силовое электронное устройство – GTO/Diodes или IGBT/Diodes;

Current tail time Tt (s):

[Время затягивания (с)]. Время, за которое ток уменьшится до нуля от уровня 0,1 тока в момент выключения. Этот параметр доступен, когда выбрано силовое электронное устройство – GTO/Diodes или IGBT/Diodes.

Модель моста является нелинейной, поэтому для ее работы лучше использовать дискретные решатели. В этих случаях параметры демпферной цепи Rs и Cs выбираются по формулам

$$R_s > 2 \cdot T_s / C_s; \quad C_s < P_n / (1000 \cdot 2\pi f \cdot U_n^2),$$

где P_n – номинальная мощность одной фазы выпрямителя (ВА); U_n – номинальное линейное напряжение (В); f – частота сети (Гц); T_s – время шага моделирования (с). Параметр дискретизации.

Выбор данных параметров гарантирует устойчивое решение. Но, следует учесть, что значения демпфирующих параметров при этом могут отличаться от реальных значений в физической цепи.

На рис. 56 приведена схема модели трехфазного мостового выпрямителя, работающего на активную нагрузку, при частоте сети 50 Гц.

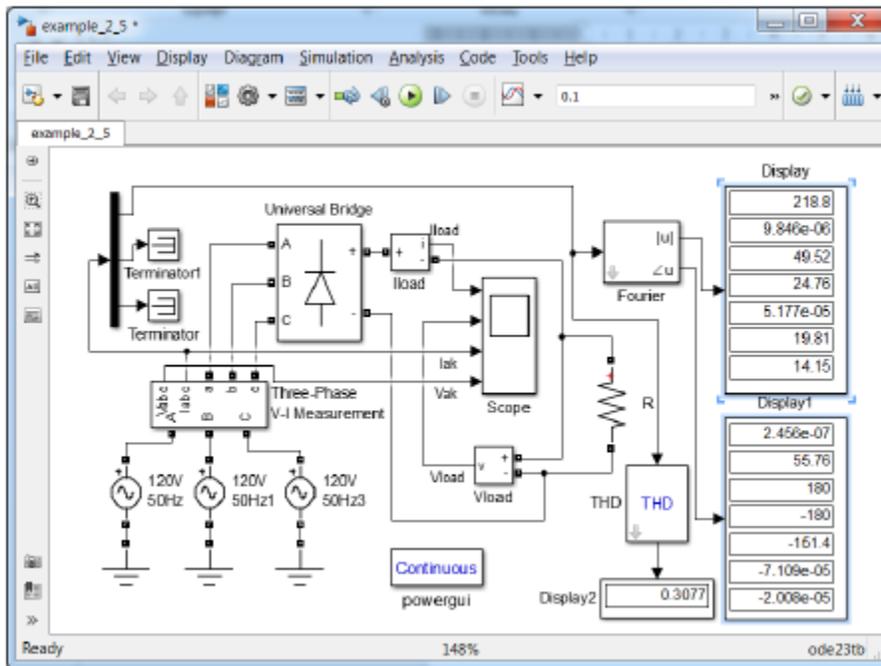


Рис. 56

Графические результаты моделирования, представленные на рис. 57, свидетельствуют о том, что кривые тока на входе выпрямителя симметричны относительно оси времени, т.е. в них присутствуют только нечетные гармоники.

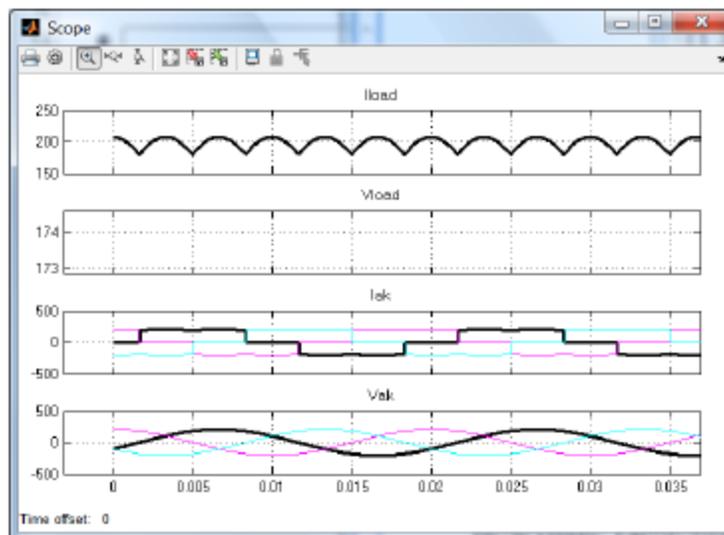


Рис. 57

Использование блоков Fourier и THD позволяет определить спектральный состав и коэффициент нелинейных искажений (THD) на выходе выпрямителя.

Спектральный состав и коэффициент нелинейных искажений рассчитываем с помощью программы powergui. Для этого необходимо записать в файл данные, поступающие в Scope. С этой целью в окне Scope нажимаем кнопку Parameters, переходим во вкладку History и вносим в неё соответствующие изменения.

Постоянных составляющих в кривых токов нет. В силу этого в окне Harmonic (0=DC, 1=fundamental): блока Fourier укажем нечетные гармоники с 1 по 13 (рис. 58).

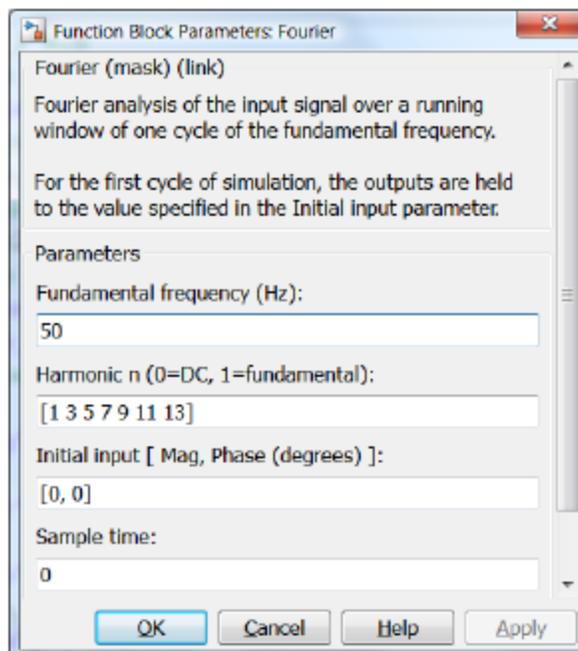


Рис. 58

После этого двойным щелчком вызываем программу powergui, нажимаем FFT Analysis (Fast Fourier transform).

В верхнем правом углу окна имеются окошки с названием переменной, созданной в Scope, и наименованием сигнала, частотный спектр которого требуется найти. Обязательно следует указать основную частоту (Fundamental frequency) равную 50 Гц. Как и в предыдущем случае учитываем только шесть гармоник. В связи с этим, максимальную частоту (Max frequency) указываем равную 1000 Гц ($13 \cdot 50 \approx 1000$).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что коэффициент нелинейных искажений в трехфазном мостовом выпрямителе меньше, чем в однополупериодном. Численные значения, полученные в ходе расчетов, представлены на рис. 59. Наибольшая гармоника – пятая. Её следует подавлять с помощью фильтров.

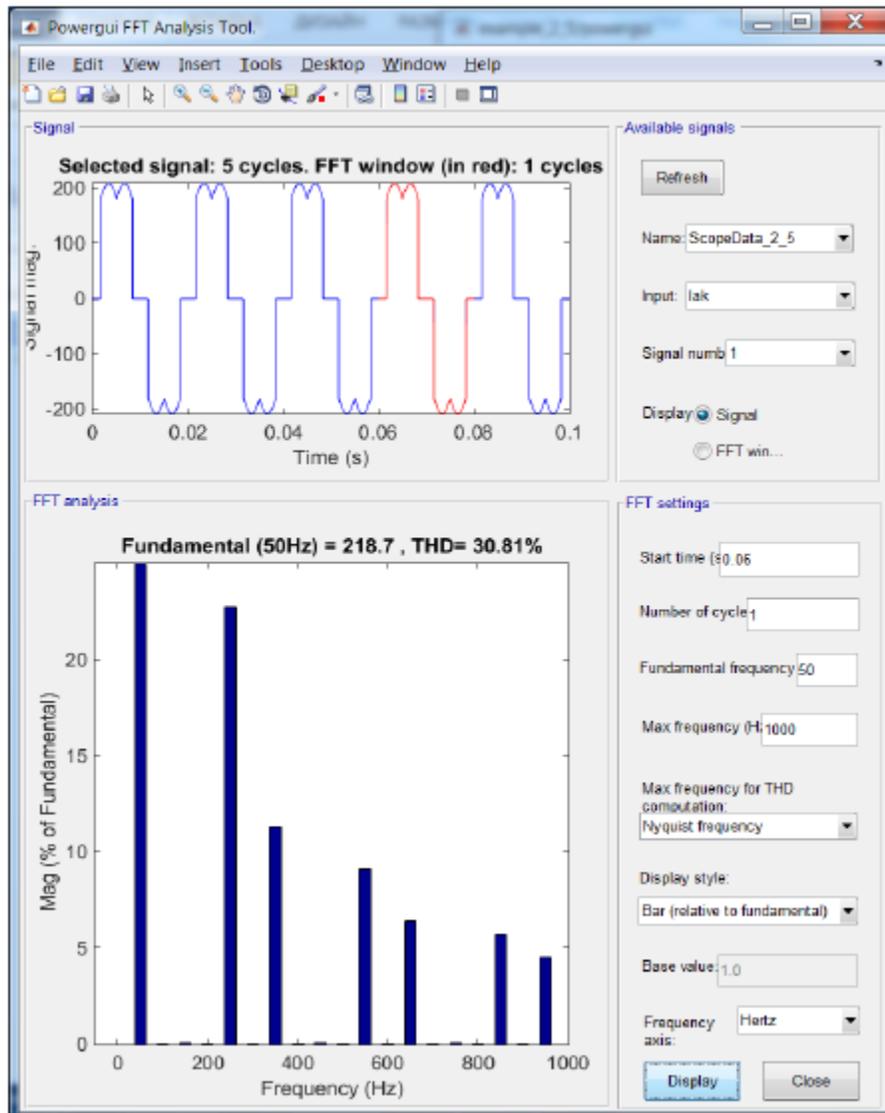
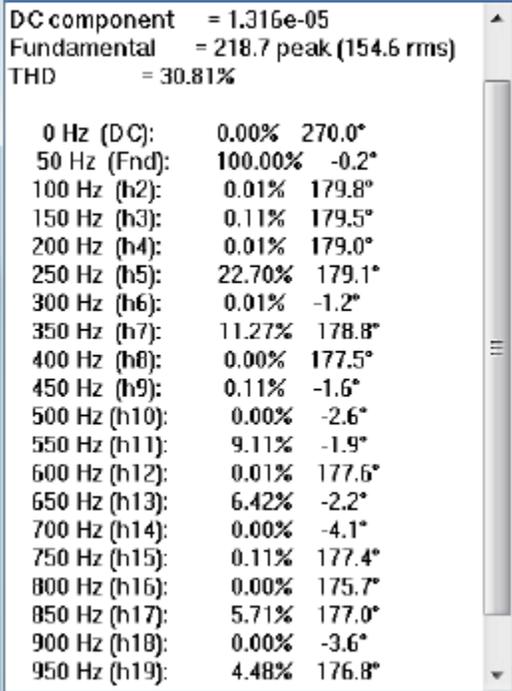


Рис. 59

В библиотеке SimPowerSystems Specialized Technology фильтры реализованы в блоке Three-Phase Harmonic Filter. Демонстрационная модель power_harmonicfilter, которую можно запустить из окна команд, дает

представление об использовании фильтров для подавления высших гармоник в энергосистеме (рис. 60).



Frequency (Hz)	Component	Magnitude (%)	Phase (°)
0	DC component	1.316e-05	
50	Fundamental	218.7 peak (154.6 rms)	
	THD	30.81%	
0	0 Hz (DC)	0.00%	270.0°
50	50 Hz (Fnd)	100.00%	-0.2°
100	100 Hz (h2)	0.01%	179.8°
150	150 Hz (h3)	0.11%	179.5°
200	200 Hz (h4)	0.01%	179.0°
250	250 Hz (h5)	22.70%	179.1°
300	300 Hz (h6)	0.01%	-1.2°
350	350 Hz (h7)	11.27%	178.8°
400	400 Hz (h8)	0.00%	177.5°
450	450 Hz (h9)	0.11%	-1.6°
500	500 Hz (h10)	0.00%	-2.6°
550	550 Hz (h11)	9.11%	-1.9°
600	600 Hz (h12)	0.01%	177.6°
650	650 Hz (h13)	6.42%	-2.2°
700	700 Hz (h14)	0.00%	-4.1°
750	750 Hz (h15)	0.11%	177.4°
800	800 Hz (h16)	0.00%	175.7°
850	850 Hz (h17)	5.71%	177.0°
900	900 Hz (h18)	0.00%	-3.6°
950	950 Hz (h19)	4.48%	176.8°

Рис. 60

Раздел 2

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО СИЛОВЫМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Виртуальные модели полупроводниковых преобразователей электрической энергии созданы в математическом пакете MatLab+Simulink.

При моделировании преобразователей и электронных схем в пакете математическом пакете MatLab+Simulink выполняются следующие действия:

- формируется электрическая схема анализируемого устройства с помощью встроенного редактора, для этого нужные компоненты перетаскиваются с панели компонентов в рабочую область и соединяются друг с другом с помощью проводников, а затем устанавливаются требуемые значения параметров компонентов;

- к схеме подключаются необходимые тестовые инструменты: функциональный генератор, вольтметр, амперметр, осциллограф, логический анализатор, пробник и др.;

- запускается процесс моделирования, путем нажатия на виртуальную кнопку "Пуск";

- результаты анализа, например, осциллограммы периодического процесса или амплитудно-частотная характеристика устройства можно наблюдать на экране монитора, а при необходимости и сохранять для последующего документирования.

2.1 КОМПЛЕКС ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: исследование электромагнитных процессов и основных соотношений в неуправляемых выпрямителях, выполненных по однофазной однополупериодной и однофазной мостовой схемам при работе на различные виды нагрузки. Приобретение навыков анализа схем силовой электроники с помощью математического пакета MatLab+Simulink.

Принципиальная схема однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя и его схема замещения изображены на рис. 61.

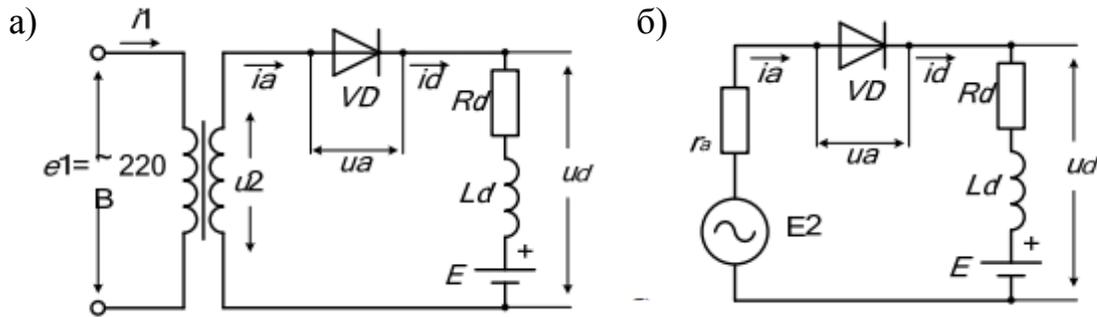


Рис. 61. Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 62.

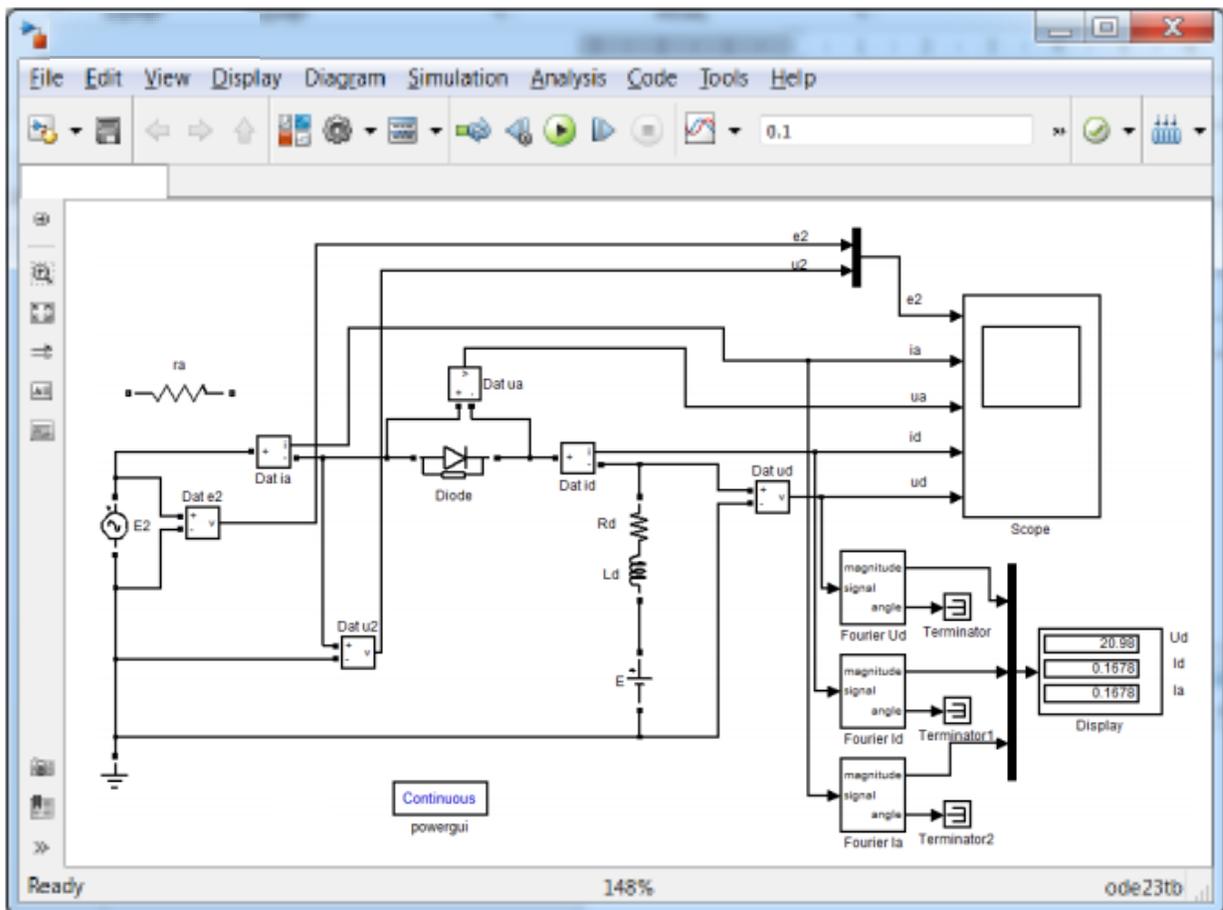


Рис. 62. Виртуальная модель однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС (E2), выпрямительный диод (Diode), нагрузка (Rd, Ld, E), датчики напряжения и тока (Dat e2, Dat u2, Dat ia, Dat ua, Dat id, Dat ud), осциллограф (Scope), блоки разложения в ряд Фурье (Fourier Ud, Fourier Id, Fourier Ia) и дисплей (Display).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник синусоидальной ЭДС (E2) – имитирует ЭДС на вторичной стороне трансформатора.

Изменяемый параметр блока:

– амплитуда ЭДС на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС E2 в соответствии с таблицей вариантов (табл. 4) и умножить на $\sqrt{2}$;

2) активное сопротивление (ra), позволяет учесть активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к его вторичной стороне. Вводится в схему студентами самостоятельно. Установить сопротивление ra = 10 Ом;

3) выпрямительный диод (Diode). Изменяемые параметры блока:

– дифференциальное сопротивление вентиля во включенном состоянии гд (Resistance Ron (Ohms)). Установить гд = 1 Ом);

– пороговое напряжение вентиля U0 (Forward voltage Vf (V)). Установить U0 = 0,8 В;

– начальный ток, протекающий через диод (Initial current Ic (A)). Установить Ic = 0 А);

– индуктивность вентиля во включенном состоянии (Inductance Lon (H)). Установить Lon = 0 Гн;

– демпфирующая цепь (Snabber) – цепь, состоящая из последовательно включенных активного сопротивления Rs и конденсатора Cs. Эта схема подключается параллельно диоду. Установить Rs = 106 Ом, Cs = inf (емкость равна бесконечности, что соответствует перемычке в схеме). Ввод таких параметров имитирует обратное сопротивление диода;

4) нагрузка (Rd, Ld, E) состоит из двух последовательно соединенных блоков: активно-индуктивной нагрузки (Rd, Ld) и против-ЭДС (E). Для выбора параметра активно-индуктивной части нагрузки необходимо дважды щелкнуть

по блоку R_d , L_d и в раскрывающейся вкладке «Branch type» установить параметры R , L . Для выбора противо-ЭДС необходимо дважды щелкнуть по блоку E .

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

– активная, если $L_d = 0$, $E = 0$; R_d – установить в соответствии с заданным вариантом (см. табл. 4);

– активно-индуктивная, если $E = 0$; R_d – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов 4). Для расчета L_d индуктивное сопротивление X_d принять равным R_d (см. примечание 2 после таблицы вариантов 4);

– активно-индуктивная с противо-ЭДС – R_d , L_d , E – установить в соответствии с заданным вариантом и примечанием 3 к таблице вариантов 4.

5) датчик напряжения ($Dat\ e2$) – позволяет осциллографировать ЭДС на вторичной стороне трансформатора;

6) датчик напряжения ($Dat\ u2$) – позволяет осциллографировать напряжение на вторичной стороне трансформатора;

7) датчик тока ($Dat\ ia$) и датчик напряжения ($Dat\ ua$) – позволяют осциллографировать анодный ток диода и напряжение на вентиле (анодное напряжение);

8) датчик тока ($Dat\ id$) – позволяет осциллографировать выпрямленный ток, протекающий через нагрузку;

9) датчик напряжения ($Dat\ ud$) – позволяет осциллографировать выпрямленное напряжение;

10) осциллограф ($Scope$) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

11) блоки разложения в ряд Фурье ($Fourier\ Ud$, $Fourier\ Id$, $Fourier\ Ia$) – предназначенные для выделения основной составляющей (среднее значение) из мгновенных значений напряжения и токов:

$Fourier\ Ud$ – среднее значение выпрямленного напряжения;

$Fourier\ Id$ – среднее значение выпрямленного тока;

$Fourier\ Ia$ – среднее значение анодного тока.

Для корректности работы схемы и исключения появления сообщения об ошибке в схеме не используемые выходы рекомендуется подключать к блокам Terminator.

12) дисплей (Display) – блок, предназначенный для цифрового отображения средних значений напряжения и тока, снимаемых с блоков разложения в ряд Фурье (U_d , I_d , I_a).

Принципиальная схема однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя, выполненного по мостовой схеме, и его схема замещения изображены на рис. 63.

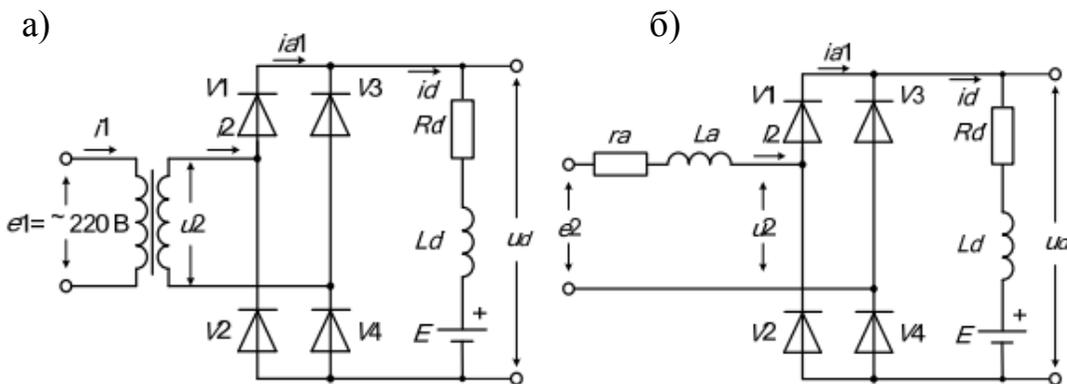


Рис. 63. Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) однофазной мостовой схемы выпрямления

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 64.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС (E_2), трансформатор (TR), диодный мост (Universal Bridge), нагрузка (R_d , L_d , E), датчики напряжения и тока (Dat e_2 , Dat u_2 , Dat i_2 , Dat i_d , Dat u_d), мультиметр (Multimeter), осциллограф (Scope), блоки разложения в ряд Фурье (Fourier U_d , Fourier I_d , Fourier I_a) и дисплей (Display).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник синусоидальной ЭДС (E_2) – имитирует ЭДС на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС E_2 в соответствии с таблицей вариантов 4 и умножить на $\sqrt{2}$;

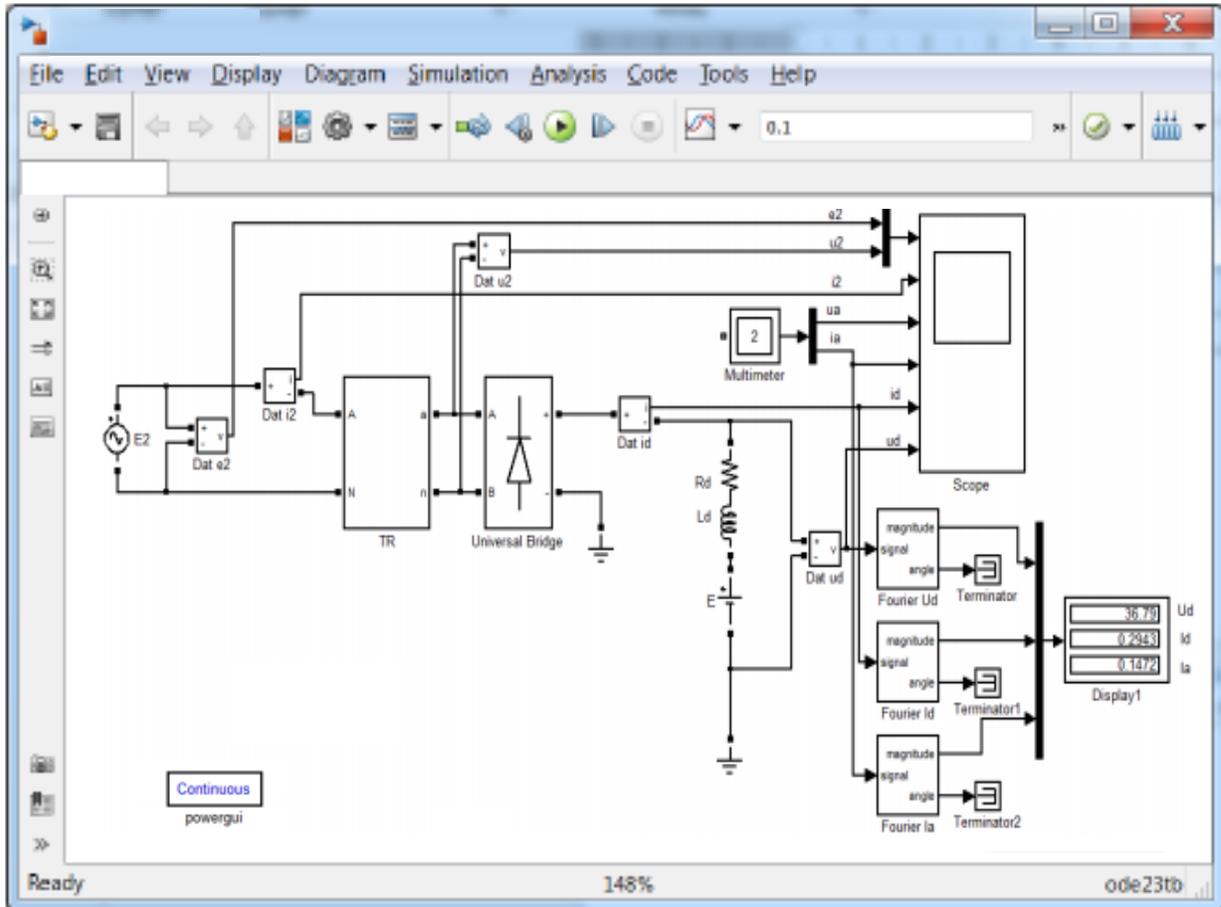


Рис. 64. Виртуальная модель неуправляемой однофазной мостовой схемы выпрямления

2) трансформатор (TR) – блок, реализованный на базе RL – цепи; имитируется схема замещения трансформатора, приведенного ко вторичной стороне. Изменяемые параметры блока:

- индуктивность рассеяния трансформатора установить $L_a = 0,03$ Гн;
- активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной стороне. Установить $r_a = 10$ Ом;

3) диодный мост (Universal Bridge) – блок, имитирующий однофазную мостовую схему выпрямления. Изменяемые параметры блока:

- тип силового полупроводникового элемента (Power Electronic device) – установить – диод (Diodes);
- количество плеч универсального моста (Numbers of bridge arms) – установить равное 2;

– демпфирующая цепь (Snubber) – цепь, состоящая из последовательно включенных активного сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно диодам – установить $R_s = 106 \text{ Ом}$, $C_s = \text{inf}$ (емкость равна бесконечности, что соответствует перемычке в схеме). Ввод таких параметров имитирует обратное сопротивление диодов.

– дифференциальное сопротивление вентиля во включенном состоянии (Resistance R_{on} (Ohms)). Установить $r_d = 1 \text{ Ом}$;

– индуктивность вентиля во включенном состоянии (Inductance L_{on} (H)). Установить $L_{on} = 0 \text{ Гн}$;

– пороговое напряжение вентиля U_0 (Forward voltage V_f (V)). Установить $U_0 = 0,8 \text{ В}$;

4) нагрузка (R_d , L_d , E) состоит из двух последовательно соединенных блоков: активно-индуктивной нагрузки (R_d , L_d) и противо- ЭДС (E). Для выбора параметра активно-индуктивной части нагрузки необходимо дважды щелкнуть по блоку R_d , L_d и в раскрывающейся вкладке «Branch type» установить параметры R , L . Для выбора противо- ЭДС необходимо дважды щелкнуть по блоку E .

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

– активная, если $L_d = 0$, $E = 0$; R_d – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов 4);

– активно-индуктивная, если $E = 0$; R_d – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов 4). Для расчета L_d индуктивное сопротивление X_d принять равным R_d (см. примечание 2 после таблицы вариантов 4);

– активно-индуктивная с противо-ЭДС – R_d , L_d , E – установить в соответствии с заданным вариантом и примечанием 3 к таблице вариантов 4.

5) датчик напряжения (Dat e2) – позволяет осциллографировать ЭДС на вторичной стороне трансформатора;

6) датчики напряжения и тока (Dat u2, Dat i2) – позволяют осциллографировать напряжение и ток на вторичной стороне трансформатора (на входе блока вентилях);

7) датчики напряжения и тока (Dat ud, Dat id) – позволяют осциллографировать выпрямленное напряжение и выпрямленный ток;

8) мультиметр (Multimeter) – блок, позволяющий измерять все токи и напряжения в схеме. В однофазной мостовой схеме выпрямления измеряет все токи и напряжения блока диодный мост (Universal Bridge); Во вкладке «Measurements» выбрать «All voltages and currents», что обозначает измерение всех токов и напряжений в блоке Universal Bridge. С помощью блока мультиметр (Multimeter) можно передать их на осциллограф.

9) осциллограф (Scope) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых со всех датчиков напряжения и тока, а также мультиметра.

10) блоки разложения в ряд Фурье (Fourier Ud, Fourier Id, Fourier Ia) – предназначенные для выделения основной составляющей (среднее значение) из мгновенных значений напряжения и токов:

Fourier Ud – среднее значение выпрямленного напряжения;

Fourier Id – среднее значение выпрямленного тока;

Fourier Ia – среднее значение анодного тока.

11) дисплей (Display) – блок, предназначенный для цифрового отображения средних значений напряжения и тока, снимаемых с блоков разложения в ряд Фурье (Ud, Id, Ia).

Предварительное домашнее задание

а) изучить темы курса «Однофазные выпрямители» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) для чисто активной нагрузки построить в масштабе временные диаграммы вторичной ЭДС e_2 , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a . Действующее значение ЭДС E_2 взять из таблицы вариантов 4. Вентиль считать идеальным;

в) определить значения напряжений и токов приведенные в табл. 1 для однофазной однополупериодной или мостовой схемы выпрямления в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4;

г) для активной нагрузки с противо-ЭДС построить в масштабе временные

диаграммы ЭДС e_2 , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a . Действующее значение ЭДС E_2 взять из таблицы вариантов 4. Вентили считать идеальными.

Таблица 1

Основные соотношения для однофазных выпрямителей

Однополупериодный выпрямитель	Мостовой выпрямитель	
Среднее значение идеального выпрямленного напряжения		
$U_{d0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} U_{2m} \cdot \cos \omega t \cdot d\omega t =$ $= \frac{U_{2m}}{\pi} = 0,45 \cdot U_2.$	$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} U_{2m} \cdot \cos \omega t \cdot d\omega t =$ $= \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi} = 0,9 \cdot U_2.$	(1)
где U_{2m} – амплитуда напряжения на вторичной стороне трансформатора.		
$U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2$		(2)
U_2 – действующее значение напряжения на вторичной стороне трансформатора.		
Амплитуда выпрямленного напряжения		
$U_{d \max} = U_{2m} = \pi \cdot U_{d0}$	$U_{d \max} = U_{2m} = \pi \cdot U_{d0} / 2$	(3)
Амплитуда выпрямленного тока		
$I_{d \max} = \pi \cdot I_d$	$I_{d \max} = \pi \cdot I_d / 2$	(4)
Среднее значение выпрямленного тока		
$I_d = \frac{U_{d0}}{R_d}$		(5)
Среднее и амплитудное значение анодного тока		
$I_a = I_d, I_{a \max} = I_{d \max} = \pi \cdot I_d$	$I_a = I_d / 2,$ $I_{a \max} = I_{d \max} / 2 = \pi \cdot I_d / 2$	(6)
Амплитуда обратного напряжения на вентиле		
$U_{a \max} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_{d0}$	$U_{a \max} = 2 \cdot U_{2m} = 2\sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_{d0}$	(7)

д) по построенным в п. г) временным диаграммам определить амплитудные значения напряжений и токов в схеме.

Результаты предварительных расчетов занести в табл. 2 для однофазной однополупериодной и в табл. 3 для однофазной мостовой схем выпрямления, в отчете сравнить с результатами, полученными экспериментальным путем.

Таблица 2

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Однополупериодный выпрямитель					
	Предварит. расчет Rd=	Нагрузка			Влияние	
		Rd=	Rd= Ld=	Rd= Ld=, E=	La=	Ld=
Ud0						
U2m						
Udmax						
Idmax						
Id						
Ia						
Uamax						

Таблица 3

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Мостовой выпрямитель					
	Предварит. расчет Rd=	Нагрузка			Влияние	
		Rd=	Rd= Ld=	Rd= Ld=, E=	La=	Ld=
Ud0						
U2m						
Udmax						
Idmax						
Id						
Ia						
Uamax						

Программа исследования схем однофазных неуправляемых выпрямителей

1. Исследование модели однополупериодного неуправляемого выпрямителя:

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при различных видах нагрузки.

1.3. Исследование влияния параметров элементов схемы на вид осциллограмм и результаты измерений.

2. Исследование модели однофазного мостового неуправляемого выпрямителя:

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при различных видах нагрузки.

2.3. Исследование влияния параметров элементов схемы на вид осциллограмм и результаты измерений.

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. *Исследование модели однополупериодного неуправляемого выпрямителя:*

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) запустить программу «MatLab»;

б) открыть файл «neur_однополуп.mdl». После открытия на экране появится виртуальная модель неуправляемого выпрямителя, представленная на рис. 62;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при различных видах нагрузки.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в разделе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для активной нагрузки. Для этого после окончания расчета модели (пусковая кнопка вновь приняла вид треугольника) направить курсор мыши на блок (Score) и щелкнуть два раза левой кнопкой мыши. После этих действий появится окно, имитирующее экран реального осциллографа, содержащего пять каналов.

Осциллограммы можно растягивать по осям X и Y или менять масштаб осей, используя методику, приведенную в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода в конце осциллограммы – в установившемся режиме), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в Paint приведены также в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам;

Записать показания измерительных приборов (в табл. 2) и сравнить их с расчетными;

в) аналогичным образом снять и сохранить осциллограммы, полученные при расчете с другим характером нагрузки: активно-индуктивным и при работе выпрямителя на противо-ЭДС. Параметры нагрузки при этом устанавливать в соответствии с рекомендациями, приведенными в описании к виртуальным моделям. Объяснить внешний вид полученных осциллограмм. Записать показания измерительных приборов (в табл. 2) и сравнить их с показаниями при активной нагрузке;

1.3. Исследование влияния параметров элементов схемы на вид осциллограмм и результаты измерений.

а) включить в схему последовательно с ЭДС E_2 сопротивление r_a (по указанию преподавателя), исследовать его влияние на осциллограммы и результаты измерений;

б) увеличить индуктивность нагрузки в 2 раза и исследовать влияние на осциллограммы и результаты измерений.

2. Исследование модели однофазного мостового неуправляемого выпрямителя:

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) открыть файлы «neupr_most.mdl». После открытия на экране появится виртуальная модель неуправляемого мостового выпрямителя, представленная на рис. 64;

б) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели однофазного мостового неуправляемого выпрямителя;

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при различных видах нагрузки.

а) запустить расчет модели;

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для активной нагрузки для мостовой схемы выпрямления. Обработать осциллограммы по аналогии с п. 1.2.б;

в) аналогичным образом снять и сохранить осциллограммы, полученные при расчете с другим характером нагрузки: активно-индуктивным и/или при работе выпрямителя на противо-ЭДС (по указанию преподавателя). Параметры нагрузки при этом устанавливать в соответствии с рекомендациями, приведенными в описании к виртуальным моделям. Объяснить внешний вид полученных осциллограмм, определить режим работы в схеме (непрерывный, граничный, прерывистый). Записать показания измерительных приборов (в табл. 3) и сравнить их с показаниями при активной нагрузке;

2.3. Исследование влияния параметров элементов схемы на вид осциллограмм и результаты измерений.

а) исследовать влияние параметров схемы L_d , L_a (см. рис. 64) на форму выпрямленного напряжения u_d и анодного тока i_a , режим работы, а также на результаты измерений;

б) назовите, какие параметры схемы нужно изменить, чтобы изменился режим работы; произвести изменение параметра (по указанию преподавателя), приводящие к изменению режима.

Выбор варианта задания

Номер варианта определяется последними двумя цифрами зачетной книжки студента. Если количество предлагаемых вариантов меньше учебного шифра студента, то номер варианта определяется как разность уменьшаемого (шифра студента) и вычитаемого (числа предлагаемых вариантов в данном задании). Например, шифр студента – 67, а число вариантов в задании на лабораторную работу 1 – 50, тогда номер варианта равен: $67 - 50 = 17$.

Таблица 4

Таблица вариантов

№ варианта	№ задания	ЭДС на вторичной стороне трансформатора E2, В	Активное сопротивление нагрузки Rd, Ом
1, 26	А, Б	45	80
2, 27	А, Б	46	85
3, 28	А, Б	47	90
4, 29	А, Б	48	95
5, 30	А, Б	49	100
6, 31	А, В	50	105
7, 32	А, В	51	110
8, 33	А, В	52	120
9, 34	А, В	53	125
10, 35	А, В	54	130
11, 36	Б, А	55	135
12, 37	Б, А	56	140
13, 38	Б, А	57	80
14, 39	Б, А	45	85
15, 40	Б, А	46	90
16, 41	Б, В	47	95
17, 42	Б, В	48	100
18, 43	Б, В	49	105
19, 44	Б, В	50	110
20, 45	Б, В	51	120
21, 46	В, Б	52	125

22, 47	В, Б	53	130
23, 48	В, Б	54	135
24, 49	В, Б	55	140
25, 50	В, Б	56	150

Примечания:

1. Студенты, получившие № задания А – для однополупериодной схемы выпрямления выполняют пункты: а), б) и в) из параграфа предварительное домашнее задание; № задания Б – для мостовой схемы выпрямления выполняют пункты: а), б) и в); № задания В – для однополупериодной схемы выпрямления выполняют пункты: а), б) и г).

2. При определении индуктивного сопротивления нагрузки принять $X_d = R_d$. Тогда $L_d = X_d / \omega$ Гн, где $\omega = 314$ при частоте 50 Гц.

3. При работе на активную и активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС принять $E = 0,95 E_2$, а R_d и X_d уменьшить в 10 раз по сравнению с случаем активной или активно-индуктивной нагрузки.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4).
5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования однофазного неуправляемого выпрямителя (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4).
6. Осциллограммы и таблицу результатов измерений исследованных схем:
 - а) для активной нагрузки;
 - б) для активно-индуктивной нагрузки;

- в) для активно-индуктивной нагрузки с противо-ЭДС;
- г) для случаев исследования влияния изменения параметров элементов схемы, которые снимали по указанию преподавателя.

На осциллограммах отметить амплитуды и сравнить с предварительными домашними расчетами (см. табл. 2 и табл. 3).

Сделать выводы о причинах различия рассчитанных значений и полученных экспериментальным путем.

7. Обобщающие выводы.

По осциллограммам и результатам измерений сравнить однофазную однополупериодную и мостовую схемы выпрямления:

- а) по качеству выпрямленного напряжения;
- б) по величине выпрямленного напряжения;
- в) по величине обратного напряжения (по отношению к выпрямленному);

По осциллограммам и результатам измерений определить, на что влияет характер нагрузки.

Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируются выпрямители?
2. Какова наиболее полная структурная схема выпрямителя и почему она может упрощаться?
3. Какие схемы применяются для выпрямления однофазного тока?
4. Как работают однофазные схемы выпрямления?
5. Какие допущения принимаются при анализе схем выпрямления?
6. Какие допущения принимаются при создании схем замещения?
7. Как учитывается не идеальность вентиля?
8. Какие возможны виды нагрузок выпрямителя?
9. Как и зачем строятся временные диаграммы токов и напряжений?
10. Назовите основные величины, используемые при описании работы выпрямителей.
11. Назовите режимы работы выпрямителя и их отличия.
12. Какова частота пульсаций в изучаемых схемах?
13. Почему и как влияет характер нагрузки на форму токов в выпрямителе?

14. Как определяются основные соотношения между токами и напряжениями в схемах выпрямления?

15. Пояснить назначение блоков виртуальной модели имитирующей однофазный однополупериодный неуправляемый выпрямитель.

16. Пояснить назначение блоков виртуальной модели имитирующей однофазную мостовую схему выпрямления.

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: исследование электромагнитных процессов, регулировочных и внешних характеристик управляемых выпрямителей, выполненных по однофазной однополупериодной и однофазной мостовой схемам выпрямления.

Принципиальная схема однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя и его схема замещения изображены на рис. 65.

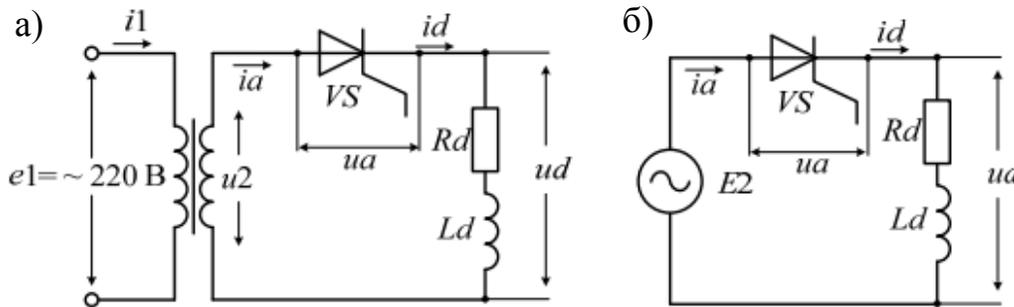


Рис. 65. Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) однофазного управляемого выпрямителя

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 66.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС (E_2), блок задания угла управления (α), система управления (SU), тиристор (Thyristor), нагрузка (R_d , L_d), датчики напряжения и тока ($Dat\ e_2$, $Dat\ i_d$, $Dat\ u_d$), осциллограф (Scope), блоки разложения в ряд Фурье (Fourier U_d , Fourier I_d) и дисплей (Display).

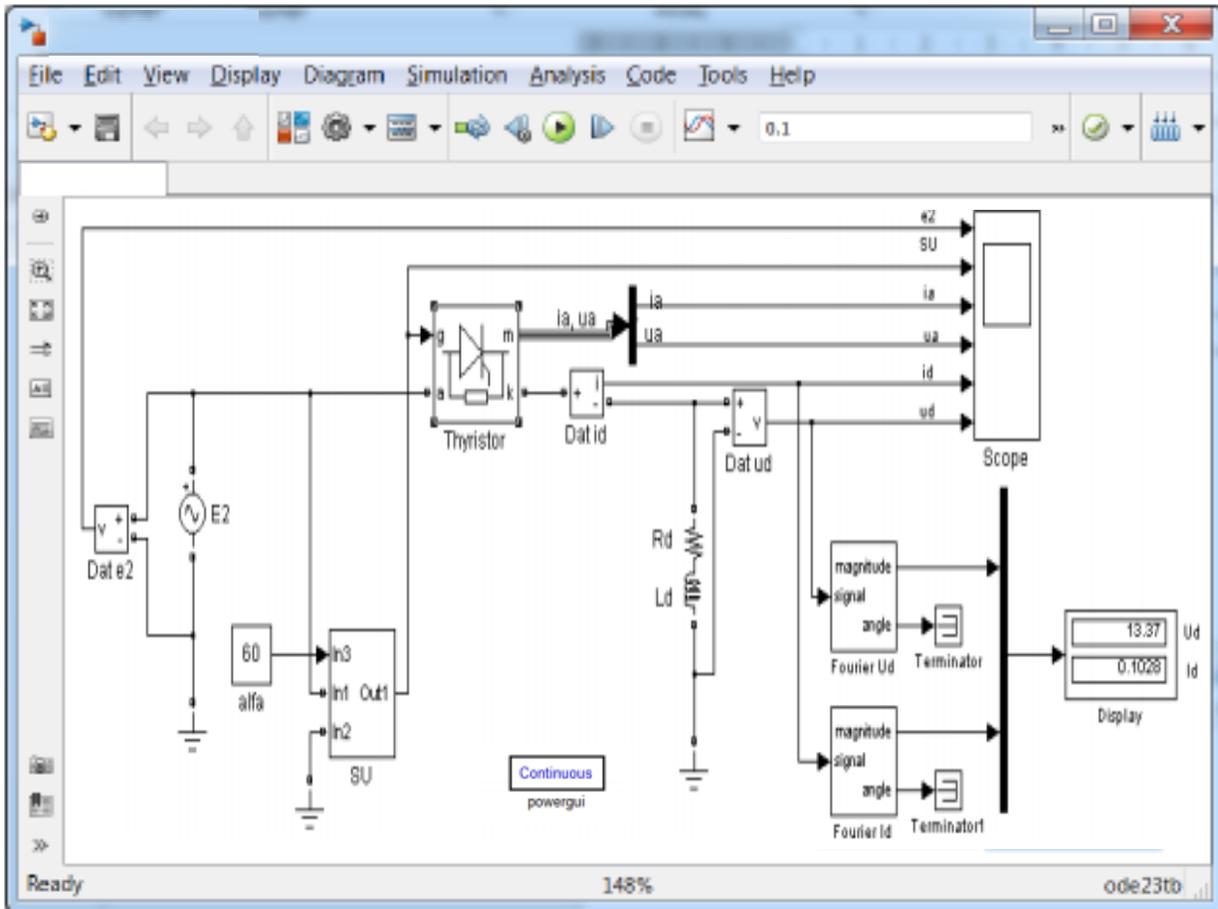


Рис. 66. Виртуальная модель однофазного управляемого выпрямителя

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник ЭДС (E2) – имитирует ЭДС на вторичной стороне трансформатора.

Изменяемые параметры блока:

- амплитуда ЭДС на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС E2 в соответствии с таблицей вариантов (табл. 7) и умножить на 2;

- фазовый сдвиг (установить 0);

- частота напряжения питания (установить $f = 50$ Гц);

- типовое время – установить «0».

2) блок задания угла управления (alfa) – позволяющий задавать угол управления тиристором (установить в соответствии с табл. 7);

3) система управления (SU) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристором;

4) тиристор (Thyristor) – блок, имитирующий работу тиристора. Обозначение входов и выходов: «a» – анод, «k» – катод, «g» – управляющий электрод тиристора, «m» – демультимплексор выходных сигналов тиристора (соединение данного выхода с блоком Mux дает возможность выдать на разные входы осциллографа ток i_a и напряжение u_a на тиристоре).

Изменяемые параметры блока:

– дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии r_d (Resistance R_{on} (Ohms)). Установить $r_d = 1$ Ом);

– индуктивность тиристора во включенном состоянии (Inductance L_{on} (H)). Установить 0 Гн;

– пороговое напряжение тиристора U_0 (Forward voltage V_f (V)). Установить $U_0 = 0,8$ В;

– начальный ток, протекающий через тиристор (Initial current I_c (A)). Установить $I_c = 0$ А);

– демпфирующая цепь (Snabber) – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристорам и устраняет перенапряжения при выключении тиристора. Установить $R_s = 106$ Ом, $C_s = \text{inf}$ (емкость равна бесконечности, что соответствует перемычке в схеме).

5) Нагрузка (R_d , L_d). Для выбора параметров активно-индуктивной нагрузки необходимо дважды щелкнуть по блоку R_d , L_d и в раскрывающейся вкладке «Branch type» установить тип нагрузки RL.

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

– активная – $L_d = 0$, R_d – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов 7);

– активно-индуктивная – R_d установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов). Индуктивность L_d установить в соответствии с примечанием 2 после таблицы вариантов 7;

6) датчик напряжения (Dat e2) – позволяет осциллографировать ЭДС на вторичной стороне трансформатора;

7) датчики напряжения и тока (Dat ud, Dat id) – позволяют осциллографировать выпрямленное напряжение и выпрямленный ток, протекающий через нагрузку;

8) осциллограф (Scope) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений;

9) блоки разложения в ряд Фурье (Fourier Ud, Fourier Id) – предназначенные для выделения постоянной составляющей (среднего значения) в напряжении и токе:

Fourier Ud – среднее значение выпрямленного напряжения;

Fourier Id – среднее значение выпрямленного тока;

Для корректности работы схемы и исключения появления сообщения об ошибке в схеме неиспользуемые выходы рекомендуется подключать к блокам Terminator.

10) дисплей (Display) – блок, предназначенный для цифрового отображения средних значений напряжения и тока, снимаемых с блоков разложения в ряд Фурье (Ud, Id).

Принципиальная схема однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя, выполненного по мостовой схеме, и его схема замещения изображены на рис. 67.

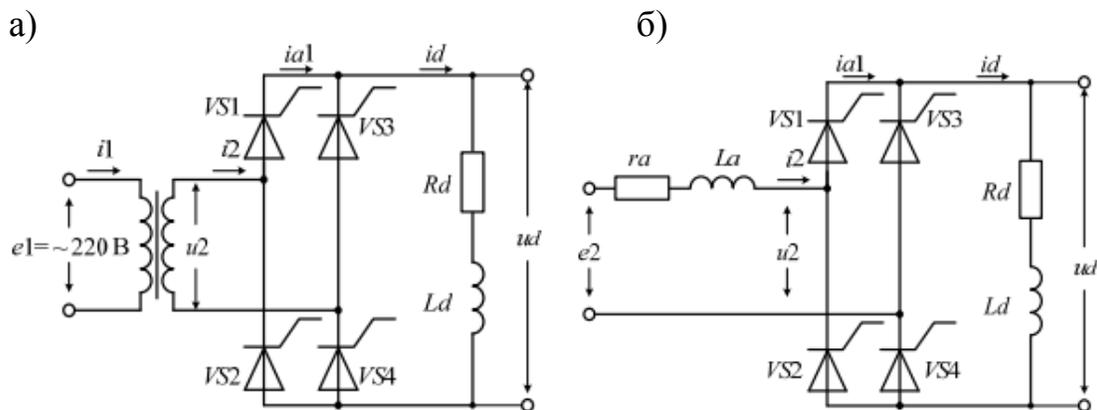


Рис. 67. Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) однофазного управляемого мостового выпрямления

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 68.

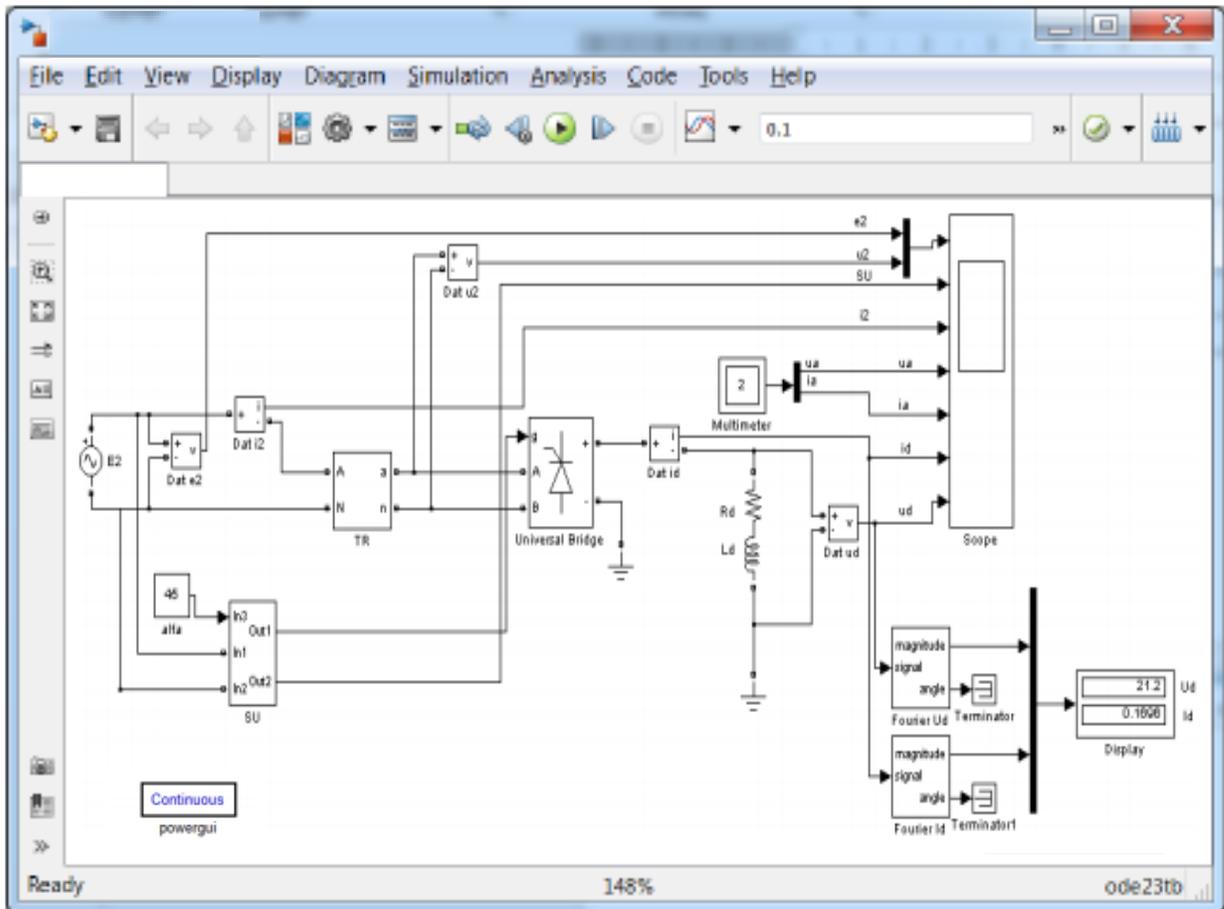


Рис. 68. Виртуальная модель однофазного управляемого мостового выпрямителя

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС (E2), трансформатор (TR), блок задания угла управления (alfa), система управления (SU), тиристорный мост (Universal Bridge), нагрузка (Rd, L), датчики напряжения и тока (Dat e2, Dat u2, Dat i2, Dat id, Dat ud), мультиметр (Multimeter), осциллограф (Scope), блоки разложения в ряд Фурье (Fourier Ud, Fourier Id) и дисплей (Display).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник синусоидальной ЭДС (E2) – имитирует ЭДС на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС E2 в соответствии с таблицей вариантов 7 и умножить на $\sqrt{2}$. Частоту установить равной 50 Гц;

2) трансформатор (TR) – блок, реализованный на базе RL – цепи, имитирует схему замещения трансформатора, приведенного ко вторичной стороне.

Изменяемые параметры блока:

- индуктивность рассеяния трансформатора. Установить $L_a = 0,06$ Гн;
- активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной стороне. Установить $r_a = 10$ Ом.

3) блок задания угла управления (alfa) – блок, позволяющий задавать угол управления тиристорами (установить в соответствии с заданным вариантом по данным табл. 7);

4) система управления (SU) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами. Система управления (SU) имеет два выхода. С первого по общей шине группа импульсов подается на все тиристоры, а второй выведен для осциллографирования сигнала управления первым тиристором;

5) тиристорный мост (Universal Bridge) – имитирующий однофазную мостовую схему управления. Изменяемые параметры блока:

– количество плеч универсального моста (Numbers of bridge arms) – установить равное 2;

– тип силового полупроводникового элемента (Power Electronic device) – установить – тиристор (Thyristors);

– дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии (Resistance R_{on} (Ohms)). Установить $r_d = 1$ Ом;

– индуктивность тиристора во включенном состоянии (Inductance L_{on} (H)). Установить $L_{on} = 0$ Гн;

– пороговое напряжение тиристора U_0 (Forward voltage V_f (V)). Установить $U_0 = 0,8$ В);

– демпфирующая цепь (Snubber) – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристорам и устраняет перенапряжения при выключении тиристора. Установить $R_s = 10e6$ Ом, $C_s = inf$.

Во вкладке «Measurements» выбрать «All voltages and currents», что обозначает измерение всех токов и напряжений в блоке Universal Bridge с

помощью внешнего блока мультиметр (Multimeter) и их последующее осциллографирование.

б) нагрузка (Rd, Ld). Для выбора параметров активно-индуктивной нагрузки необходимо дважды щелкнуть по блоку Rd, Ld и в раскрывающейся вкладке «Branch type» установить параметры R, L.

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

– активная – $Ld = 0$, Rd – установить в соответствии с заданным вариантом (см. табл. 7);

– активно-индуктивная – Rd установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов 7). Индуктивность Ld установить в соответствии с примечанием 2 после таблицы вариантов 7;

7) датчик напряжения (Dat e2) – позволяет осциллографировать ЭДС на вторичной стороне трансформатора;

8) датчики напряжения и тока (Dat u2, Dat i2) – позволяют осциллографировать напряжение и ток на вторичной стороне трансформатора (на входе блока вентилей);

9) датчики тока и напряжения (Dat id, Dat ud) – для осциллографирования выпрямленного тока и напряжения;

10) мультиметр (Multimeter) – блок, позволяющий измерять все токи и напряжения в блоке Universal Bridge.

11) осциллограф (Scope) – блок, предназначенный для наблюдения мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых со всех датчиков тока и напряжения, а также мультиметра.

12) блоки разложения в ряд Фурье (Fourier Ud, Fourier Id, Fourier Ia) – предназначенные для выделения основной составляющей (среднее значение) из мгновенных значений напряжения и токов:

Fourier Ud – среднее значение выпрямленного напряжения;

Fourier Id – среднее значение выпрямленного тока;

13) дисплей (Display) – блок, предназначенный для цифрового отображения средних значений напряжения и тока (Ud, Id), снимаемых с блоков разложения в ряд Фурье.

Предварительное домашнее задание

а) Изучить темы курса «Тиристоры», «Однофазные выпрямители», «Управляемые выпрямители тока», «Энергетические показатели выпрямителей» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) для заданного угла управления α построить в масштабе друг под другом временные диаграммы вторичной ЭДС e_2 , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a при чисто активной нагрузке. Действующее значение ЭДС E_2 взять из таблицы вариантов 7. Вентили и трансформатор считать идеальными;

в) для однофазной мостовой схемы и заданного угла управления α построить в масштабе друг под другом временные диаграммы вторичных ЭДС e_{2a} и e_{2b} выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a при активно-индуктивной нагрузке. При построении принять $x_d = \infty$. Действующее значение ЭДС E_2 взять из таблицы вариантов 7. Угол коммутации γ рекомендуется принять равным 10 град. Вентили считать идеальными;

г) рассчитать и построить регулировочную характеристику при активной нагрузке и идеальных вентилях и трансформаторе

$$U_{d\alpha 0} = U_{d0} \cdot \left[\frac{1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)}{2} \right],$$

где $U_{d0} = 0,45 \cdot U_2$ – для однофазной однополупериодной схемы; $U_{d0} = 0,9 \cdot U_2$ – для однофазной мостовой схемы;

д) рассчитать и построить регулировочную характеристику при активно-индуктивной нагрузке в непрерывном режиме ($x_d = \infty$) и идеальных вентилях и трансформаторе

$$U_{d\alpha 0} = U_{d0} \cdot \cos\alpha.$$

Программа исследования схем однофазных управляемых выпрямителей

1. Исследование модели однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

1.2. Осциллографирование при различных видах нагрузки.

1.3. Снятие регулировочной характеристики при различных видах нагрузки.

2. Исследование модели однофазного мостового управляемого выпрямителя

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

2.2. Осциллографирование при различных видах нагрузки.

2.3. Снятие регулировочной характеристики при различных видах нагрузки.

2.4. Снятие внешней характеристики при активно-индуктивной нагрузке.

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

Результаты предварительных расчетов занести в табл. 1 для однофазной однополупериодной и в табл. 3 для однофазной мостовой схем выпрямления, в отчете сравнить с результатами, полученными экспериментальным путем.

1. *Исследование модели однополупериодного управляемого выпрямителя:*

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) запустить программу «MatLab»;

б) открыть файл «upr_odnopolup.mdl». После открытия на экране появится виртуальная модель управляемого однополупериодного выпрямителя, представленная на рис. 68;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.

1.2. Осциллографирование при различных видах нагрузки.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в разделе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления при активной нагрузке.

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в Paint также приведены в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Таблица 1

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Однополупериодный выпрямитель					
	Предварит. расчет Rd=	Нагрузка			Влияние	
		Rd=	Rd= Ld=	Rd= Ld=, E=	La=	Ld=
Ud0						
U2m						
Udmax						
Idmax						
Id						
Ia						
Uamax						

в) аналогичным образом снять и сохранить осциллограммы, полученные при расчете с другим характером нагрузки: активно- индуктивным. Параметры нагрузки при этом устанавливать в соответствии с рекомендациями, приведенными в описании к виртуальным моделям. Объяснить внешний вид полученных осциллограмм. Записать показания измерительных приборов (в табл. 1) и сравнить их с показаниями при активной нагрузке.

1.3. Снятие регулировочной характеристики при различных видах нагрузки.

а) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при чисто активной нагрузке. При построении регулировочной характеристики изменять угол управления в блоке α (диапазон изменения $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$ с шагом 30° , см. табл. 2). Величину выпрямленного напряжения U_d снимать с блока дисплей (Display);

б) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при активно-индуктивной нагрузке (см. табл. 2). Определить требуемый диапазон изменения угла α для снижения U_d до 0.

Таблица 2

**Экспериментальные данные
для построения регулировочных характеристик**

Величина	Активная нагрузка						
α , град	0	30	60	90	120	150	180
U_d , В							
Величина	Активно-индуктивная нагрузка						
α , град	0	30	60	90	120	150	180
U_d , В							

2. *Исследование модели однофазного управляемого мостового выпрямителя:*

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) открыть файлы «upr_mostov.mdl».

б) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели однофазного мостового неуправляемого выпрямителя.

2.2. Осциллографирование при различных видах нагрузки.

а) запустить расчет модели;

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для мостовой схемы выпрямления при активной нагрузке.

Записать показания измерительных приборов (в табл. 3) и сравнить их с расчетными;

Таблица 3

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Мостовой выпрямитель					
	Предварит. расчет Rd=	Нагрузка			Влияние	
		Rd=	Rd= Ld=	Rd= Ld=, E=	La=	Ld=
Ud0						
U2m						
Udmax						
Idmax						
Id						
Ia						
Uamax						

в) аналогичным образом снять и сохранить осциллограммы, полученные при активно-индуктивной нагрузке. Параметры нагрузки при этом устанавливать в соответствии с рекомендациями, приведенными в описании к виртуальным моделям. Объяснить внешний вид полученных осциллограмм, определить режим работы в схеме (непрерывный, граничный, прерывистый). Записать показания измерительных приборов (в табл. 3) и сравнить их с показаниями при активной нагрузке;

2.3. Снятие регулировочной характеристики при различных видах нагрузки.

а) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при чисто активной нагрузке. При построении регулировочной характеристики изменять угол управления в блоке α (диапазон изменения $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$ с шагом 30° , см. табл. 4). Величину выпрямленного напряжения U_d снимать с блока дисплей (Display);

б) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при активно-индуктивной нагрузке (см. табл. 4). Определить требуемый диапазон изменения угла α для снижения U_d до 0. При каждом угле α по осциллограммам смотреть,

какой режим по току в выпрямителе. На регулировочной характеристике отметить точку, соответствующую граничному режиму.

Таблица 4

**Экспериментальные данные
для построения регулировочных характеристик**

Величина	Активная нагрузка						
α , град	0	30	60	90	120	150	180
U_d , В							
Величина	Активно-индуктивная нагрузка						
α , град	0	30	60	90	120	150	180
U_d , В							

2.4. Снятие внешней характеристики при активно-индуктивной нагрузке.

а) построить внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ по результатам измерений, приведенным в табл. 5 при заданном угле управления $\alpha_{зад}$ (в соответствии с заданным вариантом по данным табл. 7) для трех значений активного сопротивления нагрузки: $R_d = R_{заданному}$ (в соответствии с заданным вариантом по данным табл. 7), $R_d' = 2 \cdot R_d$, $R_d'' = 5 \cdot R_d$.

Величины выпрямленного напряжения U_d и тока I_d снимать с блока дисплей (Display).

В процессе измерений контролировать, что режим работы выпрямителя остается непрерывным.

Таблица 5

**Экспериментальные данные
для построения внешних характеристик**

Параметр	$\alpha_{зад} = \dots^\circ$		
Величина	$R_d =$	$R_d' = 2 \cdot R_d =$	$R_d'' = 5 \cdot R_d =$
U_d , В			
I_d , А			

б) по аналогии с методикой п.п а) по результатам измерений, приведенным в табл. 6 построить внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при угле управления $\alpha = \alpha_{зад} - 10^\circ$.

**Экспериментальные данные
для построения внешних характеристик**

Параметр	$\alpha_{зад} - 10^\circ = \dots^\circ$		
Величина	$R_d =$	$R_d' = 2 \cdot R_d =$	$R_d'' = 5 \cdot R_d =$
Ud, В			
Id, А			

Выбор варианта задания

Номер варианта определяется последними двумя цифрами зачетной книжки студента. Если количество предлагаемых вариантов меньше учебного шифра студента, то номер варианта определяется как разность уменьшаемого (шифра студента) и вычитаемого (числа предлагаемых вариантов в данном задании). Например, шифр студента – 67, а число вариантов в задании на лабораторную работу 1 – 50, тогда номер варианта равен: $67 - 50 = 17$.

Таблица вариантов

№ варианта	№ задания	Угол управления α , град	ЭДС на вторичной стороне трансформатора E2, В	Активное сопротивление нагрузки R_d , Ом
1, 26	А, Б	25	48	110
2, 27	А, Б	30	50	120
3, 28	А, Б	35	52	130
4, 29	А, Б	40	54	140
5, 30	А, Б	45	56	150
6, 31	А, В	25	56	110
7, 32	А, В	30	54	120
8, 33	А, В	35	52	130
9, 34	А, В	40	50	140
10, 35	А, В	45	48	150
11, 36	Б, А	25	48	110
12, 37	Б, А	30	50	120
13, 38	Б, А	35	52	130

Продолжение таблицы 7

14, 39	Б, А	40	54	140
15, 40	Б, А	45	56	150
16, 41	Б, В	25	56	110
17, 42	Б, В	30	54	120
18, 43	Б, В	35	52	130
19, 44	Б, В	40	50	140
20, 45	Б, В	45	48	150
21, 46	В, Б	25	48	110
22, 47	В, Б	30	50	120
23, 48	В, Б	35	52	130
24, 49	В, Б	40	54	140
25, 50	В, Б	45	56	150

Примечания:

1. Студенты, получившие № задания А – для однофазной однополупериодной схемы выпрямления выполняют пункты: а), б) и г) из параграфа предварительное домашнее задание; № задания Б – для однофазной мостовой схемы выпрямления выполняют пункты: а), в) и д); № задания В – для однофазной мостовой схемы выпрямления выполняют пункты: а), б) и г).

2. При активно-индуктивной нагрузке принять $X_d = R_d$ – для однополупериодной схемы и $X_d = 5 \cdot R_d$ – для однофазной мостовой. Тогда $L_d = X_d / \omega$ [Гн], где $\omega = 314$ при частоте 50 Гц.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 7).

5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования однофазного неуправляемого выпрямителя (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 7).

6. Осциллограммы и таблицу результатов измерений исследованных схем:

а) для активной нагрузки;

б) для активно-индуктивной нагрузки;

Сделать выводы о влиянии характера нагрузки на вид осциллограмм.

7. Регулировочные и внешние характеристики, построенные по точкам (с приложением таблиц №№1÷6). Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях. Сделать выводы о влиянии характера нагрузки и угла управления.

8. Обобщающие выводы. По осциллограммам и характеристикам сравнить однофазную однополупериодную и мостовую схемы управляемых выпрямителей:

а) по качеству выпрямленного напряжения;

б) по величине выпрямленного напряжения;

По осциллограммам и характеристикам определить, на что влияет характер нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Как работает однополупериодный управляемый выпрямитель?
2. Что такое угол управления? По какой осциллограмме его можно определить?
3. На что влияет угол управления?
4. Что такое угол проводимости вентилей?
5. От чего зависит форма напряжения на нагрузке?
6. Назовите режимы работы выпрямителя и их отличия.
7. Что такое регулировочная характеристика? Как построить регулировочную характеристику для виртуальной модели.
8. От чего зависит вид регулировочной характеристики?
9. Чем определяется диапазон изменения угла управления, необходимый для полного регулирования выпрямленного напряжения?

10. Что такое внешняя характеристика. Как ее построить?
11. Что произойдет с внешней характеристикой, если увеличится угол управления?
12. Почему с ростом тока падает выпрямленное напряжение?
13. Поясните назначение блоков виртуальной модели имитирующей однофазный однополупериодный неуправляемый выпрямитель.
14. Поясните назначение блоков виртуальной модели имитирующей однофазную мостовую схему выпрямления.

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: Изучение электромагнитных процессов, характеристик и режимов работы трехфазных управляемых выпрямителей, включенных по мостовой или нулевой схеме, при различных видах нагрузки.

Принципиальная схема трехфазного мостового управляемого выпрямителя изображена на рис. 69.

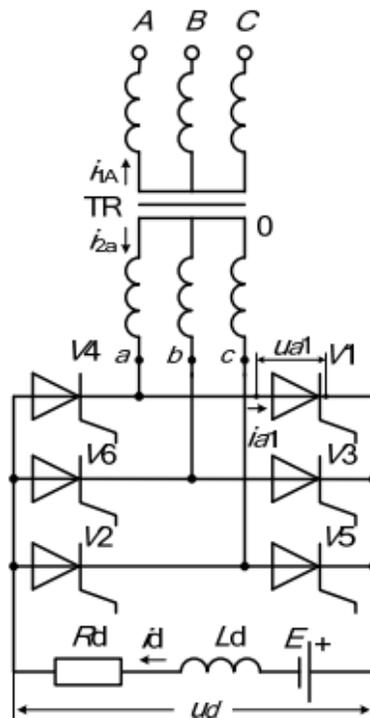


Рис. 69. Принципиальная схема трехфазного мостового управляемого выпрямителя

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 70.

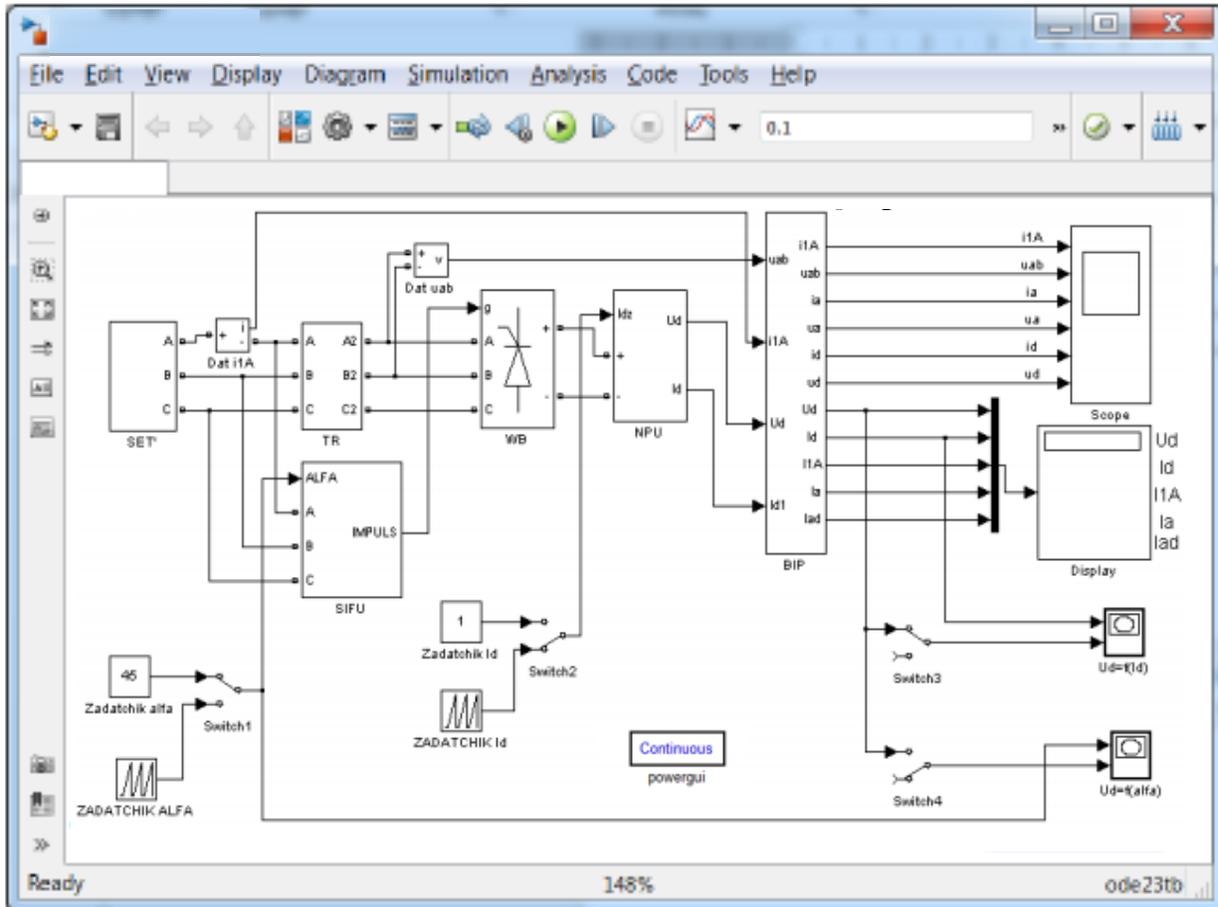


Рис. 70. Виртуальная модель трехфазного мостового управляемого выпрямителя

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник напряжения (SET'), трансформатор (TR), система импульсно-фазового управления (SIFU), блоки задания угла управления (Zadatchik alfa и ZADATCHIK ALFA), вентильный блок (WB), нагрузочно-питающее устройство (NPU), датчики тока Id (Zadatchik Id и ZADATCHIK Id), блок измерительных преобразователей (BIP), датчики тока и напряжения (Dat i1A, Dat uab), осциллограф (Scope), дисплей (Display), переключатели (Switch1, Switch2, Switch3, Switch4) и графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(\alpha)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) Источник напряжения (SET') – блок, состоящий из трех источников идеального синусоидального напряжения, имитирует сеть трехфазного напряжения частотой 50 Гц. Напряжения источников сдвинуты относительно друг друга на 120 градусов. Изменяемые параметры блока:

- напряжение (Voltage) сети установить равное 220 В.

2) Трансформатор (TR) – блок, состоящий из идеального трехфазного трансформатора с учетом контура намагничивания и включенных последовательно в каждой фазе RL – цепей. Изменяемые параметры блока:

- индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне. Установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – (в соответствии с № варианта по данным табл. 5) при частоте 50 Гц и $\omega = 314 \text{ сек}^{-1}$.

- активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной стороне (установить $R_a = 1,65 \text{ Ом}$);

- фазное напряжение на первичной стороне трансформатора U1 (установить 220 В);

- фазное напряжение на вторичной стороне трансформатора U2 (установить в соответствии с № варианта по данным табл. 5);

3) Система импульсно-фазового управления (SIFU) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами.

Двойной щелчок левой кнопкой мыши позволяет раскрыть структуру блока SIFU.

В состав СИФУ (SIFU) входит синхронизированный шестиканальный импульсный генератор (Synchronized 6-Pulse Generator), формирующий сдвоенные импульсы для управления тиристорами вентильного блока.

Блок Synchronized 6-Pulse Generator имеет два изменяемых параметра:

- частота синхронизирующего напряжения, Гц (Frequency of synchronisation voltages (Hz)) – соответствует частоте сети 50 Гц;

- ширина импульса (Pulse width (degrees)) – задано 10 град.

Импульсы необходимо формировать сдвоенные (Double pulsing), т.к. управление тиристорами осуществляется в мостовой схеме.

4) Блоки задания угла управления (Zadatchik alfa и ZADATCHIK ALFA).

Блок Zadatchik alfa позволяет задавать фиксированный угол управления тиристорами (установить в соответствии с заданным вариантом);

Блок ZADATCHIK ALFA позволяет задавать угол управления тиристорами изменяющийся во времени от 0° до 120° и предназначен для построения регулировочной характеристики.

5) Вентильный блок (WB) – универсальный мостовой модуль. Изменяемые параметры блока:

- количество плеч универсального моста (Numbers of bridge arms) – установить равное 3;

- тип силового полупроводникового элемента (Power Electronic device) – установить – тиристор (Thyristors);

- дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии R_{on} (установить 0,2 Ом);

- индуктивность тиристора во включенном состоянии L_{on} (установить 0 Гн);

- пороговое напряжение тиристора U_f (установить 0,8 В);

- демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристорам и устраняет перенапряжения при выключении вентилей (установить $R_s = 5000$ Ом, $C_s = 2e-7$);

6) Нагрузочно-питающее устройство (NPU) – блок, содержащий управляемый источник ПЭДС и реактор, имеющий активное и индуктивное сопротивление. Изменяемые параметры блока:

- активное сопротивление реактора R_d (установить 5 Ом);

- индуктивность реактора L_d (установить 0,2 Гн);

- вид нагрузки (Vid nagruzki с PEDS 1, bez PEDS 0) установить «1» для включения в схему нагрузки с ПЭДС или «0» – для активно-индуктивного характера нагрузки;

7) Задатчики тока I_d (Zadatchik I_d и ZADATCHIK I_d) – блоки задания по току I_d для нагрузочно-питающего устройства.

Блок Zadatchik I_d позволяет задавать фиксированное значение выпрямленного тока I_d ;

Блок ZADATCHIK Id позволяет задавать значение выпрямленного тока, изменяющееся во времени от 0 до 1А и предназначен для построения внешней характеристики.

8) Блок измерительных преобразователей (VIP) – блок, позволяющий осциллографировать:

- мгновенные значения тока на первичной стороне трансформатора фазы А (i_{1a});

- мгновенные значения линейного напряжения (u_{ab});

- мгновенные значения анодного тока (i_a);

- мгновенные значения напряжения на вентиле (u_a);

- мгновенные значения выпрямленного тока (i_d);

- мгновенные значения выпрямленного напряжения (u_d);

и измерять:

- среднее значение выпрямленного напряжения (U_d);

- среднее значение выпрямленного тока (I_d);

- действующее значение тока на первичной стороне трансформатора фазы А (I_{1A});

- среднее значение анодного тока (I_a)

- действующее значение анодного тока (I_{ad}).

9) Датчик тока (Dat i_{1A}) – позволяет осциллографировать ток на первичной стороне трансформатора фазы А;

10) Датчик напряжения (Dat u_{ab}) – позволяет осциллографировать линейное напряжение между фазами А и В;

11) Осциллограф (Scope) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений;

12) Дисплей (Display) – блок, предназначенный для цифрового отображения значений напряжения и токов снимаемых с блока VIP;

13) Переключатели (Switch1, Switch2, Switch3, Switch4) – блоки предназначенные для переключения между блоками Zадatchik alfa и ZADATCHIK ALFA (Switch1), Zадatchik Id и ZADATCHIK Id (Switch2), а также введения в схему графопостроителей $U_d = f(I_d)$ (Switch3), $U_d = f(\text{alfa})$ (Switch4).

14) Графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(\alpha)$) – блоки, предназначенные для построения внешней $U_d = f(I_d)$ и регулировочной $U_d = f(\alpha)$ характеристики в автоматическом режиме.

Принципиальная схема трехфазного управляемого выпрямителя, выполненного по нулевой схеме изображена на рис. 71.

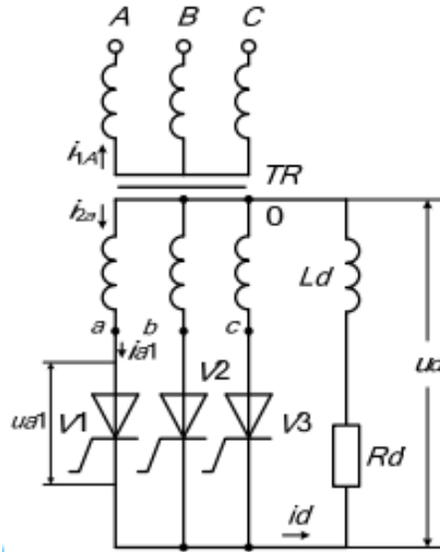


Рис. 71. Принципиальная схема трехфазного управляемого выпрямителя, выполненного по нулевой схеме

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 70.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС (E2), трансформатор (TR), система импульсно-фазового управления (SIFU), блоки задания угла управления (Zadatchik alfa и ZADATCHIK ALFA), вентильный блок (WB), нагрузочно-питающее устройство (NPU), задатчики тока I_d (Zadatchik I_d и ZADATCHIK I_d), блок измерительных преобразователей (BIP), датчик напряжения (Dat u_{ab}), осциллограф (Scope), дисплей (Display), переключатели (Switch1, Switch2, Switch3, Switch4) и графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(\alpha)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) Источник ЭДС (E2) – имитирует трехфазную ЭДС на вторичной стороне трансформатора.

Изменяемые параметры блока:

– амплитуда ЭДС (Voltage) на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС E2 в соответствии с таблицей вариантов и умножить на $\sqrt{2}$.

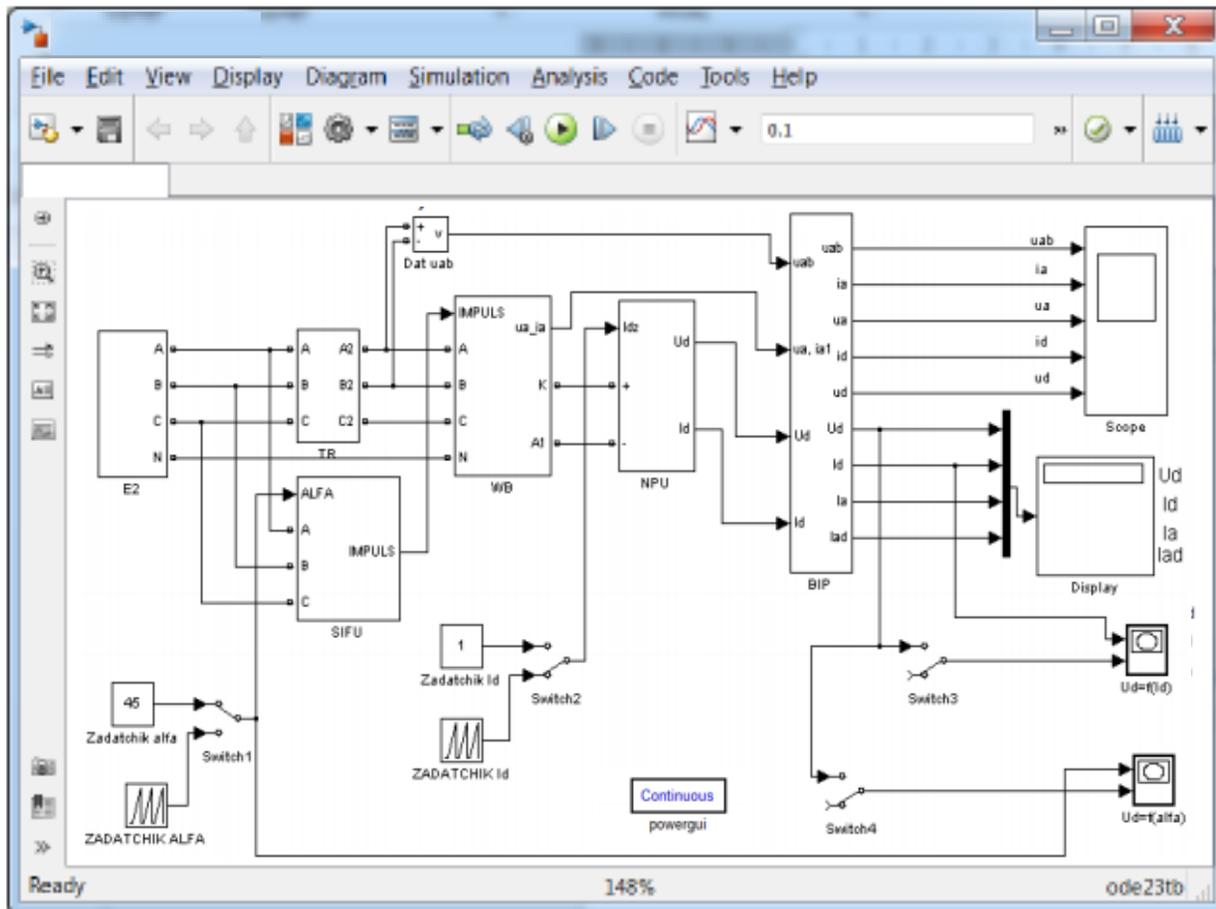


Рис. 72. Виртуальная модель трехфазного управляемого выпрямителя, выполненного по нулевой схеме

2) Трансформатор (TR) – блок, реализованный на базе RL – цепи, имитирует схему замещения трансформатора, приведенного ко вторичной стороне.

Изменяемые параметры блока:

– активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной стороне. Установить $R_a = 1,65 \text{ Ом}$.

– индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне. Установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – (в соответствии с № варианта по данным табл. 5) при частоте 50 Гц и $\omega = 314 \text{ сек}^{-1}$.

3) Система импульсно-фазового управления (SIFU) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами.

Аналогично мостовой схеме в состав СИФУ (SIFU) входит синхронизированный шестиканальный импульсный генератор (Synchronized 6-Pulse Generator), у которого используется три канала для управления тиристорами вентильного блока.

Блок Synchronized 6-Pulse Generator имеет два изменяемых параметра:

– частота синхронизирующего напряжения, Гц (Frequency of synchronisation voltages (Hz)) – соответствует частоте сети 50 Гц;

– ширина импульса (Pulse width (degrees)) – задано 90 град.

4) Блоки задания угла управления (Zadatchik alfa и ZADATCHIK ALFA).

Блок Zadatchik alfa позволяет задавать фиксированный угол управления тиристорами (установить в соответствии с заданным вариантом);

Блок ZADATCHIK ALFA позволяет задавать угол управления тиристорами изменяющийся во времени от 0° до 150° и предназначен для построения регулировочной характеристики.

5) Вентильный блок (WB) – электронный блок, имитирующий работу тиристорных включенных в соответствии с трехфазной нулевой схемой.

Изменяемые параметры блока:

– дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии (Resistance R_{on}). Установить $R_{on} = 0,2 \text{ Ом}$;

– пороговое напряжение вентиля (Forward voltage V_f). Установить $U_f = 0,8 \text{ В}$;

– демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристорам и устраняет перенапряжения при выключении вентилей (установить $R_s = 5000 \text{ Ом}$, $C_s = 2e-7$).

6) Нагрузочно-питающее устройство (NPU) – блок, содержащий управляемый источник ПЭДС и реактор, имеющий активное и индуктивное сопротивление.

Изменяемые параметры блока:

– активное сопротивление реактора R_d (установить 5 Ом);

– индуктивность реактора L_d (установить 0,2 Гн);
– вид нагрузки ($V_{id} \text{ nagruzki}$ с PЕDС 1, bez PЕDС 0) установить «1» для включения в схему нагрузки с ПЭДС или «0» – для активно-индуктивного характера нагрузки;

7) Задатчики тока I_d ($Zadatchik I_d$ и $ZADATCHIK I_d$) – блоки задания по току I_d для нагрузочно-питающего устройства.

Блок $Zadatchik I_d$ позволяет задавать фиксированное значение выпрямленного тока I_d ;

Блок $ZADATCHIK I_d$ позволяет задавать значение выпрямленного тока, изменяющееся во времени от 0 до 1А, и предназначен для построения внешней характеристики.

8) Блок измерительных преобразователей (ВІР) – блок, позволяющий осциллографировать:

– мгновенные значения напряжения между фазами А и В (u_{ab});

– мгновенные значения анодного тока (i_a);

– мгновенные значения напряжения на вентиле (u_a);

– мгновенные значения выпрямленного тока (i_d);

– мгновенные значения выпрямленного напряжения (u_d);

и измерять:

– среднее значение выпрямленного напряжения (U_d);

– среднее значение выпрямленного тока (I_d);

– среднее значение анодного тока (I_a)

– действующее значение анодного тока (I_{ad}).

9) Датчик напряжения ($Dat u_{ab}$) – позволяет осциллографировать напряжение между фазами А и В;

10) Осциллограф (Scope) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений;

11) Дисплей (Display) – блок, предназначенный для цифрового отображения значений напряжения и токов, снимаемых с блока ВІР;

12) Переключатели (Switch1, Switch2, Switch3, Switch4) – блоки, предназначенные для переключения между блоками $Zadatchik \text{ alfa}$ и

ZADATCHIK ALFA (Switch1), Zadatchik Id и ZADATCHIK Id (Switch2), а также введения в схему графопостроителей $U_d = f(I_d)$ (Switch3), $U_d = f(\alpha)$ (Switch4).

13) Графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(\alpha)$) – блоки, предназначенные для построения внешней $U_d = f(I_d)$ и регулировочной характеристики $U_d = f(\alpha)$ в автоматическом режиме.

Предварительное домашнее задание

а) изучить темы курса: «Многофазные выпрямители», «Управляемые выпрямители», «Непрерывный, прерывистый и граничный режимы», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) рассчитать угол коммутации γ для заданного варианта. Угол γ рекомендуется определить из соотношения

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{2 \cdot x_a \cdot I_d}{\sqrt{6} \cdot U_2}; \quad (1)$$

в) построить в масштабе друг под другом временные диаграммы вторичных ЭДС, среднего значения выпрямленного напряжения u_d , тока нагрузки i_d (при $x_d = \infty$), тока вентиля i_a , напряжения на вентиле u_a и первичного тока трансформатора i_1 с учетом заданных значений E_2 , α_1 , I_d и рассчитанного γ ;

г) рассчитать среднее значение выпрямленного напряжения U_d , амплитуду обратного напряжения $U_{a\max}$, ток вентиля I_a , вторичный I_2 и первичный I_1 токи трансформатора для заданного значения тока I_d . Формулы для расчета анодного тока вентиля I_a , действующих значений вторичного I_2 и первичного I_1 токов трансформатора и амплитуды обратного напряжения $U_{a\max}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Схема	I_a	I_2	I_1	$U_{a\max}$
Трёхфазная нулевая	$\frac{I_d}{3}$	$\frac{I_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{I_d}{n}$	$\sqrt{6} \cdot E_2$
Трёхфазная мостовая	$\frac{I_d}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{I_d}{n}$	$\sqrt{6} \cdot E_2$

Примечание: коэффициент трансформации $n=U_1/U_2$.

Среднее значение выпрямленного напряжения при заданном значении угла управления α и тока нагрузки I_d можно определить из уравнения внешней характеристики для непрерывного режима

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - a \cdot U_{T(T0)} - \left[a \cdot r_T + a \cdot r_a + \frac{x_a}{(2\pi/m)} \right] \cdot I_d, \quad (2)$$

где $U_T(T0)$ – пороговое напряжение тиристора; r_T – дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии; r_a , x_a – анодные активное и индуктивное сопротивления (сопротивления схемы замещения трансформатора, приведенные к стороне вентиля).

Среднее значение выпрямленного напряжения для идеального неуправляемого выпрямителя U_{d0} , пульсность схемы m и коэффициент схемы a определяются видом схемы и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Схема	m	U_{d0}	a	$\alpha_{тр}$	α_{min}	E_{2m}	B
Трёхфазная нулевая	3	$1,17 \cdot E_2$	1	30°	60°	$\sqrt{2} \cdot E_2$	0,46
Трёхфазная мостовая	6	$2,34 \cdot E_2$	2	60°	30°	$\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot E_2$	0,22

При расчете принять $U_T(T0) = 1$ В, $r_T = 0,05$ Ом, $r_a = 1,5$ Ом, $E_2 = U_2$ на холостом ходу.

Результаты предварительных расчетов в соответствии с номером задания занести в табл. 3 для трехфазной нулевой и в табл. 4 для трехфазной мостовой схем выпрямления, в отчете сравнить с результатами, полученными экспериментальным путем.

д) рассчитать и построить регулировочные характеристики для непрерывного и прерывистого режимов. При расчете принимать для непрерывного режима $x_d = \infty$, для прерывистых при работе на противо-ЭДС и на активное сопротивление $x_d = 0$.

При расчете можно воспользоваться:

- для непрерывного режима при заданном токе I_d уравнением (2), которое при постоянстве I_d является уравнением регулировочной характеристики;
- для прерывистого режима при активной нагрузке уравнениями (3)

$$U_d = \begin{cases} U_{d0} \cdot \cos \alpha & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \alpha_{гр} \\ U_{d0} \cdot \left[\frac{1 - \sin(\alpha - \pi/m)}{2 \cdot \sin(\pi/m)} \right] & \text{при } \alpha > \alpha_{гр} \end{cases}, \quad (3)$$

– для прерывистого режима при работе на активную нагрузку с противо-ЭДС уравнениями (4)

$$U_d = \begin{cases} E_{2m} & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \\ E_{2m} \cdot \cos(\alpha - \alpha_{\min}) & \text{при } \alpha_{\min} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \alpha_{\min} \end{cases}. \quad (4)$$

где $\alpha_{гр}$ – граничный угол управления при работе выпрямителя на активную нагрузку, $\alpha_{\min} = \pi / m$ – минимальный угол управления при работе выпрямителя на активную нагрузку с противо-ЭДС; E_{2m} – амплитуда вторичной ЭДС трансформатора, используемая в схеме.

Значения $\alpha_{гр}$, α_{\min} , E_{2m} приведены в табл. 2.

Таблица 3

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Трехфазная нулевая схема				
	Предварит. расчет	Активная нагрузка		Противо-ЭДС	
		непрерывный режим	прерывистый режим	непрерывный режим	прерывистый режим
угол α					
угол γ					
U_d					
$U_{a\max}$					
I_a					
I_d					
$I_{dгр}$					
I_1					
I_2					

е) рассчитать и построить внешнюю характеристику для заданных α , α_a , при активной нагрузке с противо-ЭДС. При построении считать режим непрерывным, тогда применимо уравнение (2).

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Трехфазная мостовая схема				
	Предварит. расчет	Активная нагрузка		Противо-ЭДС	
		непрерывный режим	прерывистый режим	непрерывный режим	прерывистый режим
угол α					
угол γ					
Ud					
Uamax					
Ia					
Id					
Idгр					
I1					
I2					

Примечание: все характеристики строить в абсолютных единицах.

ж) найти граничный ток для заданных x_a , x_d , α . Граничный ток можно определить по формуле (5)

$$I_{d,гр} = \frac{B \cdot U_2}{a \cdot x_a + x_d} \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где коэффициент B приведен в табл. 2

**Программа исследования схем
трехфазных управляемых выпрямителей**

1. Исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной нулевой схеме:

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активной нагрузке с противо-ЭДС и без противо-ЭДС.

1.3. Снятие регулировочных характеристики при различных токах и различных видах нагрузки.

1.4. Снятие внешних характеристик при различных видах нагрузки.

2. Исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной мостовой схеме

2.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активной нагрузке с противо-ЭДС.

2.3. Снятие внешних характеристик при изменении угла управления и параметров трансформатора.

2.4. Осциллографирование и измерение электрических величин в прерывистом (граничном) режиме при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС.

2.5. Снятие регулировочных характеристик при различных токах нагрузки

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. *Исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной мостовой схеме:*

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) запустить программу «MatLab»;

б) открыть файл «upr3_mostov.mdl». После открытия на экране появится виртуальная модель управляемого мостового выпрямителя, представленная на рис. 70;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.

Переключатели Switch1 и Switch2 установить в верхнее положение, при этом в схему введены блоки Zadatchik alfa и Zadatchik Id.

Переключатели Switch3 и Switch4 установить в нижнее положение, отключив, таким образом, графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(\alpha)$ из схемы.

В блоке трансформатор TR установить $L_a = X_a/\omega$, где X_a – задано (в соответствии с № варианта по данным табл. 5, при частоте 50 Гц).

В блоке Zadatchik alfa угол управления α_1 – задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 5, при частоте 50 Гц).

В блоке Zadatchik Id выпрямленный ток Id – задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 5, при частоте 50 Гц).

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активной нагрузке с противо-ЭДС.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в главе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления при активной нагрузке с противо-ЭДС.

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в Paint также приведены в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам;

в) записать показания с дисплея (см. рис. 70), занести в табл. 4 и сравнить с расчетными.

1.3. Снятие внешних характеристик при изменении угла управления и параметров трансформатора.

а) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при заданном по варианту углу управления.

В блоке Zadatchik alfa угол управления задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 5, при частоте 50 Гц).

Переключатель Switch2 переключить в нижнее положение, подключив в схему блок ZADATCHIKId.

Переключатель Switch3 установить в верхнее положение, подключив в схему графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

Запустить расчет модели и снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$.

По построенной внешней характеристике $U_d = f(I_d)$ определить граничный ток, занести в табл. 4 и сравнить с расчетным значением.

б) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при другом угле управления $\alpha_2 = \alpha_1 + 15^\circ$.

В блоке *Zadatchik alfa* задать угол управления равный α_2 и повторить опыт.

Определить граничный ток, занести вычисленное значение в табл. 4 и сравнить со значением тока полученным при выполнении п.п. 1.3 а).

в) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при других параметрах трансформатора.

В блоке трансформатор *TR* установить индуктивность рассеяния трансформатора $L_a' = L_a \cdot 2$ и повторить опыт.

Все три полученные внешние характеристики (в п.п. 1.3 а), б) и в)) подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*.

1.4. Осциллографирование и измерение электрических величин в прерывистом (граничном) режиме при активной нагрузке с противо-ЭДС.

а) исследовать работу трехфазного мостового управляемого выпрямителя в прерывистом режиме

В блоке *Zadatchik alfa* установить угол управления α_1 – заданный (в соответствии с № варианта по данным табл. 5, при частоте 50 Гц).

Во всех блоках модели восстановить параметры в соответствии с описанием виртуальных моделей.

В блоке *Zadatchik Id* задать выпрямленный ток $I_d = 0,06$ А.

Переключатели *Switch1* и *Switch2* установить в верхнее положение, введя в схему блоки *Zadatchik alfa* и *Zadatchik Id*.

Переключатели *Switch3* и *Switch4* установить в нижнее положение, отключив, таким образом, графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(\alpha)$.

Запустить модель и снять осциллограммы трехфазного мостового управляемого выпрямителя в прерывистом режиме.

Все показания с дисплея занести в табл. 4.

1.5. Снятие регулировочных характеристик при различных токах нагрузки.

Переключатель *Switch1* установить в нижнее положение, а переключатель *Switch4* установить в верхнее положение, введя в схему блок *ZADATCHIK ALFA* и графопостроитель $U_d = f(\alpha)$.

Переключатель Switch2 установить в верхнее положение, а переключатель Switch3 установить в нижнее положение, введя в схему блок Zadatchik Id и отключив графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

а) В блоке Zadatchik Id величину тока I_d задать по варианту.

Запустить модель и снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$.

Процесс расчета виртуальной модели можно остановить при снижении выпрямленного напряжения U_d до нуля (см. показания дисплея рис. 70).

Обе полученные регулировочные характеристики, при разных значениях тока I_d , подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе Paint.

2. Исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной нулевой схеме:

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) запустить программу «MatLab»;

б) открыть файл «ur3_nulevoi.mdl». После открытия на экране появится виртуальная модель управляемого выпрямителя, выполненного по нулевой схеме, представленная на рис. 72;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.

Переключатели Switch1 и Switch2 установить в верхнее положение, при этом в схему введены блоки Zadatchik alfa и Zadatchik Id.

Переключатели Switch3 и Switch4 установить в нижнее положение, отключив, таким образом, графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(\alpha)$ из схемы.

В блоке трансформатор TR установить $L_a = X_a/\omega$, где X_a – задано (в соответствии с № варианта по данным табл. 5, при частоте 50 Гц).

В блоке Zadatchik alfa угол управления α_1 – задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 5, при частоте 50 Гц).

В блоке Zadatchik Id выпрямленный ток I_d – задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 5, при частоте 50 Гц).

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активной нагрузке с противо-ЭДС и без противо-ЭДС.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в разделе 1);

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке.

в) записать показания с дисплея (см. рис. 72), занести в табл. 3 и сравнить с расчетными.

г) повторить пункты а), б) и в) при активно-индуктивной нагрузке без противо-ЭДС. Активное сопротивление нагрузки задать равное

$$R_{дн} = U_d / I_d,$$

где значение тока I_d задано (в соответствии с № варианта по данным табл. 5), а напряжения U_d взято из эксперимента п.п. 2.2. в).

Записать показания с дисплея (см. рис. 72), занести в табл. 3 и сравнить с п. 2.2 б).

2.3. Снятие регулировочных характеристик при различных токах и различных видах нагрузки.

Переключатель Switch1 установить в нижнее положение, а переключатель Switch4 установить в верхнее положение, введя в схему блок ZADATCHIK ALFA и графопостроитель $U_d = f(\alpha)$.

Переключатель Switch2 в верхнее положение и Switch3 установить в нижнее положение, введя в схему блок Zадatchik Id и отключив графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

а) В блоке NPU вид нагрузки (Vid nagruzki с PEPS 1, bez PEDS 0) задать с противо-ЭДС, установив значение «1». В блоке Zадatchik Id величину тока I_d задать (в соответствии с № варианта по данным табл. 5).

Запустить модель и снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$.

б) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при другом значении выпрямленного тока $I_d = 0.06$ А.

в) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при активно-индуктивной нагрузке без противо-ЭДС.

В блоке NPU вид нагрузки (Vid nagruzki с PEPS 1, bez PEDS 0) задать без противо-ЭДС, установив значение «0». Активное сопротивление нагрузки задать равное R_{дн}.

Все три регулировочные характеристики подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе Paint.

2.4. Снятие внешних характеристик при различных видах нагрузки.

Переключатель Switch1 установить в верхнее положение, подключив в схему блок Zadatchik alfa.

Переключатель Switch2 установить в нижнее положение, а переключатель Switch3 установить в верхнее положение, введя, таким образом, в схему блок ZADATCHIK Id и подключив графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

Переключатель Switch4 установить в нижнее положение отключив графопостроитель $U_d = f(\alpha)$.

а) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при активной нагрузке с противо-ЭДС при заданном (в соответствии с № варианта по данным табл. 5) угле управления.

В блоке NPU вид нагрузки (Vid nagruzki с PEPS 1, bez PEDS 0) задать с противо-ЭДС, установив значение «1». В блоке Zadatchik alfa угол управления α_1 задать по варианту.

По построенной внешней характеристике $U_d = f(I_d)$ определить граничный ток и занести в табл. 3 и сравнить с расчетным.

в) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при активной нагрузке без противо-ЭДС.

В блоке Zadatchik alfa угол управления α_1 – задать (в соответствии с № варианта по данным табл. 5).

В блоке NPU вид нагрузки (Vid nagruzki с PEPS 1, bez PEDS 0) задать без противо-ЭДС, установив значение «0». Активное сопротивление нагрузки задать равное R_{дн}. Характеристику снять по точкам, увеличивая R_д в 3 и 10 раз.

Все внешние характеристики подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе Paint.

Выбор варианта задания

Номер варианта определяется последними двумя цифрами зачетной книжки студента. Если количество предлагаемых вариантов меньше учебного шифра студента, то номер варианта определяется как разность уменьшаемого (шифра студента) и вычитаемого (числа предлагаемых вариантов в данном задании). Например, шифр студента – 67, а число вариантов в задании на лабораторную работу 1 – 50, тогда номер варианта равен: $67 - 50 = 17$.

Таблица 5

Таблица вариантов

№ варианта	№ задания	Угол управления α , град	Выпрямленный ток I_d , А	Напряжение на вторичной обмотке трансформатора U_2 , В	Индуктивное сопротивление рассеивания трансформатора X_d , Ом
1, 26	А, Б	45	1,0	48	4,3
2, 27	А, Б	55	1,0	50	4,3
3, 28	А, Б	65	1,0	52	4,3
4, 29	А, Б	70	1,0	54	4,3
5, 30	А, Б	75	1,0	56	4,3
6, 31	А, В	45	0,9	56	6,3
7, 32	А, В	55	0,9	54	6,3
8, 33	А, В	65	0,9	52	6,3
9, 34	А, В	70	0,9	50	6,3
10, 35	А, В	75	0,9	48	6,3
11, 36	Б, А	45	1,0	48	4,3
12, 37	Б, А	55	1,0	50	4,3
13, 38	Б, А	65	1,0	52	4,3
14, 39	Б, А	70	1,0	54	4,3
15, 40	Б, А	75	1,0	56	4,3
16, 41	Б, В	45	0,9	56	6,3

Продолжение таблицы 5

17, 42	Б, В	55	0,9	54	6,3
18, 43	Б, В	65	0,9	52	6,3
19, 44	Б, В	70	0,9	50	6,3
20, 45	Б, В	75	0,9	48	6,3
21, 46	В, Б	45	1,0	48	4,3
22, 47	В, Б	55	1,0	50	4,3
23, 48	В, Б	65	1,0	52	4,3
24, 49	В, Б	70	1,0	54	4,3
25, 50	В, Б	75	1,0	56	4,3

Примечания:

1. Студенты, получившие № задания А – для трехфазной мостовой схемы при активной нагрузке с противо-ЭДС выполняют пункты: а), б), в), г), д), е) и ж) из параграфа предварительное домашнее задание; № задания Б – для трехфазной нулевой схемы при активной нагрузке с противо-ЭДС выполняют пункты: а), б), в), г), д), е) и ж) из параграфа предварительное домашнее задание; № задания В – для трехфазной мостовой и нулевой схем при активной нагрузке с противо-ЭДС выполняют пункты: а), д), е) и ж) и пункт д) для активной нагрузки из параграфа предварительное домашнее задание.

2. При расчете принять: $E_2 = U_2$; $U_T(T_0) = 1,0 \text{ В}$; $r_T = 0,05 \text{ Ом}$, $r_a = 1,5 \text{ Ом}$.

3. При построении диаграмм принимать $x_d = \infty$.

4. При определении граничного тока принять $x_d = 63 \text{ Ом}$.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 5).

5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования трехфазного управляемого выпрямителя (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 5).

6. Осциллограммы для исследованных схем:

а) для активной нагрузки с противо-ЭДС в непрерывном и прерывистом режиме в мостовой схеме (см. рис. 70);

б) для активно-индуктивной нагрузки с противо-ЭДС и для активной нагрузки в непрерывном режиме в нулевой схеме (см. рис. 72).

Сделать выводы о влиянии типа трехфазного управляемого выпрямителя, с учетом его схемы включения и вида нагрузки, на соответствующие режиму осциллограммы тока и напряжения (блок дисплей (Display) на рис. 70 и рис. 72).

Сравнить расчетные значения токов и напряжений с аналогичными значениями, полученными экспериментальным путем.

7. Внешние характеристики

а) полученные расчетным и экспериментальным путем при изменении угла управления и параметров трансформатора для модели управляемого выпрямителя выполненной по трехфазной мостовой схеме;

б) полученные расчетным и экспериментальным путем для разных видов нагрузки для модели управляемого выпрямителя выполненной по трехфазной нулевой схеме.

Указанные характеристики необходимо построить на одном графике.

Сделать выводы о влиянии угла управления, вида нагрузки и параметров трансформатора на внешние характеристики.

8. Регулировочные характеристики

а) при двух значениях выпрямленного тока;

б) при разном характере нагрузки.

Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях.

Сделать выводы о влиянии величины выпрямленного тока и характера нагрузки на регулировочные характеристики.

9. Обобщающие выводы.

По осциллограммам и характеристикам сравнить трехфазную нулевую и мостовую схемы управляемых выпрямителей:

- а) по качеству выпрямленного напряжения;
- б) по величине выпрямленного напряжения.

По осциллограммам и характеристикам определить, на что влияет характер нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные трехфазные схемы выпрямления.
2. Назовите основные величины, используемые при описании работы выпрямителей.
3. По каким признакам классифицируются выпрямители?
4. Как изменяется соотношение между приведенным индуктивным сопротивлением рассеяния трансформатора и приведенным активным сопротивлением обмоток при изменении мощности трансформатора?
5. Какова частота пульсации в изучаемых схемах?
6. Что такое непрерывный режим?
7. Что такое внешняя характеристика? От каких параметров зависит ее положение в непрерывном режиме?
8. Что такое регулировочная характеристика, от каких параметров зависит ее вид?
9. Сравнить трехфазную нулевую и трехфазную мостовую схемы по основным показателям.
10. Сравните форму токов i_a и i_2 для трехфазной нулевой схемы при $x_d = \infty$. Почему отличаются формулы для I_a и I_2 ?
11. Будут ли осциллограммы, снятые в лабораторной работе отличаться от временных диаграмм построенных дома? Почему?
12. Что влияет на величину граничного тока?
13. Как снять внешние и регулировочные характеристики выпрямителя при помощи виртуальных измерительных приборов?

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКОМПЛЕКТНОГО РЕКУПЕРИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМАХ ВЫПРЯМЛЕНИЯ И ИНВЕРТИРОВАНИЯ

Цель работы: изучение электромагнитных процессов, характеристик и энергетических показателей однокомплектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования. Исследование влияния преобразователя на питающую сеть.

Схема однокомплектного рекуперирующего преобразователя, выполненного по мостовой схеме изображена на рис. 73.

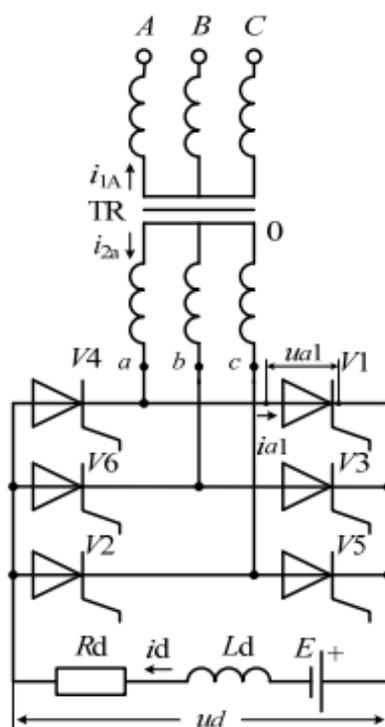


Рис. 73. Принципиальная схема однокомплектного рекуперирующего преобразователя, выполненного по мостовой схеме

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 74.

В комплект виртуальной модели (рис. 74) входят следующие блоки: источник напряжения (SET'), трансформатор (TR), система импульсно-фазового управления (SIFU), блоки задания угла управления (Zadatchik alfa и

ZADATCHIK ALFA), вентиляльный блок (WB), реактор (L), источник ЭДС (EDS), датчики тока Id (Zadatchik Id и ZADATCHIK Id), блок измерительных преобразователей (BIP), датчики тока и напряжения (Dat i1A, Dat u1, Dat u1d), осциллографы (Scope1, Scope2, Scope3), дисплей (Display), переключатели (Switch1, Switch2, Switch3, Switch4) и графопостроители (Ud = f(Id), Ud = f(alfa)).

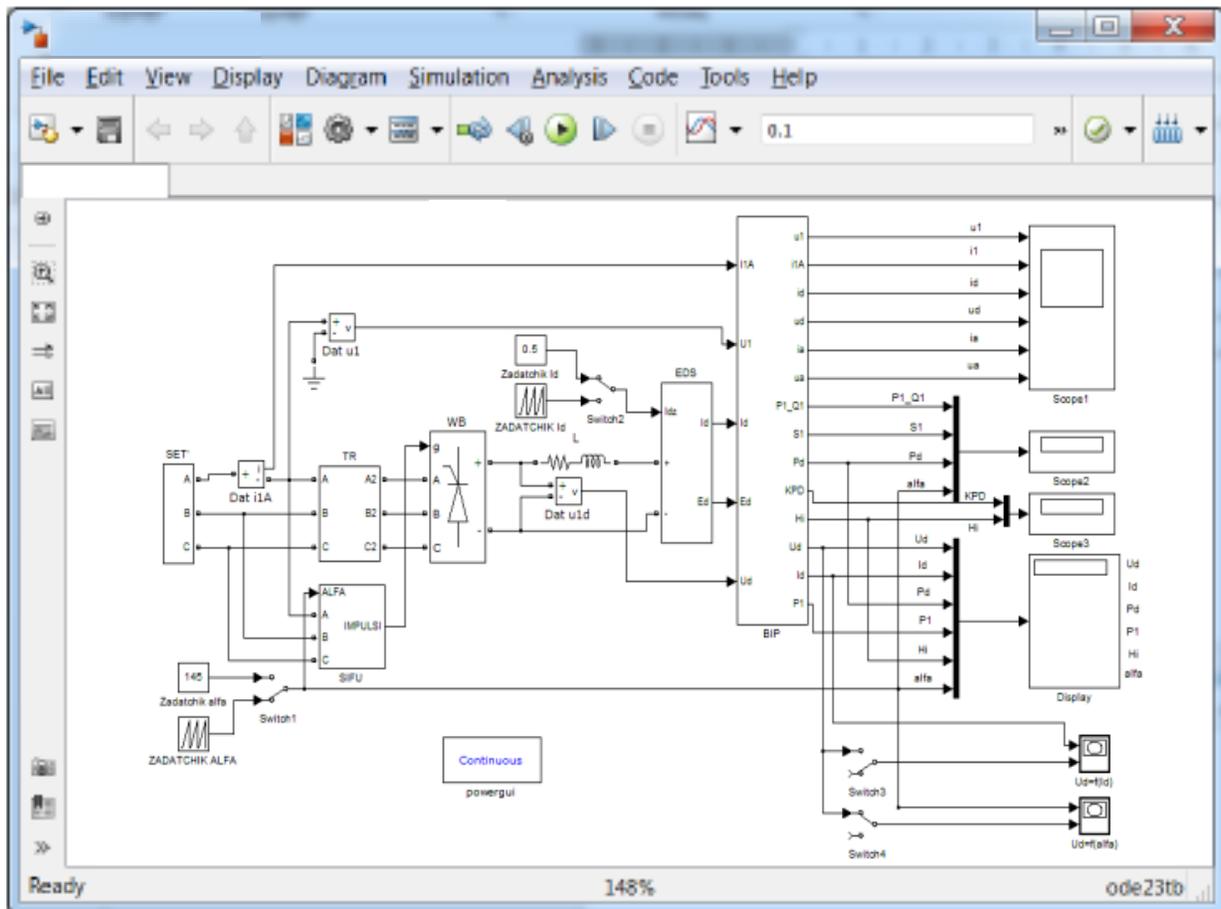


Рис. 74. Виртуальная модель однокомплектного рекуперирующего преобразователя, выполненного по мостовой схеме

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) Источник напряжения (SET') – блок, состоящий из трех источников идеального синусоидального напряжения, имитирует сеть трехфазного напряжения частотой 50 Гц. Напряжения источников сдвинуты относительно друг друга на 120 градусов. Изменяемые параметры блока:

– напряжение (Voltage) сети установить равное 220 В.

2) Трансформатор (TR) – блок, состоящий из идеального трехфазного трансформатора с учетом контура намагничивания и включенных последовательно в каждой фазе RL – цепей. Изменяемые параметры блока:

– индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне. Установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – (в соответствии с № варианта по данным табл. 3) при частоте 50 Гц и $\omega = 314 \text{ сек}^{-1}$.

– активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной стороне (установить $R_a = 1,65 \text{ Ом}$);

– фазное напряжение на первичной стороне трансформатора U1 (установить 220 В);

– фазное напряжение на вторичной стороне трансформатора U2 (установить соответствии с № варианта по данным табл. 3).

3) Система импульсно-фазового управления (SIFU) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами.

Двойной щелчок левой кнопкой мыши позволяет раскрыть структуру блока SIFU.

В состав СИФУ (SIFU) входит синхронизированный шестиканальный импульсный генератор (Synchronized 6-Pulse Generator), формирующий двоянные импульсы для управления тиристорами вентильного блока.

4) Блоки задания угла управления (Zadatchik alfa и ZADATCHIK ALFA).

Блок Zadatchik alfa позволяет задавать фиксированный угол управления тиристорами (установить в соответствии с заданным вариантом);

Блок ZADATCHIK ALFA позволяет задавать угол управления тиристорами изменяющийся во времени от 0° до 150° и предназначен для построения регулировочной характеристики.

5) Вентильный блок (WB) – универсальный мостовой модуль.

Изменяемые параметры блока:

– количество плеч универсального моста (Numbers of bridge arms) – установить равное 3;

– демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно

тиристор и устраняет перенапряжения при выключении вентилях (установить $R_s = 6000 \text{ Ом}$, $C_s = 1e^{-7}$);

– тип силового полупроводникового элемента (Power Electronic device) – установить – тиристор (Thyristors);

– дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии R_{on} (установить $0,2 \text{ Ом}$);

– индуктивность тиристора во включенном состоянии L_{on} (установить 0 Гн);

– пороговое напряжение тиристора U_f (установить $0,8 \text{ В}$).

6) Реактор (L) – блок, включаемый между преобразователем и источником ЭДС, воспринимающий разницу мгновенных значений напряжений и ЭДС (противо-ЭДС) Изменяемые параметры блока:

– индуктивность реактора L (установить $0,2 \text{ Гн}$);

– активное сопротивление реактора R (установить 5 Ом);

7) источник ЭДС (EDS) – блок, имитирующий работу источника ЭДС (например, аккумулятора или электрической машины).

8) Задатчики тока Id (Zadatchik Id и ZADATCHIK Id) – блоки задания по току Id для нагрузочно-питающего устройства.

Блок Zadatchik Id позволяет задавать фиксированное значение выпрямленного тока Id;

Блок ZADATCHIK Id позволяет задавать значение выпрямленного (инвертируемого) тока, изменяющееся во времени от 0 до 1 А и предназначен для построения внешних характеристик.

9) Блок измерительных преобразователей (VIP) – блок, позволяющий осциллографировать:

– мгновенные значения напряжения на первичной стороне трансформатора в фазе А (u_1);

– мгновенные значения тока на первичной стороне трансформатора фазы А (i_1A);

– мгновенные значения выпрямленного тока (i_d);

– мгновенные значения выпрямленного напряжения (u_d);

– мгновенные значения анодного тока (i_a);

- мгновенные значения напряжения на вентиле (u_a);
- активную мощность (P_1), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
- полную мощность (S_1) и реактивную (Q_1), потребляемую из сети;
- активную мощность (P_d), потребляемую из источника ЭДС или отдаваемую в него;
- угол управления тиристорами α (alfa);
- КПД преобразователя (KPD);
- коэффициент мощности χ (H_i).

и измерять:

- среднее значение выпрямленного напряжения (U_d);
- среднее значение выпрямленного тока (I_d);
- активную мощность (P_d), потребляемую из источника ЭДС или отдаваемую в него;
- активную мощность (P_1), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
- коэффициент мощности χ (H_i);
- угол управления тиристорами α (alfa).

10) Датчики тока (Dat i_1A) и напряжения (Dat u_1) – позволяют осциллографировать ток и напряжение на первичной стороне трансформатора фазы А.

11) Датчик напряжения (Dat u_{1d}) – позволяет осциллографировать напряжение на нагрузке;

12) Осциллографы (Scope1, Scope2, Scope3) – блоки, позволяющие наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых с блока ВР;

13) Дисплей (Display) – блок, предназначенный для цифрового отображения значений напряжения и токов, снимаемых с блока ВР;

14) Переключатели (Switch1, Switch2, Switch3, Switch4) – блоки, предназначенные для переключения между блоками Zадатчик alfa и ZADATЧИК ALFA (Switch1), Zадатчик Id и ZADATЧИК Id (Switch2), а также введения в схему графопостроителей $U_d = f(I_d)$ (Switch3), $U_d = f(\text{alfa})$ (Switch4).

15) Графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(\alpha)$) – блоки, предназначенные для построения внешней $U_d = f(I_d)$ и регулировочной $U_d = f(\alpha)$ характеристик в автоматическом режиме.

Виртуальная модель однокомплектного рекуперирующего преобразователя, выполненного по мостовой схеме, предназначенная для исследования влияния преобразователя на питающую сеть, изображены на рис. 75.

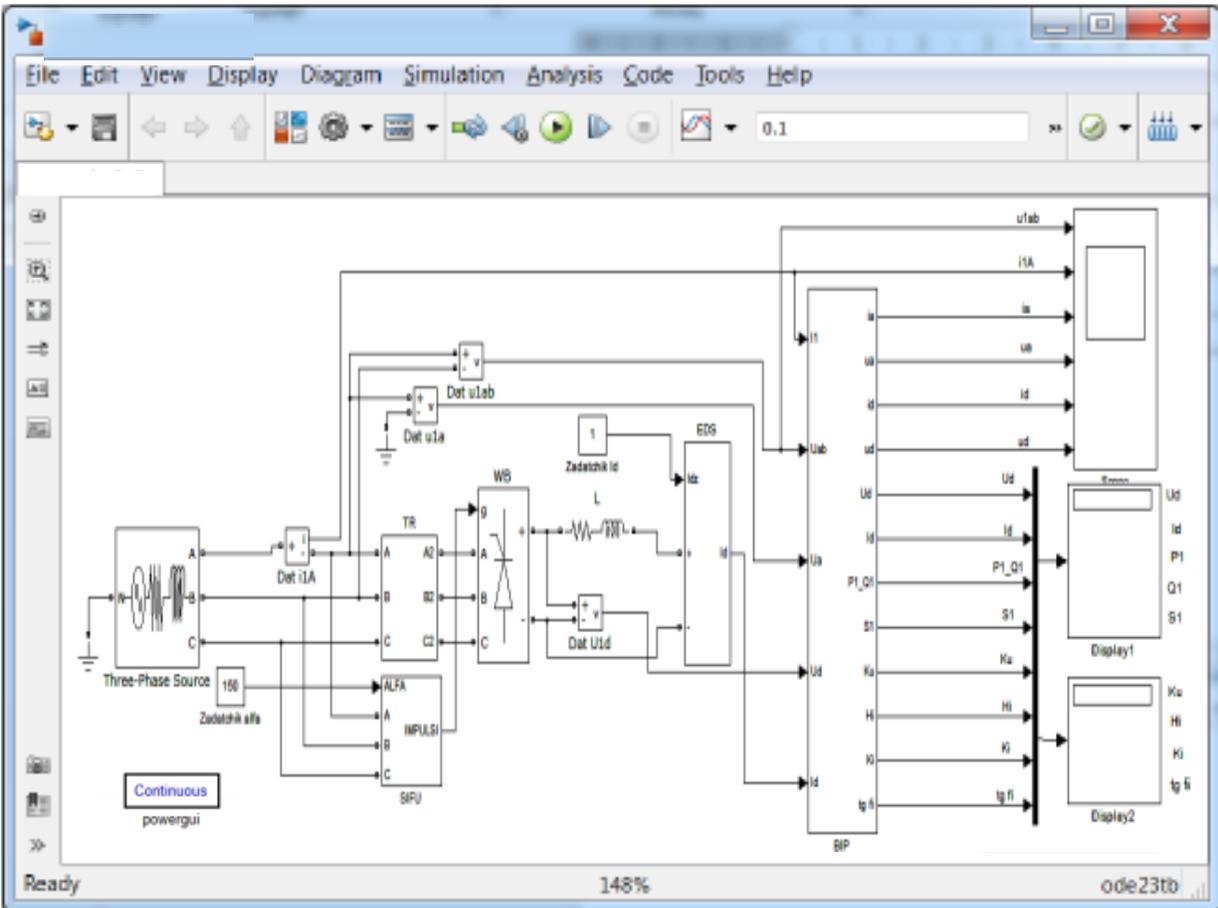


Рис. 75. Виртуальная модель однокомплектного рекуперирующего преобразователя для исследования влияния преобразователя на питающую сеть

В комплект виртуальной модели (см. рис. 75) входят следующие блоки: источник 3-фазного напряжения (3-Phase Source), трансформатор (TR), система импульсно-фазового управления (SIFU), блок задания угла управления (Zadatchik alfa), вентильный блок (WB), реактор (L), источник ЭДС (EDS),

задатчик тока Id (Zadatchik Id), блок измерительных преобразователей (VIP), датчики тока и напряжения (Dat i1A, Dat u1ab, Dat u1a, Dat U1d), осциллограф (Scope), дисплеи (Display1, Display2), блок Continuous powergui.

Перечисленные блоки имеют назначения и изменяемые параметры аналогичные соответствующим блокам в соответствии с рис. 74.

Исключения составляют только следующие блоки:

1) Источник 3-фазного напряжения (3-Phase Source) – блок по аналогии с блоком SET' (см. рис. 74) имитирует сеть трехфазного напряжения частотой 50 Гц. По функциональному назначению соответствует блоку SET'. Изменяемые параметры блока:

- напряжение сети (Phase-to-phase rms voltage, V) установить равное 220 В;
- фазовый сдвиг (Phase angle of phase A, degrees) установить равный 0 град;
- частота (Frequency, Hz) установить 50 Гц;
- активное (Source resistance, Ohms) и индуктивное (Source inductance, H)

сопротивление источника питания установить 10 Ом и 0,1 Гн соответственно.

2) Реактор (L) – блок, включаемый между преобразователем и источником ЭДС, воспринимающий разницу мгновенных значений напряжений и ЭДС (ПЭДС) Изменяемые параметры блока:

- индуктивность реактора L (установить 0,4 Гн);
- активное сопротивление реактора R (установить 5 Ом);

3) Блок измерительных преобразователей (VIP) – блок, позволяющий осциллографировать:

- мгновенные значения анодного тока (i_a);
- мгновенные значения напряжения на вентиле (u_a);
- мгновенные значения выпрямленного тока (i_d);
- мгновенные значения выпрямленного напряжения (u_d);
- среднее значение выпрямленного напряжения (U_d);
- среднее значение выпрямленного тока (I_d);
- активную мощность (P1), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
- реактивную (Q1) мощность, потребляемую из сети;
- полную мощность (S1) потребляемую из сети;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (K_u);

- коэффициент мощности χ (H_i);
- результирующий коэффициент гармоник тока (K_i);
- $\text{tg } \varphi$ ($\text{tg } f_i$);

4) Датчик тока (Dat i1A) позволяет осциллографировать ток на первичной стороне трансформатора фазы А;

5) Датчики напряжения (Dat u1ab, Dat u1a) – позволяют измерять напряжение на первичной стороне трансформатора между фазами А и В и напряжение фазы А;

6) Датчик напряжения (Dat U1d) – позволяет осциллографировать напряжение на нагрузке;

7) Осциллограф (Score1) – блоки, позволяющие наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых с датчиков и блока ВР;

8) Дисплеи (Display1, Display2) – блоки, предназначенные для цифрового отображения значений напряжений и токов, снимаемых с блока ВР;

9) Блок Continuous powergui предназначен для спектрального анализа сигналов снимаемых с осциллографа. Двойной щелчок левой кнопкой мыши по блоку Continuous powergui раскрывает панель инструментов, представленную (на рис. 76, а). Щелчок левой кнопкой мыши по кнопке FFT Analysis (см. рис. 76, а) открывает смотровое окно с временной диаграммой и разложением этого сигнала в спектр.

В правой части смотрового окна расположены строки и кнопки управления (см. рис. 76, б):

- Structure: строка выбора осциллографа с необходимыми осциллограммами. В раскрывающемся списке выбрать «Preobrazovatel»;

- Input: номер входа, для вывода соответствующей осциллограммы. Порядок и количество входов (input 1, input 2 ...) соответствует сигналам на входах осциллографа Score;

- Signal number: номер сигнала. Раскрывающийся список данной строки становится активным, если на один вход осциллографа через мультиплексор одновременно подано несколько сигналов.

– Start time(s): начальное время. Задание не с момента времени $t = 0$, позволяет исключить влияние переходного процесса на разложение сигнала в спектр.

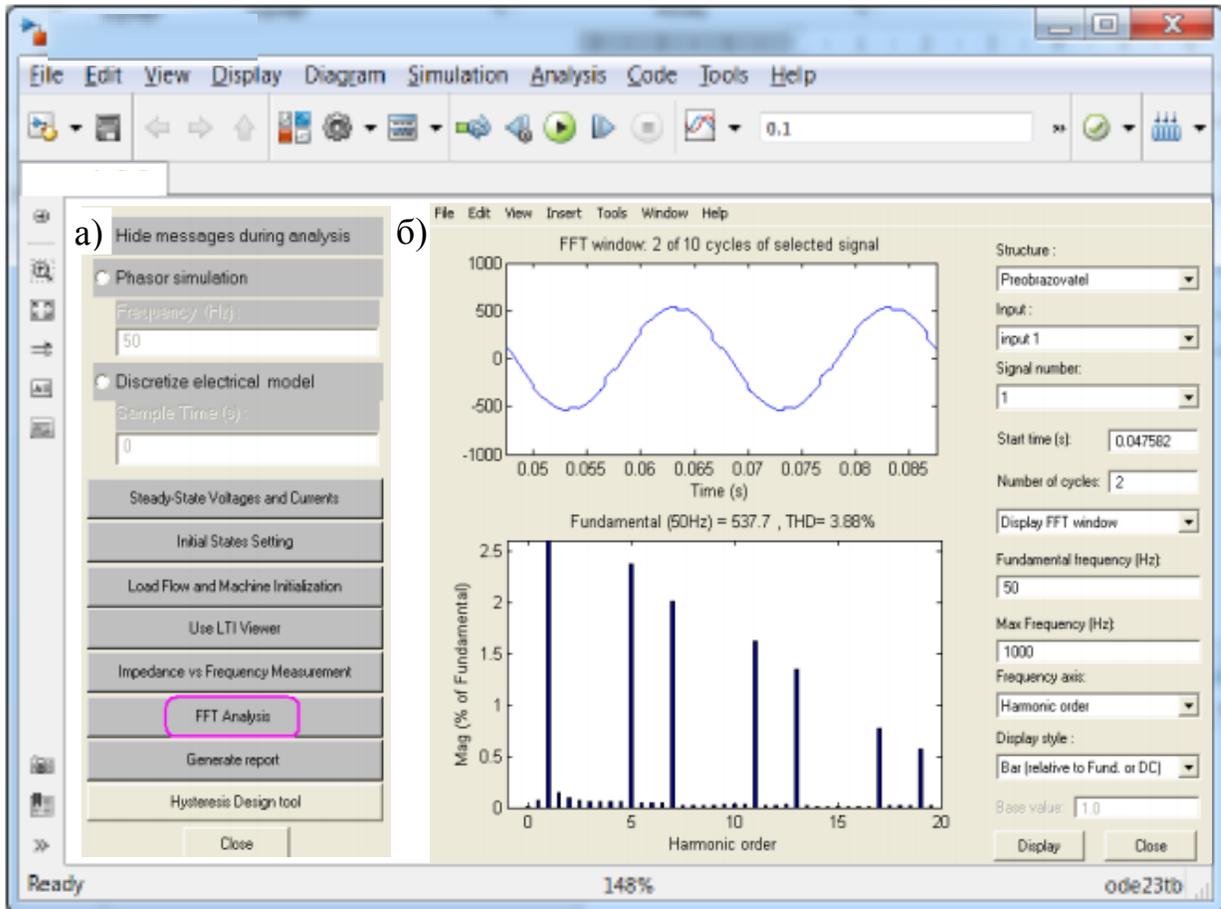


Рис. 76. Панель инструментов (а) и смотровое окно (б) с временной диаграммой напряжения u_{1ab} и разложением напряжения u_{1ab} в спектр

- Number of cycles: число циклов, отображаемых на осциллограмме.
- Display FFT window – режим отображения осциллограммы с момента времени равного Start time(s) и в количестве циклов равном Number of cycles. Также возможен режим Display entire signal, при котором на экран смотрового окна выводится сигнал с момента времени $t = 0$ и до конца времени расчета.
- Fundamental Frequency (Hz) – основная частота.
- Max Frequency (Hz) – максимальная частота, определяет до какой гармоники будет представлен спектр.

– Frequency axis: ось частот или горизонтальная ось. В раскрывающемся списке возможность выбора подписи горизонтальной оси: частота (Hertz) или номер гармоник (Harmonic order);

– Display style: стиль представления спектра: в виде графической зависимости в относительных Bar (relative to Fund. or DC) или абсолютных единицах Bar (relative to specifier base), а также в виде матрицы в относительных List (relative to Fund. or DC) или абсолютных единицах List (relative to specifier base).

Предварительное домашнее задание

а) Изучить темы курса: «Управляемые выпрямители», «Непрерывный режим», «Энергетические показатели», «Ведомые инверторы», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) рассчитать и построить внешние характеристики для двух заданных (в соответствии с № варианта по данным табл. 3) углов управления α_1 и α_2 , принимая $x_d = \infty$. При построении воспользоваться формулой

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - a \cdot U_{T(T0)} - \left[a \cdot r_T + a \cdot r_a + \frac{x_a}{(2\pi/m)} \right] \cdot I_d, \quad (1)$$

где $U_T(T0)$ – пороговое напряжение тиристора; r_T – дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии; r_a , x_a – анодные активное и индуктивное сопротивления (сопротивления схемы замещения трансформатора, приведенные к стороне вентиля).

Для мостовой схемы включения среднее значение выпрямленного напряжения для идеального неуправляемого выпрямителя U_{d0} , пульсность схемы m и значение коэффициента a , учитывающего через сколько вентиля и сколько обмоток схемы проходит ток, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Схема	m	U_{d0}	a
Трёхфазная мостовая	6	2,34·E2	2

в) рассчитать и построить регулировочную характеристику однокомлектного рекуперирующего преобразователя в непрерывном режиме для заданного тока нагрузки I_d . При расчете воспользоваться формулой (1).

г) рассчитать и построить ограничительную характеристику преобразователя на том же графике, где построены внешние характеристики. Уравнение ограничительной характеристики (2) имеет вид

$$U_{dmax} = -U_{d0} \cdot \cos \delta_{min} - a \cdot U_{T(ТО)} + \left[\frac{x_a}{(2\pi/m)} - a \cdot (r_a + r_T) \right] \cdot I_d, \quad (2)$$

где δ_{min} – минимальный угол, предоставляемый на выключение или восстановление управляющих свойств тиристора;

д) построить в масштабе друг под другом временные диаграммы вторичных ЭДС e_2 , инвертируемого напряжения u_d , тока нагрузки i_d (при $x_d = \infty$), тока вентиля i_a и напряжения на вентиле u_a с учетом заданных значений U_2 , α_2 , I_d и угла коммутации $\gamma = 100^\circ$ по аналогии с диаграммами, приведенными на рис. 77. На диаграммах отметить углы α , γ , $U_{a\max}$, $I_{a\max}$.

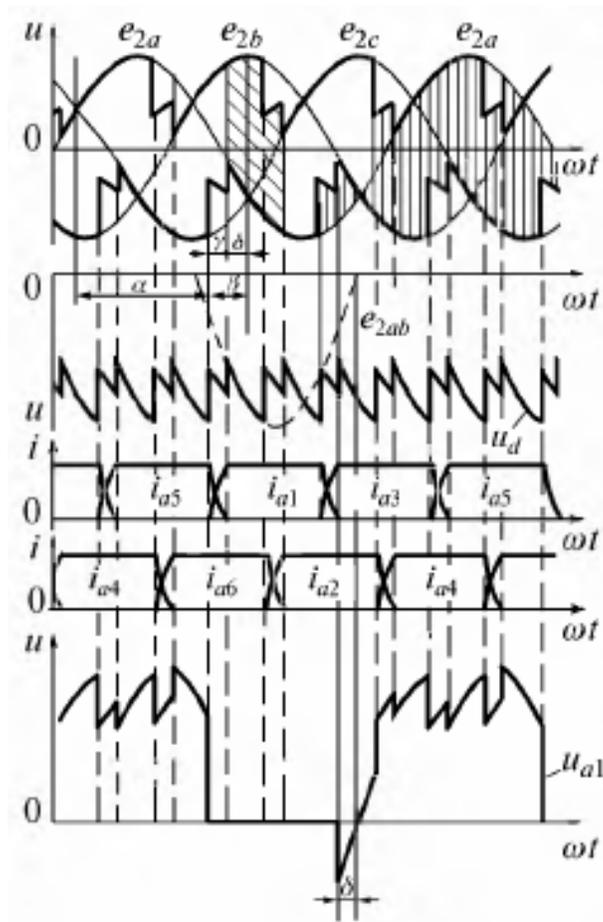


Рис. 77. Диаграммы токов и напряжений в ведомом инверторе при $x_d = \infty$, $x_a \neq 0$ для трехфазной мостовой схемы

При описании процессов в ведомом инверторе (см. рис. 77), кроме угла управления α (угла запаздывания), используется угол управления β (угол опережения), отсчитываемый от точки, находящейся через 180° от точки естественной коммутации. Следовательно,

$$\beta = 180^\circ - \alpha.$$

В инверторном режиме изменяется вид напряжения на вентиле. В течение угла δ (см. рис. 77) должны восстановиться управляющие свойства тиристора. При этом δ – угол, предоставляемый на выключение или восстановление управляющих свойств тиристора, может быть определен по формуле

$$\delta = \beta - \gamma,$$

где γ – угол коммутации.

Программа исследования однокомплектного рекуперирующего преобразователя

1. Исследование модели однокомплектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования:

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в выпрямительном и инверторном режиме.

1.3. Изучение перехода от выпрямительного к инверторному режиму, снятие регулировочной и энергетических характеристик.

1.4. Снятие внешних и энергетических характеристик при заданных углах управления.

1.5. Снятие и построение ограничительной характеристики.

2. Исследование влияния преобразователя на питающую сеть:

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в выпрямительном режиме.

2.3. Определение спектров гармоник и качества напряжения сети при работе преобразователя.

2.4. Исследование влияния различных факторов на напряжение питающей сети.

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. *Исследование модели однокомплектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования:*

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

а) запустить программу «MatLab»;

б) открыть файл «rek_pr.mdl». После открытия на экране появится виртуальная модель однокомплектного рекуперирующего преобразователя, представленная на рис. 74;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.

Переключатели Switch1 и Switch2 установить в верхнее положение, при этом в схему введены блоки Zadatchik alfa и Zadatchik Id.

Переключатели Switch3 и Switch4 установить в нижнее положение, отключив, таким образом, графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(\alpha)$ из схемы.

В блоке трансформатор TR установить $L_a = X_a/\omega$, где X_a – задано (в соответствии с № варианта по данным табл. 3, при частоте 50 Гц и $\omega = 314 \text{сек}^{-1}$).

В блоке Zadatchik alfa угол управления α_1 – задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 3, при частоте 50 Гц).

В блоке Zadatchik Id выпрямленный ток I_d – задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 3, при частоте 50 Гц).

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в выпрямительном и инверторном режиме.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в разделе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления α_1 в выпрямительном режиме.

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке;

г) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений в инверторном режиме.

В блоке Zadatchik alfa задать угол управления $\alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ$.

1.3. Изучение перехода от выпрямительного к инверторному режиму и снятие регулировочной и энергетических характеристик.

Переключатель Switch1 установить в нижнее положение, а переключатель Switch4 установить в верхнее положение, введя в схему блок ZADATCHIK ALFA и графопостроитель $U_d = f(\text{alfa})$.

Переключатель Switch2 установить в верхнее положение, а переключатель Switch3 установить в нижнее положение, введя в схему блок Zadatchik Id и отключив графопостроитель $U_d = f(\text{Id})$.

В блоке Zadatchik Id величину тока Id задать (в соответствии с № варианта по данным табл. 3).

а) запустить модель и снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$.

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов, напряжений (Score1), мощностей (Score2) и энергетические характеристики (Score3).

На полученных осциллограммах мощностей и энергетических характеристик подписать каждую кривую в соответствии с рис. 78 и дома в графическом редакторе Paint или вручную добавить вторую ось – угол α (alfa).

По осциллограммам и регулировочной характеристике определить точку (область) перехода от выпрямительного режима к инверторному.

При построении графиков необходимо обращать внимание на знаки выпрямленного тока i_d и напряжения u_d (Score1), и мощностей (Score2), а также характер изменения КПД и коэффициента мощности χ (Score3).

Сравнить регулировочные характеристики, полученные экспериментальным путем и построенные дома (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 3).

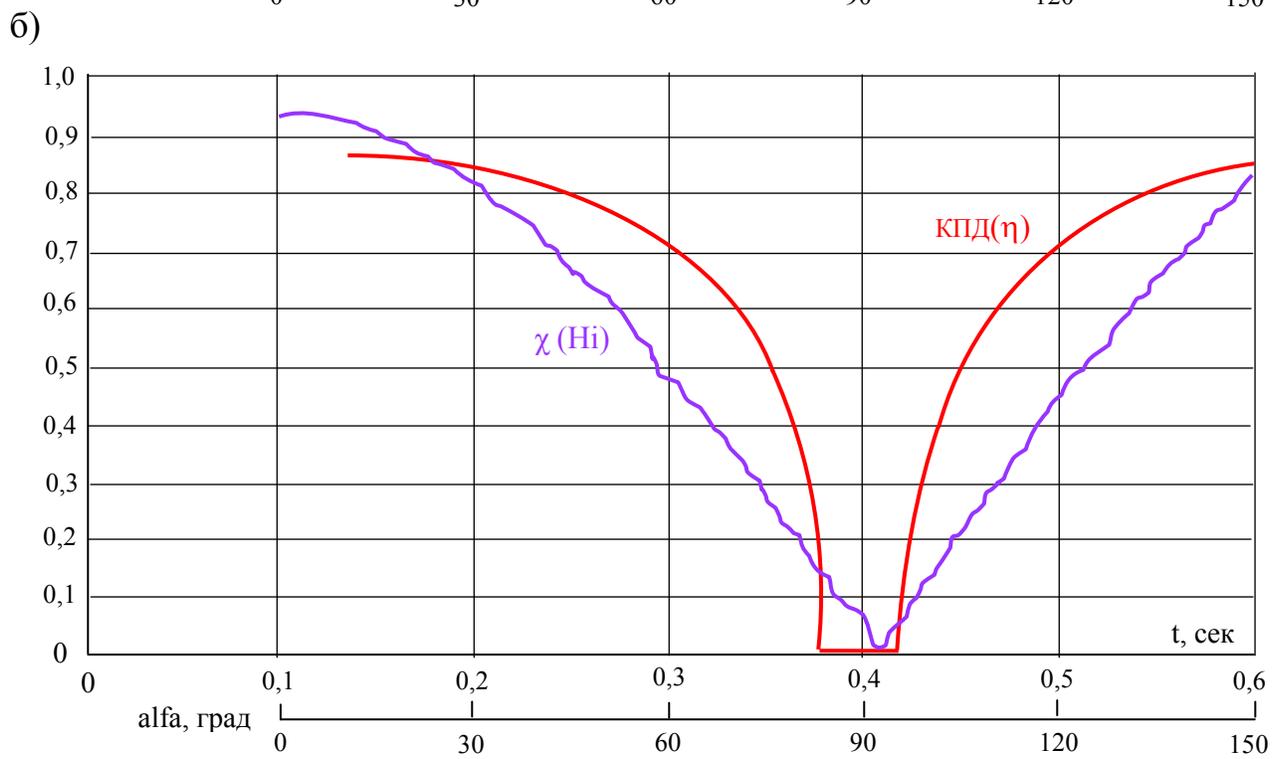
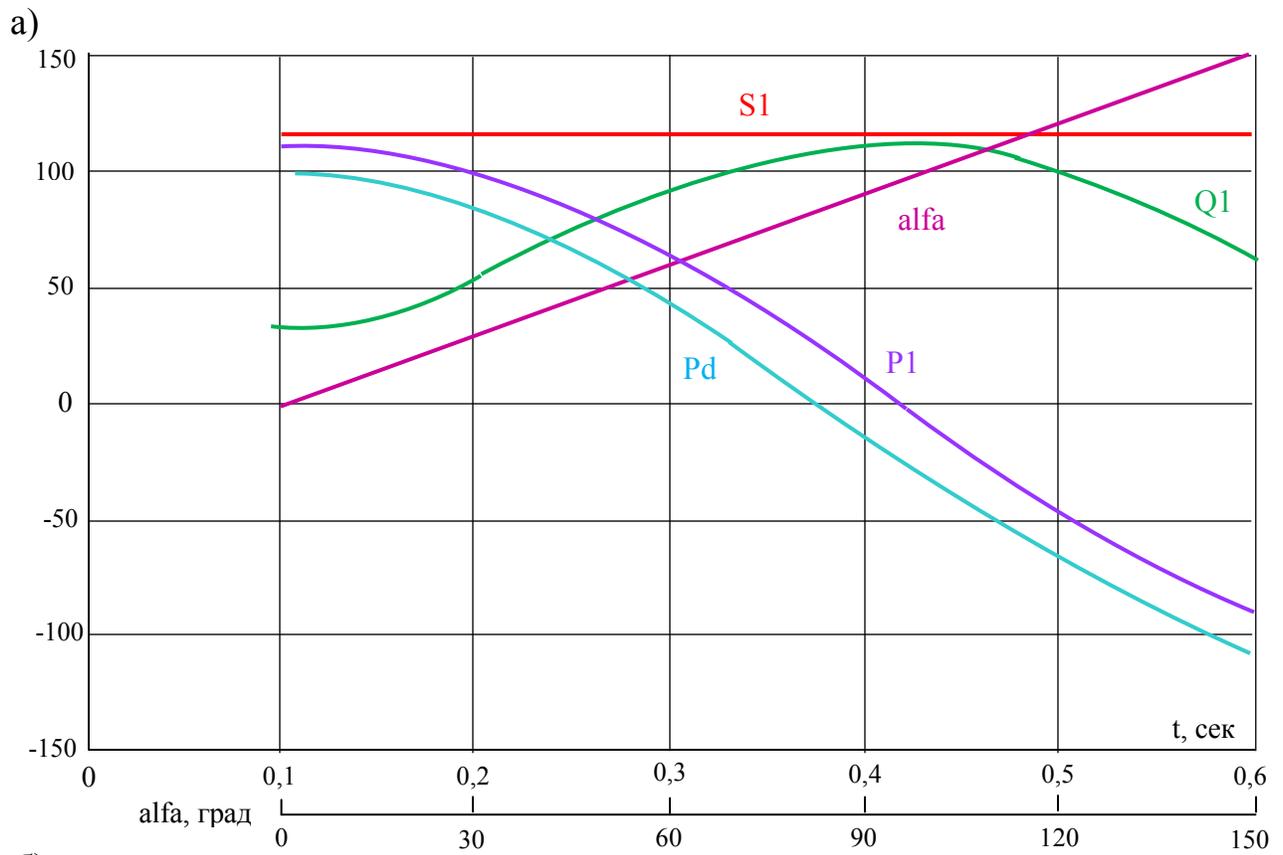


Рис. 78. Пример обработки осциллограмм мощностей (а) и энергетических характеристик (б) для отчета.

1.4. Снятие внешних и энергетических характеристик при заданных углах управления.

Переключатель Switch1 установить в верхнее положение, подключив в схему блок Zadatchik alfa.

Переключатель Switch2 установить в нижнее положение, а переключатель Switch3 установить в верхнее положение, введя, таким образом, в схему блок ZADATCHIK Id и подключив графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

Переключатель Switch4 установить в нижнее положение отключив графопостроитель $U_d = f(\alpha)$.

а) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ в выпрямительном режиме.

В блоке Zadatchik alfa угол управления α_1 – задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 3, при частоте 50 Гц).

В блоке трансформатор TR установить $L_a = X_a/\omega$, где X_a – задано (в соответствии с № варианта по данным табл. 3, при частоте 50 Гц).

б) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ в инверторном режиме. В блоке Zadatchik alfa угол управления задать $\alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ$.

Обе внешние характеристики (по п.п. а) и б)) подписать и расположить в одних осях (наложить друг на друга в графическом редакторе Paint).

Сравнить внешние характеристики, полученные экспериментальным путем (для соответствующих параметров схемы) с аналогичными характеристиками построенными дома (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 3).

Экспериментальные внешние характеристики и характеристики, рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях.

1.5. Снятие и построение ограничительной характеристики при $\delta_{\min} = \text{const}$.

Переключатель Switch1 установить в верхнее положение, подключив в схему блок Zadatchik alfa.

Переключатель Switch2 установить в нижнее положение, введя в схему блок Zadatchik Id.

Переключатели Switch3 и Switch4 установить в нижнее положение, отключив графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(\alpha)$.

Точки характеристики получить следующим образом. При токе $I_d = 0,1$ А (задан в блоке *Zadatchik Id*) установить угол $\alpha = 150^\circ$ (задан в блоке *Zadatchik alfa*) и замерить с помощью виртуального осциллографа *Scope1* угол δ (на осциллограмме напряжения u_a). Увеличить ток I_d до 0,5 А и, уменьшая угол α (ориентировочно $\alpha = 145^\circ$), добиться того же значения δ . Повторить опыт при заданном значении тока I_d . По трем полученным точкам построить ограничительную характеристику преобразователя $U_{dmax} = f(I_d)$ и зависимость допустимого угла управления от нагрузки $\alpha_{max} = f(I_d)$.

Ограничительную характеристику следует построить на том же графике, где построены внешние характеристики (по п.п. 1.4).

1. Исследование влияния преобразователя на питающую сеть.

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) открыть файл «*rek_pr_spectr.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель однокомплектного рекуперирующего преобразователя, представленная на рис. 75;

б) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.

В блоке трансформатор *TR* установить $L_a = X_a/\omega$, где X_a – задано (в соответствии с № варианта по данным табл. 3, при частоте 50 Гц).

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления α_1 – задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 3, при частоте 50 Гц).

В блоке *Zadatchik Id* выпрямленный ток I_d – задан (в соответствии с № варианта по данным табл. 3, при частоте 50 Гц).

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в выпрямительном режиме.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в разделе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления α_1 в выпрямительном режиме.

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке;

в) записать показания с дисплея (в табл. 2).

Таблица 2

Исследование влияния преобразователя на питающую сеть

Электрические величины и параметры	X_a	$2 \cdot X_a$	LSet	$2 \cdot LSet$
Ud				
Id				
P1				
Q1				
S1				
Ku				
χ (Hi)				
Ki				
tg φ (tg φ_i)				

Примечание: В табл. 2 параметры X_a и индуктивное сопротивление сети LSet (Source inductance) заданы (в соответствии с № варианта по данным табл. 3).

2.3. Определение спектров гармоник и качества напряжения сети при работе преобразователя.

а) с помощью блока Continuous powergui и приведенным выше рекомендациям снять спектральный состав напряжения сети u1ab и тока i1A на входе преобразователя, а также тока id и напряжения на нагрузке ud.

Для перехода от одного сигнала к другому в смотровом окне установить номер входа: Input1 – сигнал u1ab; Input2 – сигнал i1A; Input5 – сигнал id; Input6 – сигнал ud.

Для обновления на смотровом окне сигнала осциллограммы нажать левой кнопкой мыши по строке «Display FFT window».

Для обновления на смотровом окне сигнала спектра нажать на кнопку «Display» в нижней правой части смотрового окна.

б) при других параметрах ($X_a^* = 2 \cdot X_a$ и $L_{Set} = 2 \cdot L_{Set}$) снять спектральный состав напряжения сети u_{lab} и тока i_{lA} на входе преобразователя, а также тока i_d и напряжения на нагрузке u_d .

Записать показания с дисплея (см. рис. 75) в табл. 2 в соответствующие столбцы.

Выбор варианта задания

Номер варианта определяется последними двумя цифрами зачетной книжки студента. Если количество предлагаемых вариантов меньше учебного шифра студента, то номер варианта определяется как разность уменьшаемого (шифра студента) и вычитаемого (числа предлагаемых вариантов в данном задании). Например, шифр студента – 67, а число вариантов в задании на лабораторную работу 1 – 50, тогда номер варианта равен: $67 - 50 = 17$.

Таблица 3

Таблица вариантов

№ варианта	№ задания	Угол управления α , град	Выпрямленный ток I_d , А	Напряжение на вторичной обмотке трансформатора U_2 , В	Индуктивное сопротивление рассеивания трансформатора X_d , Ом
1, 26	А, Б	30	1,0	48	4,3
2, 27	А, Б	40	1,0	50	4,3
3, 28	А, Б	50	1,0	52	4,3
4, 29	А, Б	60	1,0	54	4,3
5, 30	А, Б	70	1,0	56	4,3
6, 31	А, В	30	0,9	56	6,3
7, 32	А, В	40	0,9	54	6,3
8, 33	А, В	50	0,9	52	6,3
9, 34	А, В	60	0,9	50	6,3
10, 35	А, В	70	0,9	48	6,3
11, 36	Б, А	30	1,0	48	4,3
12, 37	Б, А	40	1,0	50	4,3

Продолжение таблицы 3

13, 38	Б, А	50	1,0	52	4,3
14, 39	Б, А	60	1,0	54	4,3
15, 40	Б, А	70	1,0	56	4,3
16, 41	Б, В	30	0,9	56	6,3
17, 42	Б, В	40	0,9	54	6,3
18, 43	Б, В	50	0,9	52	6,3
19, 44	Б, В	60	0,9	50	6,3
20, 45	Б, В	70	0,9	48	6,3
21, 46	В, Б	30	1,0	48	4,3
22, 47	В, Б	40	1,0	50	4,3
23, 48	В, Б	50	1,0	52	4,3
24, 49	В, Б	60	1,0	54	4,3
25, 50	В, Б	70	1,0	56	4,3

Примечания:

1. Студенты, получившие № задания А, выполняют пункты 1а), б) и г); № задания Б – пункты а) и в); № задания В – пункты а) и д).
2. При расчете принимать $E_2 = U_2$ на холостом ходу; $U_T(T_0) = 0,8 \text{ В}$; $r_T = 0,2 \text{ Ом}$, $r_a = 1,5 \text{ Ом}$; $\delta_{\min} = 15^\circ$.
3. Все расчеты и построения выполняются для трехфазной мостовой схемы ($m = 6$).
4. При построении диаграмм принимать $x_d = \infty$.
5. Принять $\alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ$.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 3).

5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для однокомлектного рекуперирующего преобразователя, выполненного по мостовой схеме.

6. Осциллограммы для исследованных схем:

а) в выпрямительном и инверторном режиме;

б) показывающие влияния преобразователя на питающую сеть.

Сделать выводы о влиянии режима на вид осциллограмм.

Сравнить расчетные значения с полученными экспериментальным путем.

7. Регулировочные и энергетические характеристики

Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях.

Сравнить эти характеристики.

Сделать выводы о причинах различия.

8. Внешние и энергетические характеристики при изменении угла управления и параметров трансформатора, построенные на одном графике.

Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях.

Сравнить эти характеристики.

Сделать выводы о причинах различия.

Сделать выводы о влиянии угла управления на внешние характеристики.

9. Ограничительная характеристика. Построить на одном графике с внешними характеристиками, пояснить ее назначение.

10. Осциллограммы и измеренные электрические величины, показывающие влияния преобразователя на питающую сеть, в выпрямительном режиме.

11. Спектры гармоник, характеризующие качество напряжения сети при работе преобразователя.

12. Обобщающие выводы.

Объяснить внешний вид полученных осциллограмм и характеристик:

– указать, чем отличаются осциллограммы для выпрямительного и инверторного режима;

– сравнить внешние характеристики в выпрямительном и инверторном режимах;

Объяснить, чем вызваны отклонения внешних характеристик в области малых токов от расчетных;

– сравнить энергетические характеристики при регулировании угла управления в выпрямительном и инверторном режимах.

Контрольные вопросы

1. Что такое ведомый инвертор?
2. Что такое однокомплектный рекуперирующий преобразователь?
3. Каков вид внешних и регулировочных характеристик ведомого инвертора в режиме непрерывного тока?
4. Что такое ограничительная характеристика?
5. Какие факторы и как влияют на наклон ограничительной характеристики?
6. Как снимаются внешние характеристики?
7. Как снимаются регулировочные характеристики?
8. Как снять ограничительную характеристику?
9. Что такое опрокидывание инвертора?
10. Как изменяется направление потока мощности при переходе от выпрямительного к инверторному режиму?
11. Что такое коэффициент мощности преобразователя?
12. Как определить коэффициент мощности преобразователя экспериментально?
13. При каких условиях КПД равен нулю? Почему?
14. Как зависит КПД от угла регулирования?
15. Как зависит КПД от тока нагрузки?
16. Чем определяется угол сдвига в преобразователе?
17. Как определить КПД в выпрямительном и инверторном режимах?
18. Каков спектральный состав тока, потребляемого из сети преобразователем?
19. От каких факторов зависит коэффициент гармоник напряжения сети при питании от нее преобразователей?
20. Назначение всех модулей виртуальной модели однокомплектного рекуперирующего преобразователя?

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКОМПЛЕКТНОГО РЕВЕРСИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Цель работы: Изучение электромагнитных процессов и характеристик реверсивного преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме.

Схема реверсивного преобразователя изображена на рис. 79.

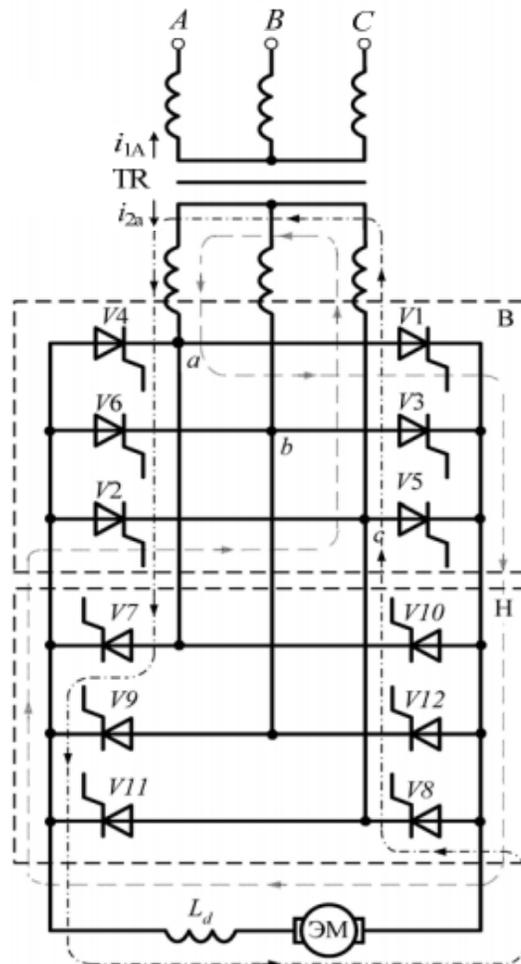


Рис. 79. Принципиальная схема реверсивного преобразователя

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 80.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: сеть (SET'), трансформатор (TR), система импульсно-фазового управления (SIFU), логическое переключающее устройство (LPU), блок задания угла управления

(Zadatchik alfa), вентиляльные блоки (komplekt NAZAD и комплект VPERED), реактор (L), источник ЭДС (EDS), задатчики тока Id (Zadatchik Id и ZADATCHIK Id), блок измерительных преобразователей (BIP), датчики тока и напряжения (Dat id, Dat ud), осциллограф (Scope), дисплей (Display), переключатели (Switch) и графопостроитель ($U_d = f(I_d)$).

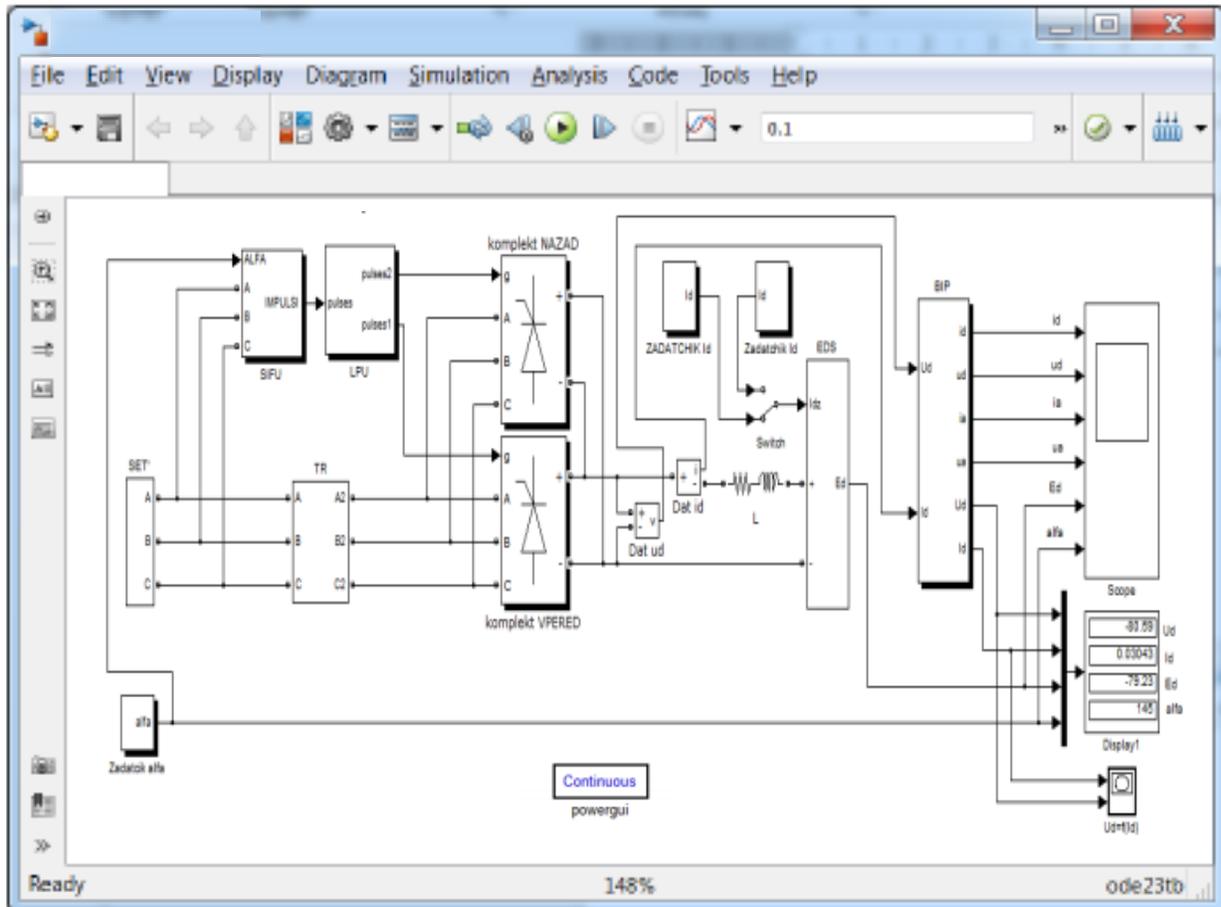


Рис. 80. Виртуальная модель реверсивного преобразователя предназначенная для снятия внешних характеристик

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник напряжения (SET') – блок, состоящий из трех источников идеального синусоидального напряжения, имитирует сеть трехфазного напряжения частотой 50 Гц. Напряжения источников сдвинуты относительно друг друга на 120 градусов.

Изменяемые параметры блока:

– напряжение (Voltage) сети установить равное 220В.

2) трансформатор (TR) – блок, состоящий из идеального трехфазного трансформатора с учетом контура намагничивания и включенных последовательно в каждой фазе RL – цепей.

Изменяемые параметры блока:

– индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне. Установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – (в соответствии с № варианта по данным табл. 5) при частоте 50 Гц и $\omega = 314 \text{ сек}^{-1}$.

– активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной стороне (установить $R_a = 1,65 \text{ Ом}$);

– фазное напряжение на первичной стороне трансформатора U1 (установить 220 В);

– фазное напряжение на вторичной стороне трансформатора U2 (установить 48 В).

3) система импульсно-фазового управления (SIFU) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами.

Двойной щелчок левой кнопкой мыши позволяет раскрыть структуру блока SIFU. В состав СИФУ (SIFU) входит синхронизированный шестиканальный импульсный генератор (Synchronized 6-Pulse Generator), формирующий сдвоенные импульсы для управления тиристорами вентильного блока.

4) блок задания угла управления (Zadatchik alfa) позволяет задавать фиксированные углы управления тиристорами (α_1 и α_2 в соответствии с № варианта по данным табл. 3).

5) логическое переключающее устройство (LPU) – электронный блок для подачи управляющих импульсов либо на комплект «Вперед», либо на комплект «Назад» и исключения подачи управляющих импульсов на соседний комплект.

6) вентильный блок (komplekt NAZAD и komplet VPERED) – универсальные мостовые модули, имитирующие работу комплекта «Назад» и «Вперед».

Изменяемые параметры блоков:

– количество плеч универсального моста (Numbers of bridge arms) – установить равное 3;

– демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристорам и устраняет перенапряжения при выключении вентилей (установить $R_s = 6000 \text{ Ом}$, $C_s = 1e^{-7}$);

– тип силового полупроводникового элемента (Power Electronic device) – установить – тиристор (Thyristors);

– дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии R_{on} (установить 0,2 Ом);

– индуктивность тиристора во включенном состоянии L_{on} (установить 0 Гн);

– пороговое напряжение тиристора U_f (установить 0,8 В).

7) реактор (L) – блок, включаемый между преобразователем и источником ЭДС, воспринимающий разницу мгновенных значений напряжений и ЭДС (противо-ЭДС).

Изменяемые параметры блока:

– индуктивность реактора L (установить 0,2 Гн);

– активное сопротивление реактора R (установить 5 Ом);

8) источник ЭДС (EDS) – блок, имитирующий работу источника ЭДС (например, аккумулятора или электрической машины).

9) задатчики тока Id (Zadatchik Id и ZADATCHIK Id) – блоки задания по току нагрузки Id за счет автоматического регулирования величины ЭДС (противо-ЭДС).

Блок Zadatchik Id позволяет задавать фиксированное значение выпрямленного тока Id (установить в соответствии с № варианта по данным табл. 3) и предназначен для снятия осциллограмм;

Блок ZADATCHIK Id позволяет задавать значение выпрямленного (инвертируемого) тока, изменяющееся во времени от 0 до 1 А и предназначен для построения внешних характеристик.

10) блок измерительных преобразователей (VIP) – блок, позволяющий осциллографировать:

- мгновенные значения выпрямленного тока (i_d);
- мгновенные значения выпрямленного напряжения (u_d);
- мгновенные значения анодного тока (i_{1a});
- мгновенные значения напряжения на вентиле (u_{1a});
- напряжение источника ЭДС (E);
- угол управления тиристорами α (alfa). и измерять:
- среднее значение выпрямленного напряжения (U_d);
- среднее значение выпрямленного тока (I_d);

11) датчики тока (Dat i_d) и напряжения (Dat u_d) – позволяют осциллографировать ток и напряжение на нагрузке.

12) осциллограф (Scope) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых с блока ВІР;

13) дисплей (Display) – блок, предназначенный для цифрового отображения значений напряжения и токов, снимаемых с блока ВІР.

14) переключатель (Switch) – блок, предназначенный для переключения между блоками Zadatchik I_d и ZADATCHIK I_d .

15) графопостроитель ($U_d = f(I_d)$) – блок, предназначенный для построения внешней $U_d = f(I_d)$ характеристики в автоматическом режиме.

Виртуальная модель реверсивного преобразователя, предназначенная для снятия осциллограмм и регулировочных характеристик изображена на рис. 81.

В комплект виртуальной модели (см. рис. 81) входят следующие блоки: сеть (SET'), трансформатор (TR), система импульсно-фазового управления (SIFU), логическое переключающее устройство (LPU), блок задания угла управления (ZADATCHIK ALFA), вентиляльные блоки (komplekt NAZAD и komplet VPERED), реактор (L), источник ЭДС (EDS), датчик тока I_d (Zadatchik I_d), блок измерительных преобразователей (ВІР), датчики тока и напряжения (Dat i_d , Dat u_d), осциллограф (Scope), дисплей (Display) и графопостроитель ($U_d = f(\alpha)$).

Перечисленные блоки имеют назначения и изменяемые параметры аналогичные соответствующим блокам в соответствии с рис. 80. Исключения составляют только следующие блоки:

1. Блок задания угла управления (ZADATCHIK ALFA) позволяет задавать угол управления тиристорами изменяющийся во времени от 0° до 150° и предназначен для построения регулировочной характеристики.

2. Графопостроитель ($U_d = f(\alpha)$) – блок, предназначенный для построения регулировочной $U_d = f(\alpha)$ характеристики в автоматическом

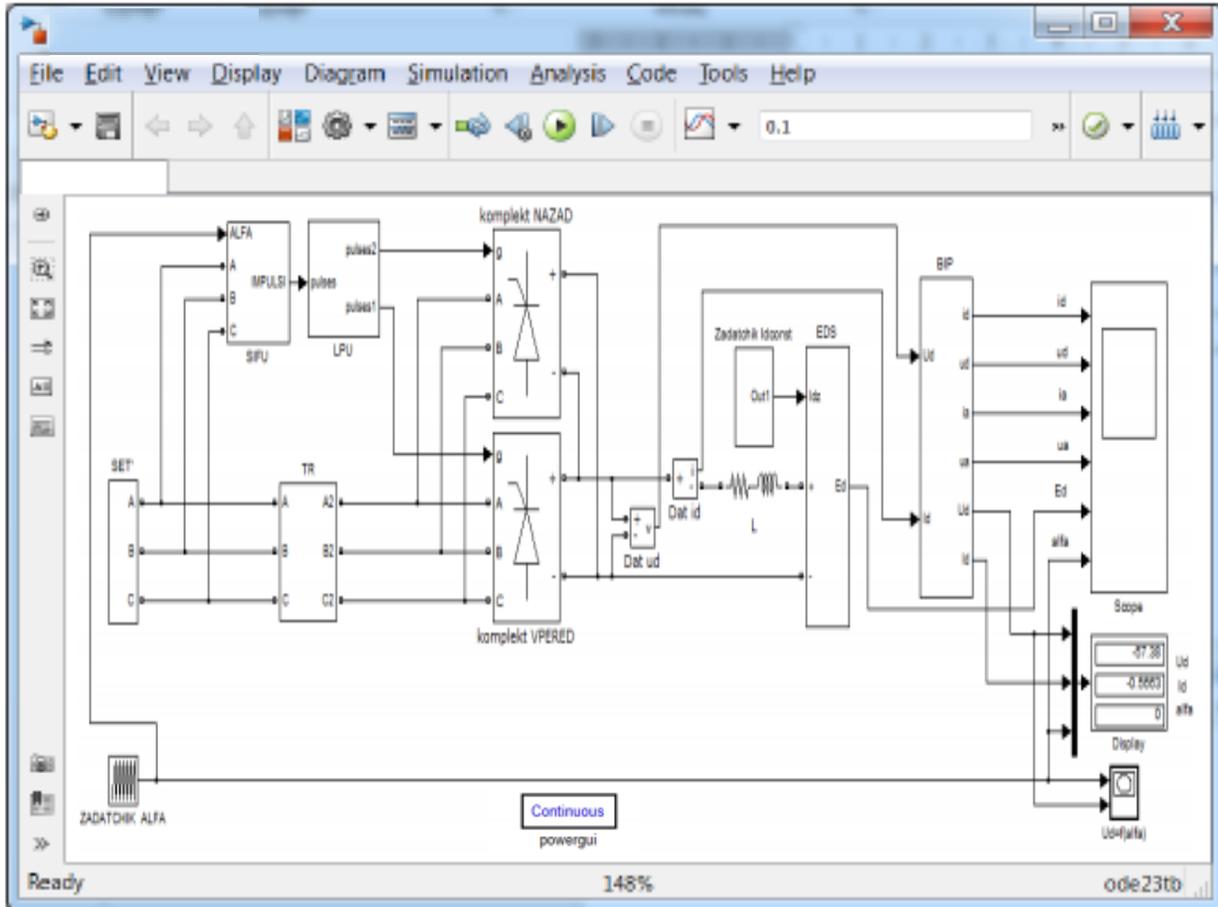


Рис. 81. Виртуальная модель реверсивного преобразователя предназначенная для снятия регулировочных характеристик

Предварительное домашнее задание

а) Изучить темы курса: «Реверсивные преобразователи», «Системы управления», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) рассчитать и построить регулировочные характеристики комплектов «Вперед» и «Назад» реверсивного преобразователя $U_{dv} = f(\alpha)$ и $U_{dn} = f(\alpha)$ в

абсолютных единицах для непрерывного режима при заданном токе нагрузки I_d .

Расчет регулировочной характеристики реверсивного преобразователя выполнить по уравнениям внешних характеристик для непрерывного режима

$$U_{de} = U_{d0} \cdot \cos \alpha - a \cdot U_{T(T0)} - \left[a \cdot r_T + a \cdot r_a + \frac{x_a}{(2\pi/m)} \right] \cdot I_{de}, \quad (1)$$

$$U_{dn} = -U_{de};$$

где $U_{T(T0)}$ – пороговое напряжение тиристора; r_T – дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии; r_a , x_a – анодные активное и индуктивное сопротивления (сопротивления схемы замещения трансформатора, приведенные к стороне вентиля).

в) рассчитать и построить регулировочные характеристики реверсивного преобразователя (РХП) $U_d = f(\alpha)$ (по выражению (1)), регулировочные характеристики системы управления реверсивного преобразователя (РХСУ) $\alpha = f(U_{упр})$, и реверсивного преобразователя вместе с системой управления (РХПСУ) $U_d = f(U_{упр})$ в абсолютных единицах для непрерывного режима при заданном токе нагрузки I_d , а также заданных параметрах регулировочной характеристики системы управления.

Форма опорного напряжения влияет на вид регулировочных характеристик (кроме РХП). Найдем уравнения регулировочных характеристик.

При пилообразном опорном напряжении, рассмотрев подобные треугольники на (рис. 82, а), получим соотношение

$$\frac{\alpha}{\theta} = \frac{U_{оп.маx} - U_{упр}}{2U_{оп.маx}}, \quad (2)$$

где $U_{оп.маx}$ – амплитуда опорного напряжения, θ – длительность рабочего участка пилообразного напряжения.

Тогда

$$\alpha = \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \frac{U_{упр}}{U_{оп.маx}} \right). \quad (3)$$

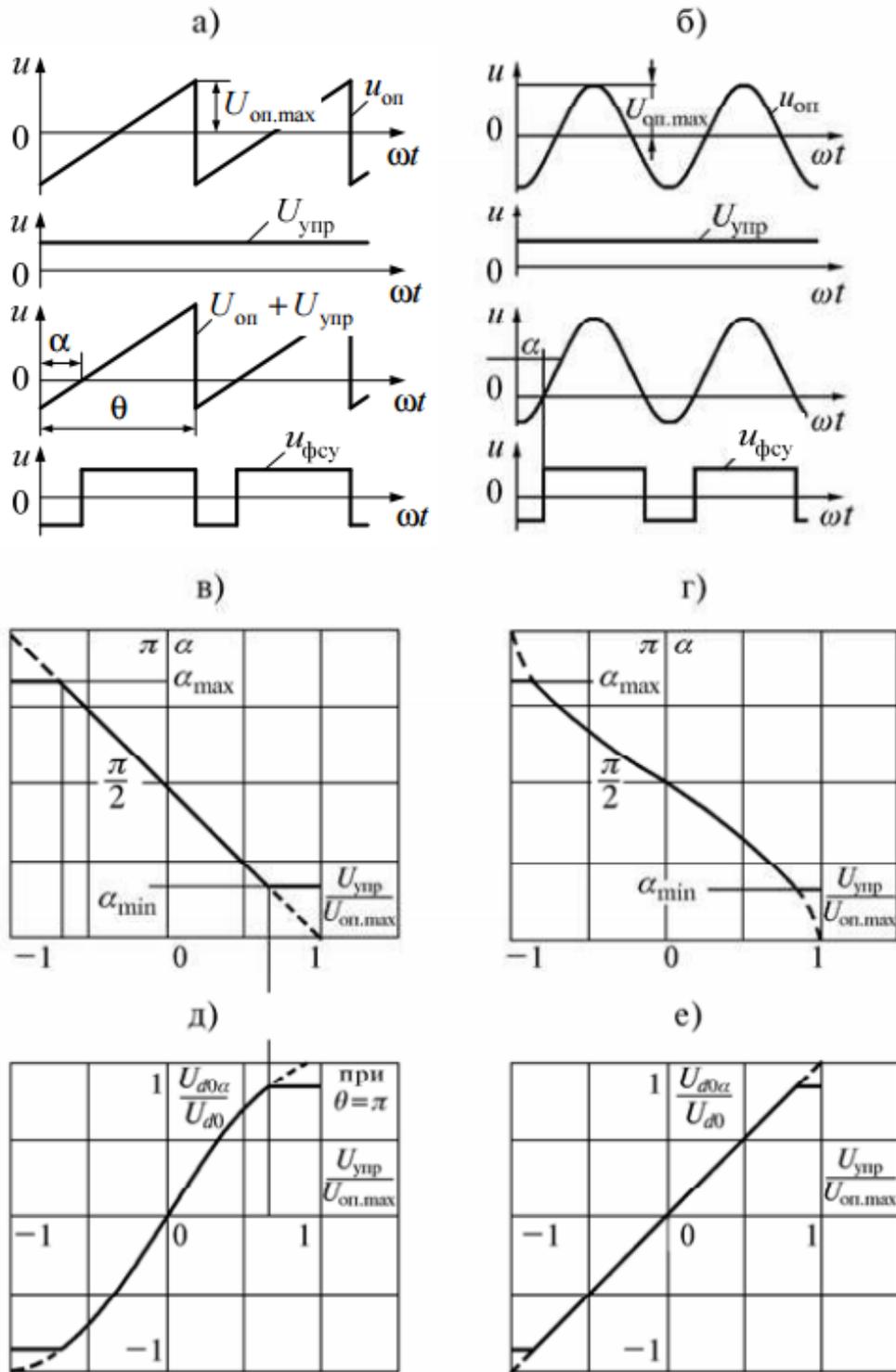


Рис. 82. Диаграммы напряжений (а, б), регулировочные характеристики СИФУ (в, г) и регулировочные характеристики всего преобразователя вместе с СИФУ (д, е) при линейном и косинусоидальном опорном напряжении

Для упрощения анализа примем $\theta = \pi$, тогда уравнение для РХСУ

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{оп.маx}}}\right). \quad (4)$$

Учитывая, что уравнение РХП в относительных единицах

$$\frac{U_{d\alpha 0}}{U_{d0}} = \cos \alpha, \quad (5)$$

получим уравнение для РХПСУ в относительных единицах

$$\frac{U_{d\alpha 0}}{U_{d0}} = \cos \frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{оп.маx}}}\right). \quad (6)$$

Регулировочные характеристики РХСУ и РХПСУ, построенные по уравнениям (4), (6), приведены на (рис. 82 в, д).

Если опорное напряжение косинусоидально, то из (рис. 82, б) следует, что

$$\frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{оп.маx}}} = \cos \alpha. \quad (7)$$

Тогда уравнение для РХСУ

$$\alpha = \arccos \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{оп.маx}}}. \quad (8)$$

Учитывая уравнение РХП в относительных единицах (5), получим уравнение для РХПСУ в относительных единицах

$$\frac{U_{d\alpha 0}}{U_{d0}} = \frac{U_{\text{упр}}}{U_{\text{оп.маx}}}. \quad (9)$$

Регулировочные характеристики РХСУ и РХПСУ, построенные по уравнениям (8), (9), приведены на (рис. 82 г, е).

На регулировочных характеристиках (см. рис. 82, в ÷ е) показаны ограничения, вводимые для предотвращения опрокидывания инвертора (α_{max}), а также для предотвращения превышения выпрямленным напряжением допустимого значения (α_{min}).

Если опорное напряжение системы управления косинусоидальное, то РХПСУ линейная (рис. 82, е). Это является преимуществом такой формы опорного напряжения. Недостаток косинусоидального опорного напряжения, получаемого из сетевого напряжения – искажения формы и колебания напряжения. При резком понижении напряжения в сети возможно пропадание

управляющих импульсов, так как перестанет переключаться компаратор. Для устранения влияния высших гармоник на форму опорного напряжения и повышения помехоустойчивости СУ применяют фильтры на входе системы управления, либо интегрирующие методы развертывающего преобразования.

На входе СИФУ в реверсивных преобразователях с отдельным управлением обязательно устанавливают переключатель характеристики (ПХ), предназначенный для согласования по знаку сигнала управления $U_{упр}$ с входом СИФУ.

Рассмотрим принцип действия ПХ. Будем считать, что при $U_{упр} > 0$ импульсы управления с выхода СИФУ подаются на комплект вентиля «В», при этом напряжение на выходе ПХ также положительное $U_{пх} > 0$, тогда согласно регулировочным характеристикам СИФУ (см. рис. 82 в, г) преобразователь работает в режиме выпрямления ($\alpha < 90$ эл.град, непрерывный режим). При изменении знака управляющего сигнала $U_{упр} < 0$ и снижении тока через проводящий комплект вентиля «В» до нуля ЛПУ дает команду на включение группы «Н». В случае отсутствия ПХ, на вход СИФУ будет подано отрицательное напряжение, что соответствует работе преобразователя в режиме инвертирования ($\alpha > 90$ эл.град, см. рис. 82 в, г).

В результате возникает несогласованность по знаку входа СИФУ с напряжением управления $U_{упр}$. Поэтому в случае изменения знака сигнала управления одновременно должна измениться полярность сигнала на входе СИФУ, т.е. статическая характеристика ПХ по команде ЛПУ должна перейти из первого во второй квадрант (рис. 83). Аналогичный переход из третьего в четвертый квадрант статической характеристики ПХ осуществляется при работе преобразователя в режиме инвертирования электрической энергии.

Регулировочные характеристики РХСУ и РХПСУ реверсивного преобразователя в непрерывном режиме приведены на рис. 84. Они построены по аналогии с характеристиками при косинусоидальном опорном напряжении для однокомплектного преобразователя (см. рис. 82 г, е). Особое значение имеет согласование РХСУ и РХПСУ комплектов преобразователя. Характеристики, приведенные на (рис. 84 а, в), соответствуют линейному согласованию, когда сумма углов управления комплектов при одном напряжении $U_{упр}$ равна 180

эл.град. При этом начальный угол управления α_0 при $U_{упр} = 0$ равен 90 эл.град, так как

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_B + \alpha_H}{2}. \quad (10)$$

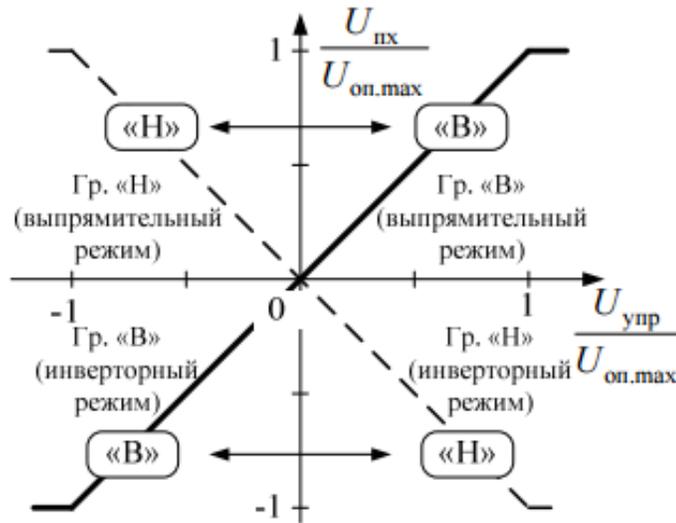


Рис. 83. Статическая характеристика «вход – выход» переключателя характеристик прямого канала регулирования реверсивного ТП

Выпрямленное напряжение U_d равно нулю при $U_{упр} = 0$ и при угле управления равном 90 эл.град только у идеального выпрямителя в непрерывном режиме. Чтобы обеспечить остановку двигателя при $U_{упр} = 0$ с учетом возможности перехода в прерывистый режим, необходимо выбрать начальный угол управления α_0 и, соответственно, напряжение смещения $U_{см}$, подаваемого через сумматор Σ на вход СИФУ, таким образом, чтобы при $U_{упр} = 0$ напряжение U_d на якоре двигателя было мало и, протекающий под его влиянием ток I_d не вызывал вращения (трогания) якоря. Ток трогания $I_{тр}$ составляет 1...5% от номинального тока якоря двигателя. При таких токах преобразователь переходит в режим прерывистого тока и РХП изменяется.

На (рис. 85, а) штриховой линией показано как изменяется при этом РХПСУ. Чтобы остановить якорь двигателя при $U_{упр} = 0$, нужно, чтобы этому напряжению соответствовал начальный угол управления $\alpha_0 > 90$ эл.град. Такое согласование, при котором сумма углов управления комплектов при одном и том же напряжении $U_{упр}$ больше 180 эл.град, называется нелинейным

По формулам (11), (12) можно найти напряжение смещения для выбранного угла α_0 .

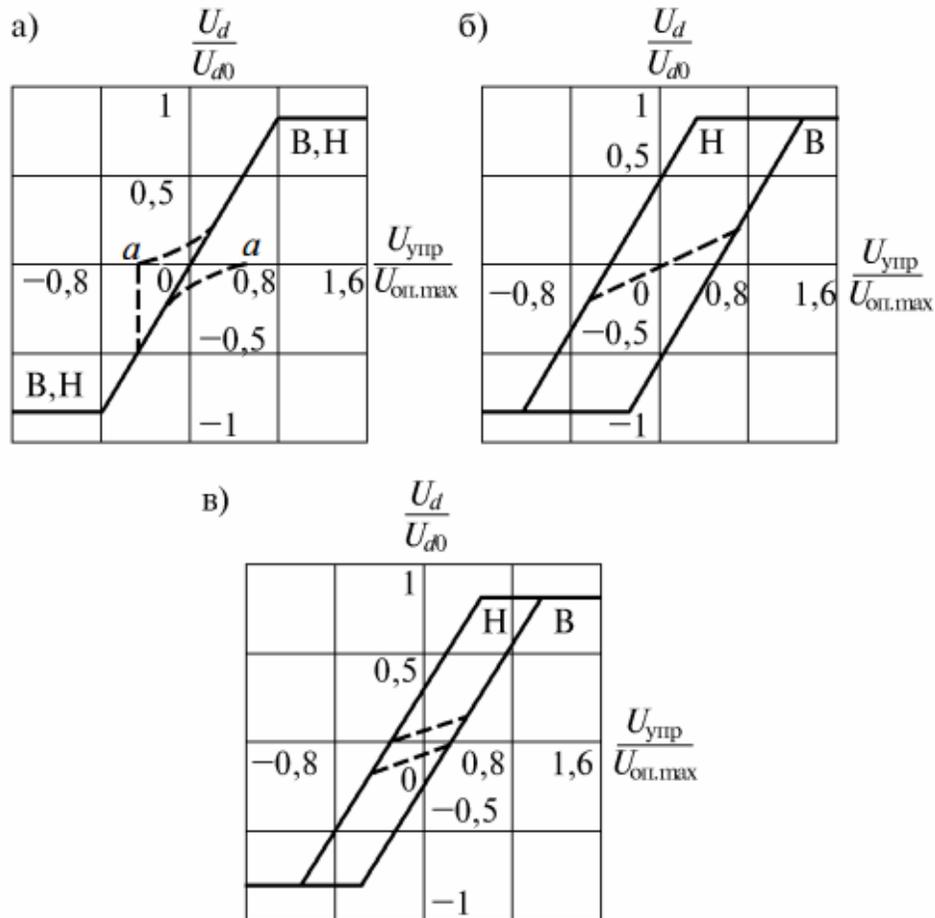


Рис. 85. Регулировочные характеристики двухкомплектного реверсивного преобразователя (вместе с системой управления) при различных начальных углах согласования: а) $\alpha_0 = 90$ эл.град; б) $\alpha_0 = 120$ эл.град; в) $\alpha_0 = 105$ эл.град

При выборе угла α_0 необходимо также учитывать, что если $\alpha_0 = 90$ эл.град, то в режиме непрерывного тока характеристики комплектов практически совпадают, что обеспечивает высокое качество регулирования (см. рис. 85, а). Смена комплекта возможна только при переходе в режим прерывистого тока. Однако, в режиме прерывистого тока РХПСУ неоднозначны (см. рис. 85). Если, например, ток нагрузки комплекта «В» был равен 0 (точка а на рис. 85, а), и произошло переключение комплектов, то при неизменном напряжении управления комплект «Н» откроется с углом $\alpha = 60$ эл.град и

произойдет скачек тока под действием напряжения, равного половине напряжения холостого хода. При $\alpha_0 = 120$ эл.град бросок тока будет отсутствовать, а при $\alpha_0 = 105$ эл.град бросок тока будет очень мал (см. рис. 85 б, в).

Неоднозначность характеристик (расширение зоны нечувствительности) затягивает время переключения, ухудшает динамику электропривода. Поэтому угол начального согласования α_0 нужно выбирать из компромиссных соображений. Если бы преобразователь был идеален, индуктивности в цепи отсутствовали, то при $m = 6$ нужно было бы выбрать $\alpha_0 = 120$ эл.град. Но с учетом неидеальности преобразователя и наличия индуктивности выбирается меньшее значение α_0 . В системах с повышенными требованиями к качеству регулирования при применении трехфазной мостовой схемы устанавливают $\alpha_0 = 95...100$ эл.град, а в массовом электроприводе – $\alpha_0 = 105...115$ эл.град. Для других схем выпрямления и характера нагрузки выбор начального угла управления следует выбирать в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Характер нагрузки	Схема выпрямления	Начальный угол управления α_0 , эл.град
Активная	Однофазная мостовая ($m = 2$)	180
	Трехфазная нулевая ($m = 3$)	150
	Трехфазная мостовая ($m = 6$)	120
Активно-индуктивная (обмотка возбуждения двигателя)	Для любых схем выпрямления	≤ 90
Активно-индуктивная с противо-ЭДС (якорь двигателя)	Однофазная мостовая ($m = 2$)	160 ÷ 175
	Трехфазная нулевая ($m = 3$)	130 ÷ 145
	Трехфазная мостовая ($m = 6$)	105 ÷ 115

На (рис. 84 б, г) приведены РХСУ и РХПСУ реверсивного преобразователя при нелинейном согласовании с $\alpha_0 = 105$ эл.град для трехфазной мостовой схемы выпрямления. Характеристики, приведенные на (рис. 84 г), являются аппроксимированными. Участки выпрямительного режима показаны сплошной линией, а инверторного – штриховой. Если

преобразователь все время работает в режиме непрерывного тока, то на РХПСУ наблюдается гистерезис, если он переходит в прерывистый режим, то возникает люфт. То есть, в зависимости от режимов преобразователь может быть представлен нелинейностью типа люфт или гистерезис.

Пример построения регулировочной характеристики системы управления по значениям α_0 и $\Delta\alpha/\Delta U_{упр}$ для рассматриваемого домашнего задания, представлен на рис. 86. Углы α_{max} и α_{min} определяются при выполнении пункта е).

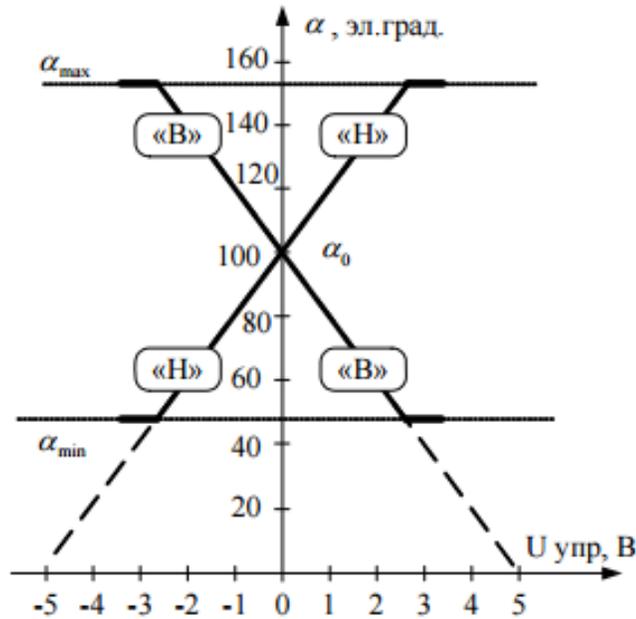


Рис. 86. Пример регулировочной характеристики системы управления реверсивного преобразователя

г) рассчитать и построить внешние характеристики реверсивного преобразователя $U_d = f(I_d)$ в абсолютных единицах для углов управления α_1 (выпрямительный режим комплектов вентилях «Вперед» и «Назад») и α_2 (инверторный режим комплектов вентилях «Вперед» и «Назад»). Расчет выполнить по формуле (1);

д) рассчитать и построить ограничительные характеристики реверсивного преобразователя для заданного варианта. При расчете воспользоваться формулой

$$U_{dmaxe} = -U_{d0} \cdot \cos \delta_{min} - a \cdot U_{T(T0)} + \left[\frac{x_a}{(2\pi/m)} - a \cdot (r_a + r_T) \right] \cdot I_{de}, \quad (13)$$

$$U_{dmaxи} = -U_{dmaxe}, \text{ при } I_{dи} = -I_{de};$$

е) определить максимально допустимый угол α_{max} и нанести ограничения на регулировочные характеристики, построенные в п.п. 1 б, в.

$$\alpha_{max} = \arccos \left(\frac{2 \cdot x_a \cdot I_d}{\sqrt{6} \cdot E_2} - \cos \delta_{min} \right). \quad (14)$$

Определить по регулировочным характеристикам преобразователя соответствующий угол α_{min} , чтобы максимальное напряжение в выпрямительном режиме было не больше, чем в инверторном. Нанесите эти ограничения на регулировочные характеристики.

Программа исследования двухкомплектного реверсивного преобразователя

1. Исследование электромагнитных процессов и внешних характеристик реверсивного преобразователя

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС при работе комплекта «Вперед» и комплекта «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах.

1.3. Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС.

1.4. Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной нагрузке.

2. Исследование регулировочных характеристик реверсивного преобразователя

2.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

2.2. Снятие регулировочных характеристики при различных токах и различных видах нагрузки и выбор угла α_0 для остановки двигателя и согласования характеристик.

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. Исследование электромагнитных процессов и внешних характеристик реверсивного преобразователя.

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) запустить программу «MatLab»;

б) открыть файл «rev_preobr_wh.mdl». После открытия на экране появится виртуальная модель двухкомплектного преобразователя, представленная на рис. 80;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели реверсивного преобразователя.

В блоке Zadatchik alfa углы управления α_1 и α_2 комплектами «Вперед» и «Назад» задать (в соответствии с № варианта по данным табл. 3).

В блоке Zadatchik Id задать выпрямленный ток Id (в соответствии с № варианта по данным табл. 3).

Ключ Switch установить в верхнее положение, подключив в схему блок Zadatchik Id.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в разделе 1);

б) снять осциллограмму мгновенных значений токов и напряжений для заданных углов управления α_1 и α_2 при работе комплекта «Вперед» и комплекта «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах.

На осциллограмме отметить участки работы комплектов в выпрямительном и инверторном режимах. Показать бестоковые паузы. Обратить внимание на участок переходного процесса при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС при переходе от комплекта к комплекту (от комплекта «Вперед» к комплекту «Назад»).

Полученные осциллограммы можно редактировать с помощью графической среды «Paint».

Во время моделирования при установлении тока нажимать на паузу и записывать показания с дисплея в табл. 2. Объяснить соотношение U_d и E_d .

Таблица 2

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметр	комплект «Вперед» (выпрямительный режим)	комплект «Вперед» (инверторный режим)	комплект «Назад» (выпрямительный режим)	комплект «Назад» (инверторный режим)
α				
U_d				
I_d				
E_d				

1.3. Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС.

Ключ Switch установить в нижнее положение, подключив в схему блок ZADATCHIK Id.

а) запустить модель и снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$.

По окончании расчета с помощью клавиши «Print Screen» и редактора «Paint» сохранить и обработать изображения полученных внешних характеристик в созданной ранее папке.

1.4. Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной нагрузке.

В блоке EDS установить вид нагрузки «0» – без противо-ЭДС.

В блоке реактор (L) изменять величину активного сопротивления нагрузки R:

– первая точка – установить $R_d = U_d/I_d$ (значение U_d взять из табл. 1, для комплекта «Вперед» (выпрямительный режим); значение I_d выбрать в соответствии с № варианта по данным табл. 3).

– вторая точка установить $R_d^* = R_d \cdot 2$.

– третья точка установить $R_d^{**} = R_d \cdot 10$.

На полученных в (п.п. 1.3 а) внешних характеристиках нанести снятые по точкам внешние характеристики при R-L нагрузке для комплекта «Вперед» и

«Назад». Обратить внимание, в каких квадрантах находятся внешние характеристики для комплекта «Вперед» и «Назад».

На построенные экспериментально внешние характеристики (по п.п. 1.3 и 1.4) нанести построенные дома (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 3).

Сравнить внешние характеристики, полученные экспериментальным путем и построенные дома (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 3).

2. Исследование регулировочных характеристик реверсивного преобразователя.

2.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

а) открыть файл «rev_preobr_vh.mdl». В блоке *Zadatchik Idconst* задать выпрямленный ток *Id* (в соответствии с № варианта по данным табл. 3).

2.2. Снятие регулировочных характеристики при различных токах и различных видах нагрузки, и выбор угла α_0 для остановки двигателя и согласования характеристик.

а) запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику в непрерывном режиме при токе *Id* при работе преобразователя на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС.

б) снять регулировочную характеристику в прерывистом режиме при токе *Id1*. В блоке *Zadatchik Idconst* задать выпрямленный ток $Id1 = 0,05$ А.

Запустить расчет модели.

в) выбрать угол α_0 для остановки двигателя и согласования характеристик. По регулировочной характеристике, снятой при малом токе (п.п. 2.2 б), найти при каком угле управления α напряжение *Ud* близко к нулю.

Записать полученное значение угла α_0 и отметить эту точку на регулировочной характеристике.

г) снять регулировочную характеристику при активно-индуктивной нагрузке.

В блоке *EDS* установить параметр в «0», что соответствует работе преобразователя на нагрузку без противо-ЭДС.

В блоке реактор (L) установить $R_d = U_d/I_d$ (значение U_d взять из табл. 1, для комплекта «Вперед» (выпрямительный режим); значение I_d выбрать в соответствии с № варианта по данным табл. 3).

Все регулировочные характеристики (по п.п. 2 и построенные дома, в соответствии с № задания из таблицы вариантов 3) подписать и расположить в одних осях (наложить друг на друга в графическом редакторе Paint).

Выбор варианта задания

Номер варианта определяется последними двумя цифрами зачетной книжки студента. Если количество предлагаемых вариантов меньше учебного шифра студента, то номер варианта определяется как разность уменьшаемого (шифра студента) и вычитаемого (числа предлагаемых вариантов в данном задании). Например, шифр студента – 67, а число вариантов в задании на лабораторную работу 1 – 50, тогда номер варианта равен: $67 - 50 = 17$.

Таблица 3

Таблица вариантов

№ варианта	№ задания	Угол управления α_0 , град	Выпрямленный ток $I_{dн}$, А	Угол управления α_1 , град
1, 26	А, Б	90	1,0	30
2, 27	А, Б	95	1,0	40
3, 28	А, Б	100	1,0	50
4, 29	А, Б	105	1,0	60
5, 30	А, Б	110	1,0	70
6, 31	А, В	90	0,9	30
7, 32	А, В	95	0,9	40
8, 33	А, В	100	0,9	50
9, 34	А, В	105	0,9	60
10, 35	А, В	110	0,9	70
11, 36	Б, А	90	1,0	30
12, 37	Б, А	95	1,0	40

Продолжение таблицы 3

13, 38	Б, А	100	1,0	50
14, 39	Б, А	105	1,0	60
15, 40	Б, А	110	1,0	70
16, 41	Б, В	90	0,9	30
17, 42	Б, В	95	0,9	40
18, 43	Б, В	100	0,9	50
19, 44	Б, В	105	0,9	60
20, 45	Б, В	110	0,9	70
21, 46	В, Б	90	1,0	30
22, 47	В, Б	95	1,0	40
23, 48	В, Б	100	1,0	50
24, 49	В, Б	105	1,0	60
25, 50	В, Б	110	1,0	70

Примечания:

1. Студенты, получившие № задания А, выполняют пункты а), в) и е); № задания Б – пункты а), г) и д); № задания В – пункты а), б) и е).

2. При расчете принимать $U_1 = 220$ В; $U_2 = 48$ В; $x_a = 4,71$ Ом; $r_a = 1,65$ Ом; $x_d = \infty$; $U_T(T_0) = 0,8$ В; $r_T = 0,2$ Ом; $\delta_{\min} = 15^\circ$; $\alpha_2 = 2 \cdot \alpha_0 - \alpha_1$.

3. Регулировочная характеристика СИФУ линейная; Угол наклона характеристики $\Delta\alpha/\Delta U_{\text{упр}} = 20$ град/В (см. рис. 86).

4. Условия согласования $\alpha_0 = (\alpha_v + \alpha_n)/2$.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные (в соответствии с № варианта из таблицы вариантов 3).
4. Предварительное домашнее задание (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 3).

5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования двухкомплектного реверсивного преобразователя.

6. Осциллограмму мгновенных значений токов и напряжений для заданных углов управления α_1 и α_2 при работе комплекта «Вперед» и комплекта «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах. На осциллограмме отметить участки работы комплектов в выпрямительном и инверторном режимах. Показать бестоковые паузы. Обратить внимание на участок переходного процесса при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС при перехода от комплекта к комплекту (от комплекта «Вперед» к комплекту «Назад»).

Сделать выводы о знаках напряжения и направлении тока в выпрямительном и инверторном режимах для комплектов «Вперед» и «Назад». Объяснить соотношение U_d и E_d .

7. Внешние характеристики преобразователя:

- а) при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС;
- б) при активно-индуктивной нагрузке.
- в) расчетные для своего подварианта.

8. Регулировочные характеристики реверсивного преобразователя:

- а) при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС в непрерывном режиме;
- б) при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС в прерывистом режиме;

Обосновать выбор угла α_0 для остановки двигателя и согласования характеристик в) при активно-индуктивной нагрузке

- г) расчетные (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 3).

Сделать выводы об особенностях регулировочных характеристик при различных токах и различных видах нагрузки.

9. Обобщающие выводы.

По осциллограммам и результатам измерений сравнить работу комплектов «Вперед» и «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах.

По осциллограммам и результатам измерений определить, на что влияет характер нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Почему в реверсивном преобразователе предусматривается два комплекта вентиляей?
2. В чем отличие совместного и отдельного управления?
3. Какие отличительные признаки силовых схем при отдельном и совместном управлении?
4. Чем отличаются системы управления при совместном и отдельном управлении?
5. Как располагаются внешние характеристики при различных способах согласования?
6. Каков вид регулировочных характеристик реверсивного преобразователя при различных формах опорных напряжений СИФУ и различных способах согласования?
7. Почему применяют нелинейное согласование характеристик?
8. Почему при отдельном управлении при $U_{вх} = 0$ угол управления α_0 должен быть больше 90° ?
9. Для чего вводятся ограничения в регулировочной характеристике системы управления и в регулировочной характеристике всего преобразователя вместе с системой управления?
10. Как снимаются регулировочные и внешние характеристики реверсивного преобразователя?

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучение электромагнитных процессов и характеристик понижающего и повышающего преобразователя постоянного напряжения (ППН).

Схема понижающего преобразователя постоянного напряжения изображена на рис. 87.

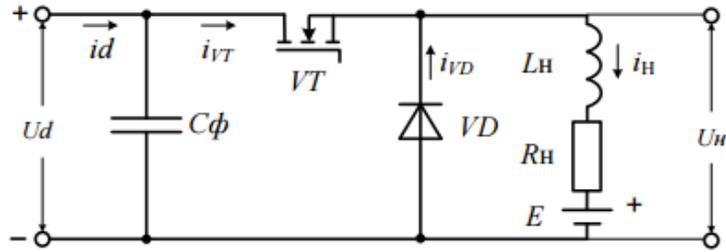


Рис. 87. Принципиальная схема понижающего преобразователя постоянного напряжения

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 88.

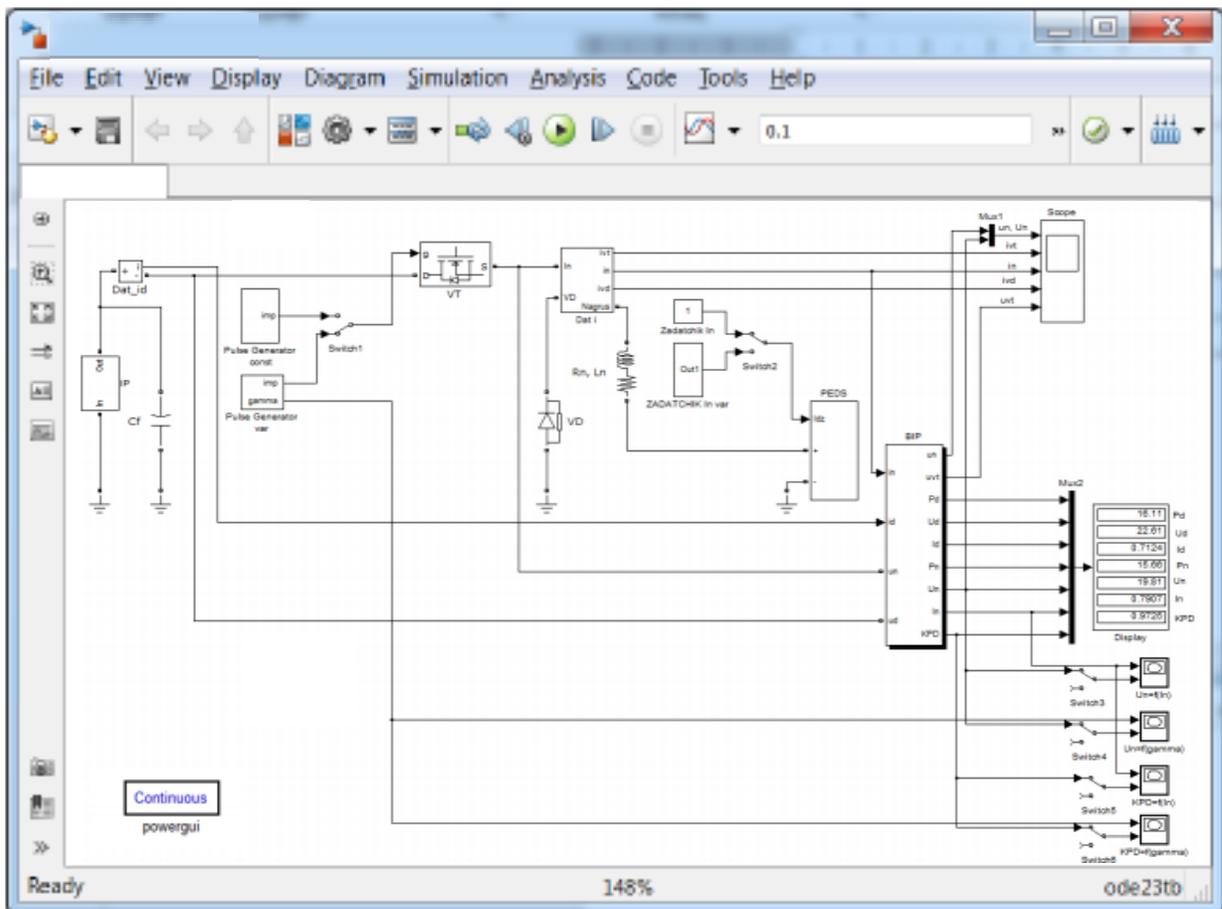


Рис. 88. Виртуальная модель понижающего преобразователя постоянного напряжения

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник питания (IP), конденсатор (Cf), транзистор (Mosfet), генераторы импульсов

(Pulse Generator const, Pulse Generator var), датчики тока (Dat_id, Dat i), диод (VD), датчик тока In (Zadatchik In, Zadatchik In var), нагрузка (Rn, Ln), блок ПЭДС (PEDS), блок измерительных преобразователей (BIP), мультиплексоры (Mux, Mux1, Mux2), осциллограф (Scope), дисплей (Display), переключатели (Switch1, Switch2, Switch3, Switch4, Switch5, Switch6), графопостроители ($U_n = f(I_n)$, $U_n = f(\gamma)$, $KPD = f(I_n)$, $KPD = f(\gamma)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник питания (IP). Изменяемые параметры блока:

- ЭДС E установить в соответствии с заданным вариантом;
- внутреннее сопротивление $R_{ip} = 2 \text{ Ом}$.

2) конденсатор (C_f) уменьшает потери в источнике питания, делая потребление энергии от него более постоянным, и устраняет перенапряжения при выключении транзистора, возникающие из-за индуктивности соединительных проводов в цепи источника питания (установить $C_f = 100 \text{ мкФ}$);

3) транзистор (VT) – блок, имитирующий работу полевого транзистора.

Изменяемые параметры блока:

- дифференциальное сопротивление транзистора во включенном состоянии R_{on} (установить $0,5 \text{ Ом}$);
- индуктивность транзистора во включенном состоянии L_{on} (установить $0,1 \text{ мкГн}$);
- внутреннее сопротивление диода R_d (установить $0,5 \text{ Ом}$);
- демпфирующая цепь – $R_s = 15 \text{ Ом}$, $C_s = 0,003 \text{ мкФ}$.

4) генератор импульсов (Pulse Generator const) – блок, формирующий импульсы управления транзистором с постоянной относительная длительность управляющего импульса (скважностью) γ .

Основные параметры блока Pulse Generator const:

- частота управляющих импульсов (Frequency) – задать 10000 Гц ;
- скважность γ (The relative time of the pulse (gamma)) – скважность – задать в соответствии с предварительным расчетом.

5) генератор импульсов (Pulse Generator var) – блок, формирующий импульсы управления транзистором со скважностью изменяемой от 0 до 1.

Основные параметры блока Pulse Generator var:

- частота управляющих импульсов (Frequency) – задать 10000 Гц;
- время моделирования (Modelling time T, с) – задать 0,003 с.

6) датчики тока (Dat_id, Dat i) – позволяют осциллографировать токи, протекающие в схеме.

Dat_id – ток, потребляемый от источника питания;

Dat i – токи, протекающие через транзистор ivt, нагрузку in и диод ivd.

7) диод (VD) – электронный блок, имитирующий работу диода.

Основные параметры блока:

- дифференциальное сопротивление диода во включенном состоянии (R_{on}) – установить 0,5 Ом;
- индуктивность диода во включенном состоянии L_{on} (установить 0 Гн);
- пороговое напряжение (U_f) – установить 0,8 В;
- демпфирующая цепь – установить $R_s = 10^4$ Ом, $C_s = inf$, что имитирует обратное сопротивление диода.

8) задатчики тока ИН (Zadatchik In, ZADATCHIK In var) – блоки задания по току нагрузки ИН для блока против-ЭДС (PEDS).

Блок Zadatchik In позволяет задавать фиксированное значение тока нагрузки In – установить по варианту $I_H = U_H/R_H$;

Блок ZADATCHIK In var позволяет задавать ток нагрузки, изменяющийся во времени от 0 до максимальной заданной величины I_{nmax} и предназначен для построения внешних характеристик.

Параметры блока:

Время моделирования (Modeling time, с) – установить 0,003 с;

максимальный ток – установить $I_{nmax} = 1,4$ А.

9) нагрузка (R_n, L_n).

Параметры блока:

- активное сопротивление R_n задать (в соответствии с № варианта по данным табл. 4);
- величину индуктивности L_n задать равной 2 мГн;

- величина емкости $C_n = inf$, что имитирует перемычку в схеме;
- 10) блок ПЭДС (PEDS) – блок, имитирующий работу противо-ЭДС.

Параметры блока:

Вид нагрузки «1» соответствует введению в схему противо-ЭДС;

Вид нагрузки «0» соответствует работе без противо-ЭДС.

Частота управляющих импульсов (Frequency) – задать 10000 Гц.

11) блок измерительных преобразователей (VIP) – блок позволяющий измерять:

- мгновенное значение напряжения на нагрузке (u_n);
- мгновенное значение напряжения на транзисторе (u_{vt});
- мощность на входе ППН (P_d);
- постоянное напряжение на входе ППН (U_d);
- среднее значение тока на входе ППН (I_d);
- мощность на выходе ППН (P_n);
- среднее значение напряжения на нагрузке (U_n);
- среднее значение тока нагрузки (I_n);
- КПД ППН (KPD).

Изменяемые параметры блока VIP:

- частота управляющих импульсов (Frequency) – задать 10000 Гц;
- время моделирования (Modeling time, c) установить 0,003 c

12) мультиплексоры (Mux1, Mux2) – блоки, служащие для подачи на один вход осциллографа или дисплея нескольких сигналов.

13) осциллограф (Scope) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы токов и напряжений, снимаемых со всех датчиков и блока VIP:

- мгновенное и среднее значение напряжения на нагрузке (u_n , U_n);
- мгновенное значение тока на входе ППН (i_d) и тока, протекающего через транзистор (i_d , i_{vt});
- мгновенное значение тока нагрузки (i_n);
- мгновенное значение тока протекающего через диод (i_{vd});
- мгновенное значение напряжения на транзисторе u_{vt} .

14) дисплей (Display) – блок, служащий для регистрации измеренных величин с блока VIP.

15) переключатели (Switch1, Switch2, Switch3, Switch4, Switch5, Switch6) – блоки, предназначенные для переключения между блоками Pulse Generator const и Pulse Generator var (Switch1), Zadatchik In и ZADATCHIK In var (Switch2), а также введения в схему графопостроителей $U_n = f(I_n)$ (Switch3), $U_n = f(\gamma)$ (Switch4), $KPD = f(I_n)$ (Switch5), $KPD = f(\gamma)$ (Switch6);

16) графопостроители ($U_n = f(I_n)$, $U_n = f(\gamma)$, $KPD = f(I_n)$, $KPD = f(\gamma)$) – блоки, предназначенные для построения внешней $U_H = f(I_H)$, регулировочной $U_H = f(\gamma)$ и энергетических $\eta = f(I_H)$, $\eta = f(\gamma)$ характеристик в автоматическом режиме.

Схема повышающего преобразователя постоянного напряжения изображена на рис. 89.

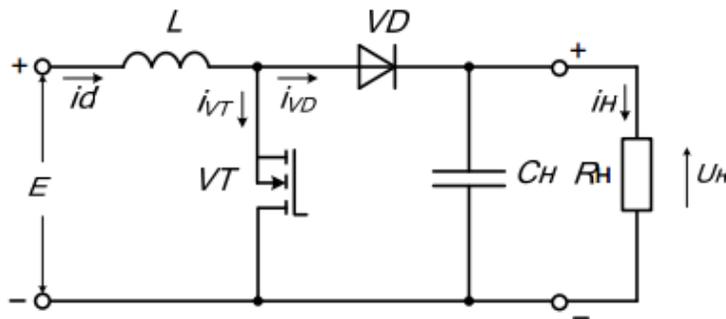


Рис. 89. Принципиальная схема повышающего преобразователя постоянного напряжения

Соответствующая виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 90.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник питания (IP), дроссель (L), транзистор (VT), генераторы импульсов (Pulse Generator const, Pulse Generator var), датчики тока (Dat_id, Dat_ivt, Dat_in, Dat_ivd), датчики напряжения (Dat_ud, Dat_uvt, Dat_un), диод (VD), активная нагрузка (Rn), конденсатор (Cn), блок измерительных преобразователей (BIP), осциллограф (Scope), мультиплексоры (Mux1, Mux2), дисплей (Display), графопостроители ($U_n = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

- 1) источник питания (IP).

Изменяемые параметры блока:

- ЭДС E установить в соответствии с заданным вариантом;
- внутреннее сопротивление $R_{ip} = 2 \text{ Ом}$.

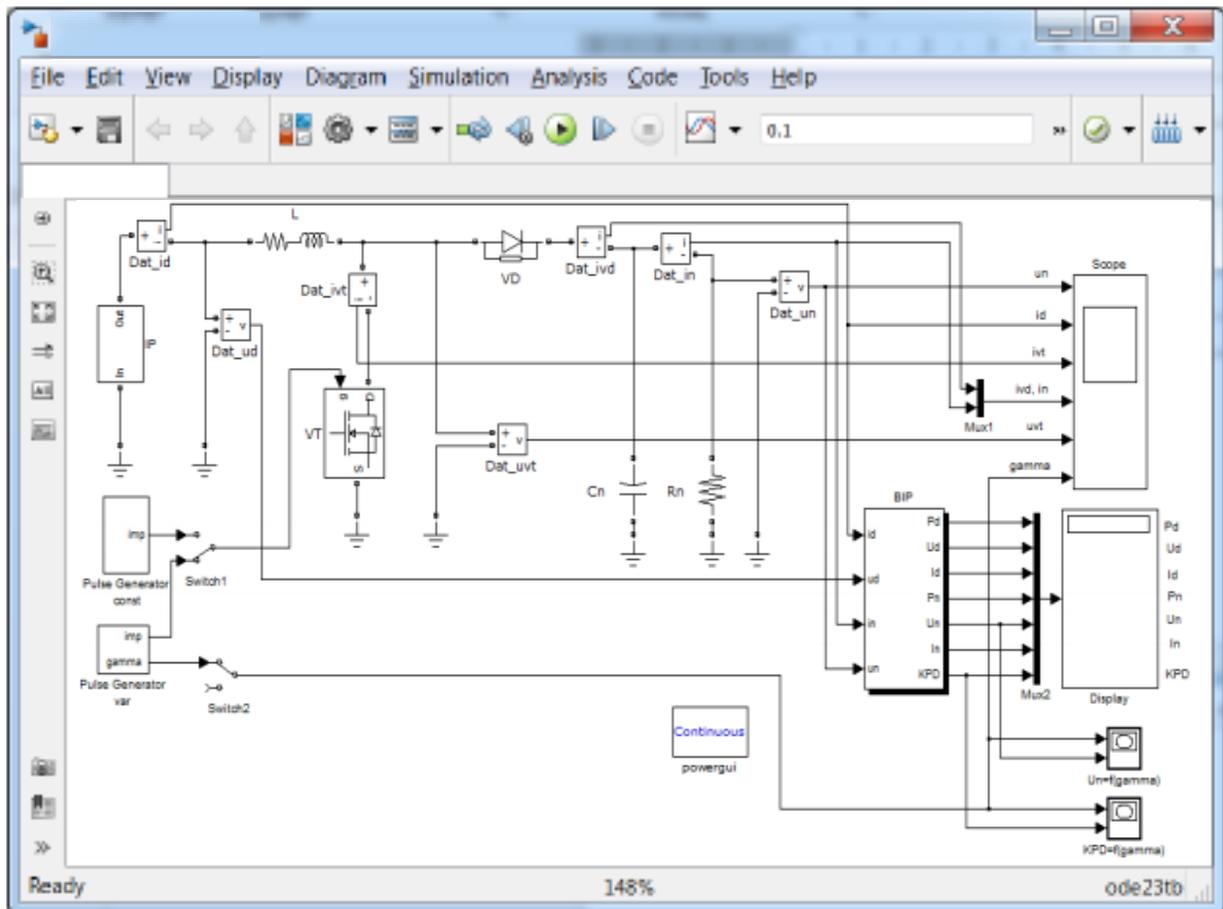


Рис. 90. Виртуальная модель повышающего преобразователя постоянного напряжения

2) дроссель (L). Параметры блока:

- активное сопротивление $R = 4 \text{ Ом}$;
- величина индуктивности $L = 20 \text{ мГн}$.

3) транзистор (VT) – блок, имитирующий работу полевого транзистора.

Изменяемые параметры блока:

- дифференциальное сопротивление транзистора во включенном состоянии R_{on} (установить $0,5 \text{ Ом}$);
- индуктивность транзистора во включенном состоянии L_{on} (установить $0,1 \text{ мкГн}$);

- внутреннее сопротивление диода R_d (установить 0,5 Ом);
- демпфирующая цепь – $R_s = 15$ Ом, $C_s = 0,003$ мкФ.

4) генератор импульсов (Pulse Generator var) – блок, формирующий импульсы управления транзистором со скважностью изменяющейся от 0 до 0,96.

Основные параметры блока Pulse Generator var:

- частота управляющих импульсов (Frequency) – задать 10000 Гц;
- время моделирования (Modelling time T, с) – задать 0,02 с.

5) генератор импульсов (Pulse Generator const) – блок, формирующий импульсы управления транзистором с постоянной относительная длительность управляющего импульса (скважностью) γ .

Основные параметры блока Pulse Generator const:

- частота управляющих импульсов (Frequency) – задать 10000 Гц;
- скважность γ (The relative time of the pulse (gamma)) – скважность – задать в соответствии с результатами расчетов выполненных в п. Предварительное домашнее задание.

6) датчики тока (Dat_id, Dat_ivt, Dat_ivd, Dat_in) – позволяют осциллографировать токи, протекающие в схеме.

Dat_id – ток, потребляемый от источника питания;

Dat ivt – ток, протекающий через транзистор.

Dat_ivd – ток протекающий через диод.

Dat_in – ток нагрузки.

7) датчики напряжения (Dat_ud, Dat_uvt, Dat_un) – позволяют измерять напряжение в схеме.

Dat_ud – напряжение источника питания;

Dat_uvt – напряжение на транзисторе;

Dat_un – напряжение на нагрузке.

8) диод (VD) – электронный блок, имитирующий работу диода.

Основные параметры блока:

- дифференциальное сопротивление диода во включенном состоянии (R_{on}) – установить 0,5 Ом;
- индуктивность диода во включенном состоянии L_{on} (установить 0 Гн);

- пороговое напряжение (U_f) – установить 0,8 В;
- демпфирующая цепь – установить $R_s = 10^4$ Ом, $C_s = 0,01$ мкФ, уменьшает перенапряжение.

9) активная нагрузка (R_n). Параметры блока:

- активное сопротивление R_n задать (в соответствии с № варианта по данным табл. 4).

10) фильтр (C_n). Емкость фильтра задать (в соответствии с № варианта по данным табл. 4).

11) блок измерительных преобразователей (VIP) – блок позволяющий измерять:

- мощность на входе ППН (P_d);
- постоянное напряжение на входе ППН (U_d)
- среднее значение тока на входе ППН (I_d);
- мощность на выходе ППН (P_n);
- среднее значение напряжения на нагрузке (U_n);
- среднее значение тока нагрузки (I_n);
- КПД ППН (KPD).

Изменяемые параметры блока VIP:

- частота управляющих импульсов (Frequency) – задать 10000 Гц;

12) осциллограф (Scope) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы токов и напряжений, снимаемых с датчиков:

- мгновенное значение напряжения на нагрузке (u_n);
- мгновенное значение тока на входе ППН и тока, протекающего через транзистор (i_d , i_{vt});
- мгновенное значение тока протекающего через диод (i_{vd}) и тока нагрузки (i_n);
- мгновенное значение напряжения на транзисторе i_{vt} .
- скважность γ (gamma).

13) мультиплексоры (Mux1, Mux2) – блоки, служащие для подачи на один вход осциллографа или дисплея нескольких сигналов.

14) дисплей (Display) – блок, служащий для регистрации измеренных величин с блока VIP.

15) графопостроители ($U_H = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$) – блоки, предназначенные для построения регулировочной $U_H = f(\gamma)$ и энергетической $\eta = f(\gamma)$ характеристик в автоматическом режиме.

Предварительное домашнее задание

а) Изучить и повторить темы курса: «Ключевой режим работы транзисторов», «Преобразователи постоянного напряжения», содержание данной работы и быть готовым ответить на контрольные вопросы. Подготовить формы с таблицами (см. табл. 1, табл. 2, табл. 3) для занесения в них экспериментальных данных. Занести данные предварительного расчета в табл. 1;

б) для понижающего преобразователя постоянного напряжения рассчитать и построить регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ при заданной (в соответствии с № варианта по данным табл. 4) ЭДС источника питания E (при допущении идеальности источника питания и элементов ППН).

$$U_H = \gamma E, \quad (1)$$

где γ – относительная длительность включенного состояния транзистора;

в) определить коэффициент γ , соответствующий заданным значениям U_H и E , а также среднее значение тока нагрузки I_H при сопротивлении нагрузки R_H

$$I_H = \frac{U_H}{R_H}. \quad (2)$$

Результаты расчета (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4) занести в табл. 1;

г) определить граничный ток для заданных значений ЭДС источника питания E , скважности γ и несущей частоты f

$$I_{H.гр} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{L_H f}, \quad (3)$$

где L_H – индуктивность нагрузки. Результаты расчета своего подварианта (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4) занести в табл. 1;

д) определить коэффициент пульсаций тока нагрузки q_i для заданных значений ЭДС источника питания E , тока нагрузки I_H , скважности γ и несущей частоты f

$$q_i = \frac{\Delta I_H}{2I_H} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{2L_H f I_H} \quad (4)$$

Результаты расчета своего подварианта (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4) занести в табл. 1;

е) построить в масштабе диаграммы напряжений на нагрузке i_H и на ключе i_K , а также токов через ключ i_K , нагрузку i_H и через диод i_{VD} при заданных значениях E , U_H , R_H и f . Для упрощения принять, что ток нагрузки нарастает и спадает по линейному закону, а падение напряжения на транзисторе V_T и диоде VD равно нулю;

ж) определить минимальное значение напряжения питания E_{min} , при котором еще может обеспечиваться заданное значение U_H , если падение напряжения на транзисторе V_T равно нулю, а источник питания идеален.

Результаты расчета своего подварианта (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4) занести в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты предварительных расчетов и измерений
для понижающего ППН**

Параметр	Предварительный расчет	Эксперимент	
		Нагрузка RL	Нагрузка RL + противо-ЭДС
P_d			
E			
I_d			
R_H			
U_H			
I_H			
η			
γ			
$I_{Hгр}$			
q_i			
E_{min}			

Программа исследования схем ППН

1. Исследование модели понижающего ППН с активно-индуктивной и активно-индуктивной с противо-ЭДС нагрузкой.

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме при активно-индуктивной нагрузке. Определение коэффициента пульсаций.

1.3. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС и заданном токе нагрузки. Определение коэффициента пульсаций.

1.4. Построение внешних характеристик и зависимостей КПД от тока нагрузки при различной скважности. Определение граничного тока.

1.5. Построение регулировочных характеристик и зависимости КПД от скважности при разных токах нагрузки.

1.6. Определение минимального напряжения на входе для обеспечения заданного напряжения на выходе при активно-индуктивной нагрузке.

2 Исследование модели повышающего ППН.

2.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме и при изменении емкости фильтра.

2.3. Построение регулировочных характеристик и зависимостей КПД от скважности при разных сопротивлениях нагрузки. 2.4. Построение внешних характеристик и зависимостей КПД от тока нагрузки при разных скважностях (по точкам).

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. *Исследование модели понижающего ППН с активно-индуктивной и активно-индуктивной с противо-ЭДС нагрузкой.*

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

а) запустить программу «MatLab»;

б) открыть файл «rpn_rop». После открытия на экране появится модель понижающего преобразователя постоянного напряжения, представленная на рис. 88;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели и (№ задания из таблицы вариантов 4).

Переключатели Switch1 и Switch2 установить в верхнее положение, при этом в схему введены блоки Pulse Generator const и Zadatchik In.

В блоке PEDS установить противо-ЭДС равное 0, что соответствует активно-индуктивной нагрузке.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме при активно-индуктивной нагрузке. Определение коэффициента пульсаций.

а) запустить расчет модели.

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке.

По осциллограммам и по формуле (4) определить коэффициент пульсаций тока q_i , записать в табл. 1.

Записать показания измерительных приборов (в табл. 1) и сравнить их с расчетными. Полученное значение тока I_H считать заданным для последующих опытов (ИЗ).

1.3. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС и заданном токе нагрузки ИЗ. Определение коэффициента пульсаций.

а) в блоке PEDS установить противо-ЭДС равное 1, что соответствует активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС.

В нагрузке установить $R_H^* = 0,1 \cdot R_H$.

В блоке Zadatchik In установить ток нагрузки I_H равный току ИЗ, полученному при активно-индуктивной нагрузке.

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

По осциллограммам и по формуле (4) определить коэффициент пульсаций тока q_i , записать в табл. 1.

Записать показания измерительных приборов (в табл. 1) и сравнить их с результатами предыдущего опыта (по п.п. 1.2).

1.4. Построение внешних характеристик и зависимостей КПД от тока нагрузки при различной скважности. Определение граничного тока.

а) снять внешнюю характеристику $U_H = f(I_H)$ и зависимость КПД от тока нагрузки $\eta = f(I_H)$ для понижающего ППН при скважности γ , определенной в соответствии с предварительным расчетом.

Переключатель Switch2 установить в нижнее положение, что соответствует введению в схему блока ZADATCHIK In var.

Переключатели Switch3 и Switch5 установить в верхнее положение, что соответствует введению в схему графопостроителей $U_H = f(I_H)$ и $KPD = f(I_H)$;

В нагрузке установить $R_H^* = 0,1 \cdot R_H$.

Запустить расчет модели и снять внешнюю характеристику $U_H = f(I_H)$ и зависимость $\eta = f(I_H)$.

По внешней характеристике определить граничный ток $I_{Hгр}$.

б) снять внешнюю характеристику $U_H = f(I_H)$ и зависимость КПД от тока нагрузки $\eta = f(I_H)$ при другой скважности;

В блоке Pulse Generator const задать $\gamma^* = 0,5 \cdot \gamma$.

Запустить расчет модели и снять внешнюю характеристику $U_H = f(I_H)$ и зависимость $\eta = f(I_H)$.

По внешней характеристике определить граничный ток $I_{Hгр}$. Внешние характеристики $U_H = f(I_H)$ (полученные в п.п. 1.4 а, б) подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе Paint. Аналогично обработать зависимости $\eta = f(I_H)$.

1.5. Построение регулировочных характеристик и зависимостей КПД от скважности при разных токах нагрузки.

а) снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при фиксированном токе нагрузки $I_{HЗ}$.

Переключатель Switch1 установить в нижнее положение, что соответствует введению в схему блока Pulse Generator var.

Переключатель Switch2 установить в верхнее положение, что соответствует введению в схему блока Zadatchik In.

В блоке Zadatchik In установить ток нагрузки $I_H = I_{H3}$.

Переключатели Switch3 и Switch5 установить в нижнее положение, отключив из схемы графопостроителей $U_H = f(I_H)$, $KPD = f(I_H)$.

Переключатели Switch4 и Switch6 установить в верхнее положение, что соответствует введению в схему графопостроителей $U_H = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$.

Запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$.

б) снять регулировочную $U_H = f(\gamma)$ характеристику и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при другом токе нагрузки I_H .

В блоке Zadatchik In задать ток нагрузки $I_H^* = I_{H3}/2$ (или другом, заданном преподавателем).

Обе регулировочные характеристики $U_H = f(\gamma)$ (полученные в п. 1.5 а, б) подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе Paint. Аналогично обработать зависимости $\eta = f(\gamma)$.

1.6. Определение минимального напряжения на входе E для обеспечения заданного на выходе U_H при заданной активно-индуктивной нагрузке.

С этой целью, задать максимальное $\gamma = 0.95$ и уменьшать значение E, контролировать по показаниям дисплея напряжение на нагрузке U_H .

2. Исследование модели повышающего ППН.

2.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

а) запустить программу «MatLab»;

б) открыть файл «ppn_rov». После открытия на экране появится модель понижающего преобразователя постоянного напряжения, представленная на рис. 90;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели.

Переключатель Switch1 установить в верхнее положение, при этом в схему введен блок Pulse Generator const.

Переключатель Switch2 установить в нижнее положение, отключив при этом графопостроители $U_n = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме и при изменении емкости фильтра.

а) запустить расчет модели;

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке.

По осциллограммам определить коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке q_u , записать в табл. 2.

$$q_u = \frac{\Delta U_n}{2U_n}$$

Записать показания измерительных приборов (в табл. 2).

Таблица 2

Результаты измерений для повышающего ППН

Параметр	Емкость фильтра	
	C	0,1·C
Pd		
Ud		
Id		
PH		
UH		
IH		
η		
q_u		

в) в блоке фильтр уменьшить емкость C в 10 раз.

Снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений и записать показания с дисплея в табл. 2 в соответствующий столбец. Сравнить результаты опытов по (п.п. 2.2, б) и (п.п. 2.2, в).

2.3. Построение регулировочных характеристик и зависимостей КПД от скважности γ .

а) снять регулировочную $U_H = f(\gamma)$ характеристику и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при заданных параметрах.

Переключатель Switch1 установить в нижнее положение, что соответствует введению в схему блока Pulse Generator var.

Переключатель Switch2 установить в верхнее положение, что соответствует введению в схему графопостроителей $U_H = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$.

Запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$.

б) снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при изменении параметров нагрузки.

В нагрузке задать $R_H = 3 R_n$.

Запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$.

в) снять регулировочную $U_H = f(\gamma)$ характеристику и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при изменении параметров дросселя.

В блоке L увеличить R в 3 раза при заданном R_n .

Запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$.

Все регулировочные подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе Paint. Аналогично обработать зависимости $\eta = f(\gamma)$.

2.4. Построение внешней характеристики и зависимости КПД в функции тока нагрузки.

Переключатель Switch1 установить в верхнее положение, при этом в схему введен блок Pulse Generator const.

Переключатель Switch2 установить в нижнее положение, отключив при этом графопостроители $U_H = f(I_H)$, $KPD = f(I_H)$.

Построение выполнить по точкам: не изменяя величину скважности ($\gamma = \text{const}$ задать в соответствии с № варианта по данным табл. 4) в блоке Pulse Generator const, изменять ток нагрузки за счет R_n . Построить характеристики $U_H = f(I_H)$ и $\eta = f(I_H)$ по трем точкам: $R = R_n$, $R = 2R_n$ Ом и $R = 3R_n$ Ом.

Значения токов, напряжений и мощностей записывать по показаниям дисплея в табл. 3. Для ускорения процесса выполнения опыта можно останавливать расчет модели, если показания на дисплее не изменяются.

Таблица 2

Данные для построения внешней и энергетической характеристик

Параметр	RH	2RH	3RH
UH			
IH			
η			

Выбор варианта задания

Номер варианта определяется последними двумя цифрами зачетной книжки студента. Если количество предлагаемых вариантов меньше учебного шифра студента, то номер варианта определяется как разность уменьшаемого (шифра студента) и вычитаемого (числа предлагаемых вариантов в данном задании). Например, шифр студента – 67, а число вариантов в задании на лабораторную работу 1 – 50, тогда номер варианта равен: $67 - 50 = 17$.

Таблица 4

Таблица вариантов

№ варианта	№ задания	ЭДС источника питания	Понижающий ППН		Повышающий ППН		
			Напряжение нагрузки	Активное сопротивление нагрузки	Активное сопротивление нагрузки	Емкость фильтра	Сквозность
		E, В	U _н , В	R _н , Ом	R _н , Ом	C _н , мкФ	γ
1, 26	А, Б	24	18	38	180	12	0,5
2, 27	А, Б	25	17	40	190	14	0,55
3, 28	А, Б	26	16	42	200	16	0,6
4, 29	А, Б	27	15	44	210	18	0,65
5, 30	А, Б	28	14	46	220	20	0,7

Продолжение таблицы 4

6, 31	А, В	24	18	38	180	12	0,5
7, 32	А, В	25	17	40	190	14	0,55
8, 33	А, В	26	16	42	200	16	0,6
9, 34	А, В	27	15	44	210	18	0,65
10, 35	А, В	28	14	46	220	20	0,7
11, 36	Б, А	24	18	38	180	12	0,5
12, 37	Б, А	25	17	40	190	14	0,55
13, 38	Б, А	26	16	42	200	16	0,6
14, 39	Б, А	27	15	44	210	18	0,65
15, 40	Б, А	28	14	46	220	20	0,7
16, 41	Б, В	24	18	38	180	12	0,5
17, 42	Б, В	25	17	40	190	14	0,55
18, 43	Б, В	26	16	42	200	16	0,6
19, 44	Б, В	27	15	44	210	18	0,65
20, 45	Б, В	28	14	46	220	20	0,7
21, 46	В, Б	24	18	38	180	12	0,5
22, 47	В, Б	25	17	40	190	14	0,55
23, 48	В, Б	26	16	42	200	16	0,6
24, 49	В, Б	27	15	44	210	18	0,65
25, 50	В, Б	28	14	46	220	20	0,7

Примечания:

1. Студенты, получившие № задания А, выполняют пункты 1а), б), в) и г); № задания Б – пункты а), в), д) и ж); № задания В – пункты а), в), д) и е).
2. Индуктивность нагрузки в понижающем ППН $L_n = 2$ мГн.
3. Несущая частота 10000 Гц.
4. При выполнении предварительного расчета принять, что все элементы идеальны.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4).
4. Предварительное домашнее задание (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4).
5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования (в соответствии с № задания из таблицы вариантов 4).
6. Осциллограммы для исследованных схем:
 - а) для активно-индуктивной нагрузки и активно-индуктивной нагрузки с противо-ЭДС в непрерывном режиме для понижающего ППН;
 - б) для повышающего ППН.
- Сделать выводы о влиянии вида нагрузки и режима на вид осциллограмм для понижающего ППН, а также о величине пульсаций.
- Сравнить расчетные значения токов и напряжений с полученными экспериментально.
7. Внешние характеристики и зависимости КПД от тока нагрузки для понижающего ППН. Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях. Определить граничные токи.

Выводы о влиянии скважности на внешние характеристики.
8. Регулировочные характеристики и зависимости КПД от скважности для понижающего ППН при двух значениях тока. Выводы о влиянии величины тока;
9. Определить минимальное напряжение на входе понижающего ППН для обеспечения заданного напряжения на выходе.
10. Внешние характеристики и зависимости КПД от тока нагрузки для повышающего ППН. Вывод об отличии внешних характеристик повышающего ППН от понижающего.
11. Регулировочные характеристики и зависимости КПД от скважности для повышающего ППН, построенные на одном графике. Выводы о влиянии сопротивления нагрузки и сопротивления дросселя. Объяснить вид полученных характеристик.

Контрольные вопросы

1. Сравните ключевой и линейный режимы работы транзистора.
2. Преимущества ключевого режима.
3. Каково назначение ППН?
4. Какие виды ППН вы знаете?
5. Зачем включается конденсатор на входе понижающего ППН?
6. Зачем включается индуктивность на входе повышающего ППН?
7. В чем сходство между трансформатором и ППН?
8. Что такое регулировочная характеристика преобразователя постоянного напряжения?
9. Каков вид регулировочных характеристик понижающих ППН?
10. Сравнить регулировочные характеристики понижающего и повышающего преобразователя постоянного напряжения.
11. Объяснить вид регулировочной характеристики повышающего преобразователя постоянного напряжения.
12. Что такое внешняя характеристика ППН?
13. От чего зависит наклон внешних характеристик понижающих ППН?
14. Как влияет внутреннее сопротивление источника питания на характеристики ППН?
15. От чего зависит КПД понижающего ППН?
16. На что влияет изменение несущей частоты?
17. Как определить коэффициенты пульсаций тока и напряжения на нагрузки?
18. Можно ли выполнить ППН на обычных тиристорах?

Литература

1. Алексеева И.Н. В помощь радиолюбителю: сборник, выпуск 109/ Алексеева И.Н. [и др.]. – М.: Патриот, 1991. – 80с.
2. Аналоговая и цифровая электроника: учебник для вузов / Опадчий Ю.Ф, Глудкин О.П.; под. ред. Глудкина О.П. – М.: Радио и связь. 1996. – 768с.
3. Арестов К.А. Основы электроники и микропроцессорной техники: учеб. для вузов/ К.А.Арестов – М.: Колос, 2001. – 216с.
4. Бодиловский. В.Г. Справочник молодого радиста/ Бодиловский В.Г. – 3-е изд. – М. : В.школа, 1976. – 351с.
5. Булычев А.Л. Электронные приборы: учеб. для вузов / А.Л. Булычев, П.М. Лачин, Е.С. Тулинов – М.: Лайт ЛТД, 2000. – 415 с.
6. Быстров Ю.А. Электронные цепи и микросхемотехника: Учебник для вузов / Быстров Ю.А.[и др.] – М.: Высш. школа, 2002. – 383 с
7. Гилмор И. Введение в микропроцессорную технику. – М.: Мир, 1984 г.
8. Горбачев Г.И., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: учеб. для вузов / Горбачев Г.И., Чаплыгин Е.Е – М.: Энергоатом-издат, 1988. – 315с.
9. Гусев В.Г. Электроника: учеб. пособие для вузов/ Гусев В.Г, Гусев Ю.М. – М.: Высшая школа, 1991. – 530с.
10. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов / Жаворонков М.А – М.: Academia, 2005. – 394 с.
11. Жеребцов И.П. Основы электроники: учеб. для техн. и вузов/ Жеребцов И.П. – 5-е изд. доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 352с.
12. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учеб. для вузов / Забродин Ю.С. – М.: Высшая школа, 1982. – 320с.
13. Евреинов Э.В. Цифровая вычислительная техника: учеб. для вузов / Евреинов Э.В. [и др.] – М.: Радио и связь, 1991. – 245с.
14. Лавриненко. В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам/ Лавриненко. В.Ю. – Киев.: Техника, 1980. – 459с.
15. Лачин В.И. Электроника: учеб. пособие /Лачин В.И. , Савёлов Н.С. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д.: Феникс, 2002. – 565с.

16. Лачин В.И. Электроника: учеб. пособие для вузов / Лачин В.И., Савёлов Н.С. – 5-е изд., пер. и доп. – Ростов н/Д.: Феникс, 2005 –483с.
13. Литвин В.И. Интегральные микросхемы: Учебное пособие для вузов / Литвин В.И. – М.: Высш. школа, 2003. –520с.
17. Полупроводниковые приборы. Справочник / Гитцевич А.Б. и др. Под ред. Голомедова А.В. – М.: Радио и связь, 1988. –528с.
18. Петленко Б.И. Электротехника и электроника: учеб. для сред. проф. образования / Петленко Б.И. [и др.]. под ред. Б.И. Петленко. – М.: Academia, 2004 –348с.
19. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов / Степаненко И.П. – М.: Высш. школа, 2001. –280с.
20. Смирнов Б.В. Основы электроники техники связи: учеб. для вузов / Смирнов Б.В. – М.: Колос, 1979. –360с.
21. Токхайм Р. Микропроцессоры: теория и упражнения / Токхайм Р. [и др.] – пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. –200с.
22. Федотов В.И. Основы электроники: учеб. пособие для вузов / Федотов В.И. – М.: В.школа, 1990. –310с.
23. Штанько Р.И. Электроника, микропроцессорные средства и техника связи: учеб. пособие / Штанько Р.И. – М.: Рос. гос. аграр. заочн. ун–т, 2002. –160с.
24. Штанько Р.И. Интегральные микросхемы: учебное пособие / Штанько Р.И. – М.: Рос. гос. аграр. заочн. ун–т, 2005 –210с.
25. Электроника: Энциклопедический словарь / Гл. ред. Колесников В.Г. – М.: Сов.энциклопедия. 1991. –688с.
26. Епифанов А.Д. Электроника: учебное пособие: в 2 кн. КН1 / А.Д. Епифанов, М.Ю. Бузунова, А.Г. Черных. – 2-е изд., испр. и доп. – Иркутск: Иркутск. гос. аграрный ун-т, 2015. – 240с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

		стр.
	Введение	3
РАЗДЕЛ 1 ПРИКЛАДНЫЕ ПАКЕТЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ		4
1.1	SIMULINK	4
	1.1.1 Система моделирования Simulink	4
	1.1.2 Состав библиотеки Simulink	5
	1.1.3 Создание, редактирование и запуск Simulink модели	12
1.2	SimPowerSystems	23
	1.2.1 Система моделирования SimPowerSystems	23
	1.2.2 Создание, редактирование и запуск модели SimPowerSystems	26
	1.2.3 Состав библиотек SimPowerSystems Specialized Technology	31
1.3	Библиотека Power Electronics пакета SimPowerSystems	46
	1.3.1 Блок Diode	46
	1.3.2 Блоки Thyristor и Detailed Thyristor	51
	1.3.3 Блоки GTO Thyristor	57
	1.3.4 Блоки IGBT Transistor	62
	1.3.5 Блок Mosfet Transistor	68
	1.3.6 Блок IGBT/Diode	72
	1.3.7 Блок Ideal Switch	74
	1.3.8 Блок Universal Bridge	77
РАЗДЕЛ 2 ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО СИЛОВЫМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ		86
2.1	КОМПЛЕКС ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	86
	Лабораторная работа №1 <i>ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ</i>	86
	• Цель работы	86

• Предварительное домашнее задание	93
• Программа исследования схем однофазных неуправляемых выпрямителей	96
• Экспериментальное исследование модели однополупериодного неуправляемого выпрямителя	96
• Экспериментальное исследование модели однофазного мостового неуправляемого выпрямителя	98
• Выбор варианта задания	99
• Рекомендации к оформлению отчета	100
• Контрольные вопросы	101
Лабораторная работа №2 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ	102
• Цель работы	102
• Предварительное домашнее задание	109
• Программа исследования схем однофазных управляемых выпрямителей	110
• Экспериментальное исследование модели однополупериодного управляемого выпрямителя	110
• Экспериментальное исследование модели однофазного управляемого мостового выпрямителя	112
• Выбор варианта задания	115
• Рекомендации к оформлению отчета	116
• Контрольные вопросы	117
Лабораторная работа №3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ	118
• Цель работы	118
• Предварительное домашнее задание	127
• Программа исследования схем трехфазных управляемых выпрямителей	130
• Экспериментальное исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной мостовой схеме	131
• Экспериментальное исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной нулевой схеме	134

	• Выбор варианта задания	137
	• Рекомендации к оформлению отчета	138
	• Контрольные вопросы	140
	Лабораторная работа №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКОМПЛЕКТНОГО РЕКУПЕРИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМАХ ВЫПРЯМЛЕНИЯ И ИНВЕРТИРОВАНИЯ	141
	• Цель работы	141
	• Предварительное домашнее задание	150
	• Программа исследования однокомплектного рекуперирующего преобразователя	152
	• Экспериментальное исследование модели однокомплектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования	153
	• Исследование влияния преобразователя на питающую сеть	157
	• Выбор варианта задания	159
	• Рекомендации к оформлению отчета	160
	• Контрольные вопросы	162
	Лабораторная работа №5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКОМПЛЕКТНОГО РЕВЕРСИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	163
	• Цель работы	163
	• Предварительное домашнее задание	168
	• Программа исследования двухкомплектного реверсивного преобразователя	178
	• Экспериментальное исследование электромагнитных процессов и внешних характеристик реверсивного преобразователя	179
	• Экспериментальное исследование регулировочных характеристик реверсивного преобразователя	181
	• Выбор варианта задания	182
	• Рекомендации к оформлению отчета	183
	• Контрольные вопросы	185

	Лабораторная работа №6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ	185
	• Цель работы	185
	• Предварительное домашнее задание	194
	• Программа исследования схем ППН	196
	• Экспериментальное исследование модели понижающего ППН с активно-индуктивной и активно-индуктивной с противо-ЭДС нагрузкой	196
	• Экспериментальное исследование модели повышающего ППН	199
	• Выбор варианта задания	202
	• Рекомендации к оформлению отчета	203
	• Контрольные вопросы	205
	Литература	206
	Оглавление	208

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Елифанов Александр Дмитриевич
Шпак Оксана Николаевна
Черных Алексей Георгиевич

ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие
КНИГА 2

Научный редактор – А.Г. Черных
Ответственный за выпуск – А.Г. Черных
Компьютерная верстка – Е.И. Черных

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Подписано в печать .10.11 г.

Усл.печ. л. Заказ №

Изд. №

Тираж 100 экз.

Издательство Иркутского государственного
аграрного университета имени А.А.Ежевского
664038, Иркутская обл., Иркутский р-н,
пос. Молодежный