

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

**В. Д. Семенов, Р. Г. Калинин, В. А. Кабиров,
К. А. Ахтырский, И. Е. Гедзенко**

ИМПУЛЬСНО-МОДУЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Методические указания
по выполнению курсового проекта для студентов
направления подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»,
профиль «Промышленная электроника и микропроцессорная техника»

Томск
2024

УДК 621.376
ББК 32.973.26-018.2.75
С30

Рецензент:

Легостаев Н. С., профессор кафедры промышленной электроники ТУСУР,
канд. техн. наук

Семенов, Валерий Дмитриевич

С30 Импульсно-модуляционные системы: методические указания по выполнению курсового проекта для студентов направления подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», профиль «Промышленная электроника и микропроцессорная техника» / В. Д. Семенов, Р. Г. Калинин, В. А. Кабиров, К. А. Ахтырский, И. Е. Гедзенко. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 47 с.

Методические указания предназначены для студентов магистерской подготовки направления «Электроника и наноэлектроника». В пособии сформулированы цели и задачи, охарактеризована тематика и изложены основные этапы выполнения курсового проекта, приведены правила оформления и порядок защиты. Рассмотрены примеры разработки, расчета и исследования импульсно-модуляционных систем на основе имитационных моделей стабилизированных транзисторных преобразователей параметров электрической энергии.

Одобрено на заседании каф. ПрЭ, протокол № 25 от 16.02.2024.

УДК 621.376
ББК 32.973.26-018.2.75

© Семенов В. Д., Калинин Р. Г., Кабиров В. А.,
Ахтырский К. А., Гедзенко И. Е., 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1 Общие положения	6
2 Тема курсового проекта	8
3 Руководство выполнением курсового проекта	9
4 Оформление, структура и содержание курсового проекта	10
5 Объем и требования к оформлению курсового проекта	13
6 Порядок проведения защиты курсового проекта	14
7 Разработка имитационной компьютерной модели импульсного преобразователя напряжения в среде MATLAB/SIMULINK для исследования его частотных характеристик	15
7.1 Начало работы в Matlab Simulink	15
7.2 Построение компьютерной модели импульсного преобразователя	18
7.2.1 Принцип работы импульсных преобразователей напряжения на примере преобразователя понижающего типа	18
7.2.2 Расчет основных элементов импульсного преобразователя напряжения понижающего типа	19
7.2.3 Построение компьютерной модели преобразователя без обратной связи и её исследование	21
7.3 Импульсный преобразователь напряжения понижающего типа с замкнутой обратной связью	28
7.3.1 Предварительные замечания к построению модели импульсного преобразователя с обратной связью	28
7.3.2 Разработка модели импульсного преобразователя с ШИМ и получение её частотных характеристик	28
7.3.3 Разработка структурной схемы, замкнутой САР на основе НПН понижающего типа	35
7.3.4 Компьютерная модель импульсного преобразователя с обратной связью и её исследование	36
8 Исследование транзисторного преобразователя с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) в среде MATLAB/SIMULINK	38
8.1 Теоретические сведения по транзисторным преобразователям с модулятором ШИМ-2	38
8.2 Структура ШИМ и функции ее основных элементов	39
8.3 Сведения, необходимые для построения имитационной модели неревверсивного модулятора ШИМ-2	40
8.4 Построение имитационной модели неревверсивного модулятора ШИМ-2 в среде моделирования MATLAB Simulink	42
8.5 Методика получения частотных характеристик разомкнутого объекта управления на основе понижающего преобразователя инструментальными средствами MATLAB	43
8.6 Задания на практические и самостоятельные занятия для изучения работы модулятора ШИМ-2	44
8.6.1 Задание № 1 на практические и самостоятельные занятия для изучения работы модулятора ШИМ-2 при постоянном входном сигнале $x(t) = X_0$	45

8.6.2 Задание № 2 на практические и самостоятельные занятия для изучения работы модулятора ШИМ-2 при входном сигнале равном сумме постоянной и переменной составляющей $x(t) = X_0 + \mu \cdot X_0 \cdot \sin(2\pi \cdot q \cdot (f_c/f_i) \cdot f_c \cdot t + \varphi_0)$	45
8.6.3 Задание № 3 на практические и самостоятельные занятия для изучения спектра выходного напряжения на входе и выходе фильтра (на примере понижающего преобразователя).....	45
8.6.4 Задание № 4 на практические и самостоятельные занятия для изучения методики снятия амплитудно-фазово-частотных характеристик (АФЧХ) по «точкам» (на примере понижающего преобразователя).....	45
8.6.5 Контрольные вопросы к заданиям на практические и самостоятельные занятия при изучении работы модулятора	46
Список использованных источников	47

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие предназначено для оказания методической помощи магистрантам кафедры «Промышленная электроника» при выполнении курсового проекта по интегрирующей профессиональной дисциплине «Импульсно модуляционные системы». Пособие призвано к введению магистрантов в увлекательный мир разработки, проектирования, моделирования и исследования импульсно-модуляционных систем (ИМС) предназначенных, в первую очередь, для преобразования параметров электрической энергии. В пособии сделана попытка посмотреть на источник питания (часто так, по-простому, называют эти импульсные устройства) как на сложную динамическую систему, обеспечивающую ответственную нагрузку электропитанием заданного качества, во всех режимах работы. Естественно, что по одному пособию научиться разрабатывать, проектировать, моделировать и исследовать систему «страшно», трудно и даже невозможно, но главное начать учиться это делать и не «бояться». Как размышлял римский император Марк Аврелий: «Препятствие к действию продвигает действие. То, что стоит на пути, становится путём». Так что преодоление препятствий в изучении ИМС станет вашим путем к профессионализму. Успехов на этом поприще.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Курсовой проект является завершающим этапом изучения дисциплины «Импульсно модуляционные системы» для магистрантов кафедры «Промышленная электроника». Студент, изучивший дисциплину «Импульсно модуляционные системы» (и предшествующие ей смежные дисциплины «Полупроводниковые ключи в силовых схемах», «Теория автоматического управления», «Энергетическая электроника», «Микропроцессорные системы и устройства» «Интеллектуальная собственность») и защитивший курсовой проект, должен обладать следующими компетенциями:

ПК-2. Способен делать научно-обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научные публикации и заявки на изобретения.

ПК-2.1. Знает основные методы проведения теоретических и экспериментальных исследований:

Студент должен знать основные методы проведения теоретических и экспериментальных исследований импульсно-модуляционных систем (ИМС) и их подсистем.

ПК-2.2. Умеет делать научно обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научные публикации и заявки на изобретения:

Студент должен уметь анализировать результаты теоретических и экспериментальных исследований ИМС и делать обоснованные выводы по оценке качества их работы и готовить публикации, предлагать варианты по модернизации и совершенствованию ИМС, в том числе новые патентоспособные, оформлять заявки на изобретения.

ПК-2.3. Владеет навыками подготовки научных публикаций и заявок на изобретения:

Студент должен владеть навыками написания и оформления научных публикаций и заявок на изобретения по результатам разработки и исследования ИМС и их основных подсистем.

ПК-3. Готов формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач.

ПК-3.1. Знает специфику методологии научных исследований в своей предметной области:

Студент должен знать, что специфика методологии научных исследований ИМС основана на методологии исследования линеаризованных нелинейных импульсных систем автоматического регулирования и проверке полученных результатов на адекватность с помощью современных средств имитационного моделирования.

ПК-3.2. Умеет осуществлять постановку целей и задач исследования:

Студент должен уметь осуществить постановку целей исследования ИМС в частотной и временной области, а также сформулировать необходимые задачи теоретических и экспериментальных исследований, решение которых приведет к достижению поставленных целей.

ПК-3.3. Владеет опытом системного анализа предмета исследования:

Студент должен владеть опытом применения системного анализа для разработки и исследования импульсно модуляционных систем и составляющих их звеньев в части представления таких систем, их моделирования, анализа и синтеза.

Курсовой проект имеет целью закрепить и расширить знания, получаемые студентами при изучении дисциплины «Импульсно модуляционные системы» и смежных дисциплин, а также привить навыки самостоятельной работы по расчету, проектированию и исследованию импульсных систем преобразования параметров электрической энергии.

Задачи выполнения курсового проекта:

- научиться разрабатывать ТЗ на проект.
- научиться разрабатывать функциональную схему ИМС и ее основные звенья, а также описывать ее работу с доказательствами, что она сможет удовлетворить всем требованиям ТЗ.
- научиться разрабатывать имитационные модели ИМС и проводить их исследование с целью подтверждения работоспособности и получения ожидаемых статических и динамических характеристик.
- углубить практические навыки по разработке схем электрических принципиальных в соответствии с нормативными требованиями ГОСТ....
- научиться публично защищать разработанный технический проект.
- научиться представлять результаты разработок и исследований в профессиональных научно-технических изданиях и на научно-технических конференциях.

2 ТЕМА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Тематика курсовых проектов в виде перечня тем курсовых проектов разрабатывается преподавателями, ведущими дисциплину «Импульсно модуляционные системы» утверждается заведующим кафедрой «Промышленная электроника». Темы курсовых проектов ежегодно пересматриваются и утверждаются.

Допускается выбирать тему курсового проекта в соответствии с опытом работы, интересами, возможностями и личными склонностями студента. По инициативе студента допускается замена темы курсового проекта, если предложенная студентом тема соответствует профилю дисциплины и специальности.

Темы курсовых проектов должны соответствовать рекомендуемой примерной тематике курсовых проектов в рабочих программах дисциплины «Импульсно модуляционные системы».

Тема курсового проекта может быть предложена студентом, работодателем, социальным партнером при условии обоснования им ее целесообразности.

Тема курсового проекта может быть связана с программой производственной или учебной практики студента.

Курсовой проект может стать составной частью (разделом, главой) выпускной квалификационной работы.

3 РУКОВОДСТВО ВЫПОЛНЕНИЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовая работа выполняется студентом самостоятельно под непосредственным контролем руководителя курсовой работы. Руководителем курсовой работы, как правило, является ведущий преподаватель, читающий курс «Импульсно модуляционные системы», который:

- составляет и выдаёт задание на курсовую работу;
- организует процесс выполнения работы;
- рекомендует необходимую литературу, нормативную документацию, справочные и другие материалы;
- осуществляет текущий контроль выполнения задания;
- информирует кафедру о ходе выполнения курсовой работы.

4 ОФОРМЛЕНИЕ, СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Оформление курсовой работы выполняется в соответствии с Положением по организации выполнения и защиты курсовых работ и курсовых проектов в ТУСУРе, далее Положение.

Данное Положение можно найти на сайте ТУСУР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://regulations.tusur.ru/documents/1244>, свободный (дата обращения: 26.05.2024).

Курсовая работа должна включать следующие структурные элементы:

- титульный лист;
- задание;
- содержание;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения (при необходимости).

Титульный лист курсового проекта оформляется в соответствии с Приложением Б, Положения.

Задание на курсовой проект выдается студентам, согласно графику учебного процесса, в виде технических требований, которые оформляется в соответствии с приложением Г, Положения.

Содержание курсовой работы состоит из последовательно перечисленных глав, параграфов и других структурных элементов работы с указанием номера страницы, на которой они помещены.

Во введении к работе дается **характеристика актуальности** решаемой задачи, обосновывается необходимость этой работы, ее **практическая значимость**. Далее следует указать **цель курсовой работы**, а также **задачи**, которые необходимо решить для достижения указанной цели. Обязательным элементом введения является формулировка объекта и предмета исследования.

Объектом исследования является импульсно-модуляционная система или конкретный импульсный преобразователь, разрабатываемые и исследуемые в курсовом проекте.

Предметом исследования могут выступать: структура, схемы, модели, характеристики и показатели импульсно-модуляционной системы или конкретного импульсного преобразователя, который разрабатывается и исследуется в курсовом проекте. Во введении необходимо указать **теоретическую базу разработки, проектирования и исследования**, которая является основным инструментом получения фактического материала в результате выполнения проекта (использованные приемы и методы исследования). В конце введения должна быть раскрыта **структура курсовой работы и краткое содержание ее основных разделов**. Введение должно занимать не более двух страниц машинописного текста.

Основная часть курсовой работы должна состоять из трех глав. Первая глава, как правило, посвящена обзору аналогов или вариантов решения поставленной задачи, а также содержит оценку возможности реализации проекта и предполагает уяснение наличия физических возможностей для реализации проекта.

Вторая глава посвящена разработке функциональной схемы импульсно-модуляционной системы или конкретного импульсного преобразователя, который решает поставленную задачу. В ней производится расчет и выбор основных элементов схемы, а также разрабатывается схема электрическая принципиальная с перечнем элементов.

Третья глава посвящена, как правило, построению имитационной модели ИМС, подтверждению ее адекватности и исследованиям, позволяющим получить ожидаемые характеристики и показатели ИМС.

Материал каждой главы необходимо сгруппировать по параграфам. Все параграфы по последовательности и смыслу изложения должны быть связаны друг с другом. Заголовки глав и параграфов должны быть краткими, состоящими из ключевых слов, несущих основную смысловую нагрузку, точно отражать содержание относящегося к ним текста, не сокращая или расширяя объем информации, которая в них заключена.

Главы курсового проекта целесообразно завершить краткими выводами – это усиливает логику проводимого исследования. Между объемами глав проекта не должно быть сильных диспропорций.

Особое внимание следует уделить языку и стилю написания курсовой проекта, так как они свидетельствует об общем уровне подготовки будущего специалиста, его профессиональной культуре.

В заключении последовательно и кратко излагаются выводы и предложения по всей выполненному проекту, которые вытекают из ее содержания и носят обобщающий характер. Общий объем заключения не должен превышать двух страниц.

В таблице 4.1 приведены ориентировочные этапы выполнения курсового проекта, которые будут полезны при разработке содержания курсового проекта и календарного плана его выполнения.

Таблица 4.1 – Этапы выполнения курсового проекта

№	Название этапа и его содержание	Результат	Примечания
1	Анализ ТЗ. (Назначение, требования, характеристики)	Решение о возможности выполнения или невыполнения ТЗ	2–3 недели
2	Обзор научно-технической и патентной литературы. (Что уже сделано (известно) по теме проекта, как сделано, кем сделано, что можно использовать в КП, а чего нельзя и почему)	Список литературы по теме КП	2–4 недели
3	Разработка схем электрических структурной и функциональной. (Уточнить по ГОСТ, что такое структурная и функциональная схемы)	Схемы Э1, Э2	1 неделя
4	Описание принципа действия преобразователя по схеме электрической функциональной (Э2) с временными диаграммами и основными расчетными соотношениями для выбора элементов силовой части преобразователя	Изложенный на «бумаге» принцип работы устройства по схеме Э2	1 неделя
5	Расчет и выбор элементов силовой части преобразователя	Формулы, соотношения и графики для выбора элементов. Даташит	1 неделя
6	Построение имитационной модели преобразователя и ее исследование с целью уточнения расчетов, получения статических, динамических и других характеристик преобразователя	Имитационная модель (ИМ)	1 неделя
6.1	Подтверждение работоспособности преобразователя на имитационной модели	Временные диаграммы токов и напряжений, полученные на ИМ	1 неделя

Окончание таблицы 4.1

№	Название этапа и его содержание	Результат	Примечания
6.2	Исследование частотных характеристик преобразователя как объекта управления	ИМ для снятия частотных характеристик, АЧХ И ФЧХ	1 неделя
6.3	Синтез корректирующих звеньев (КЗ) для замыкания обратной связи в САР	Вид КЗ и их модели	1 неделя
6.4	Исследование переходных процессов в замкнутой САР при изменении управляющих и возмущающих воздействий с использованием синтезированных корректирующих звеньев	ИМ для исследования переходных процессов	1 неделя
7	Разработка функциональной схемы системы управления с пояснениями принципа работы узлов и элементов, временными диаграммами и расчетными соотношениями	Схема Э2 СУ	1 неделя
8	Разработка схемы электрической принципиальной с перечнем элементов, с расчетом и выбором основных элементов СУ и силовой части преобразователя	ЭЗ, ПЭ	1 неделя
9	Оформление пояснительной записки (ПЗ) курсового проекта и ее проверка руководителем проекта	ПЗ	1 неделя
10	Подготовка презентации, защита курсового проекта	Презентация Успешная защита	1 неделя

5 ОБЪЕМ И ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовая работа должна быть выполнена с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги формата А4 шрифтом Times New Roman через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть черным, высота цифр, букв и других знаков размером 14 пт (кеглей). Текст работы следует печатать, соблюдая размеры полей: левое – 25 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм.

Объем курсового проекта, как правило, составляет 30–40 страниц (это нужно учитывать при составлении плана). Количество страниц, отводимых на каждый раздел, определяется студентом по согласованию с научным руководителем. Допускается использовать компьютерные возможности для акцентирования внимания на определениях, терминах, формулах и других важных особенностях путем применения разных начертаний шрифта (курсив, полужирный, полужирный курсив, разрядка и др.), но только в том случае, если это необходимо в работе.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЗАЩИТЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект допускается к защите научным руководителем при условии выполнения плана работы и соблюдения требований к оформлению. Комиссия по защите курсовых работ может состоять из преподавателей и аспирантов кафедры. Процедура защиты включает в себя краткий доклад студента и ответы на вопросы по содержанию работы. Доклад студента должен отразить актуальность темы, цели, задачи, используемые методы и основные результаты исследования, выводы и рекомендации. Продолжительность доклада – в пределах 10 минут. Студент при защите курсовой работы может использовать мультимедийные средства, показывать основные результаты работы, используя презентации по желанию и возможностям студента.

7 РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Современная разработка силовых преобразователей и источников питания на их основе, представляет собой комплексное сочетание инженерных расчетов с математическим или компьютерным моделированием, с последующей реализацией физической модели устройства. Виртуальное моделирование позволяет получить качественную оценку работоспособности разрабатываемого устройства на всех этапах проектирования и отладки [1].

Компьютерная модель, хотя и является частным случаем математической (все блоки компьютерной модели описаны математическими законами и «спрятаны» внутри программы), тем не менее, обладает таким преимуществом как графический интерфейс и «необязательность» вникания в методы построения модели. Это, в свою очередь, позволяет больше заниматься исследованием и разработкой электронных устройств и импульсно-модуляционных систем энергетической и силовой электроники, а не построением модели [2].

В данном разделе приводятся: начала работы в Matlab Simulink, необходимые для магистрантов, которые не работали в этой среде; пример расчета силовой части импульсного преобразователя на основе непосредственного преобразователя напряжения понижающего типа, необходимый для получения численных параметров элементов модели, а также измерение (снятие) частотных характеристик и проектирование обратной связи с применением программного пакета Simulink Matlab 2013a.

7.1 Начало работы в Matlab Simulink

Для запуска программы *Simulink* необходимо предварительно запустить пакет *MATLAB* 2013a. Основное окно пакета *MATLAB* 2013a показано на рисунке 7.1.

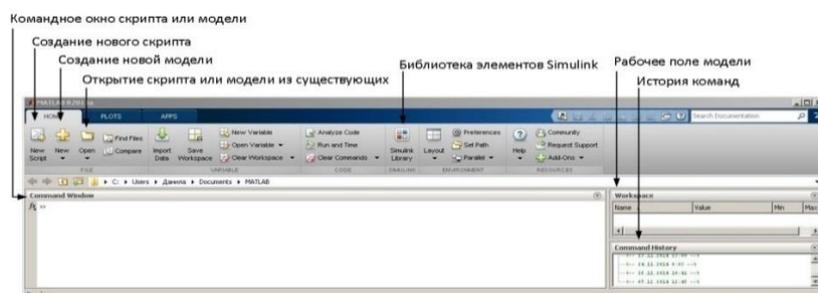


Рисунок 7.1 – Главное окно MATLAB 2013a

Для создания модели необходимо в выпадающем меню «New» выбрать тип создаваемого файла «Simulink model». Окно *Simulink* представлено на рисунке 7.2.

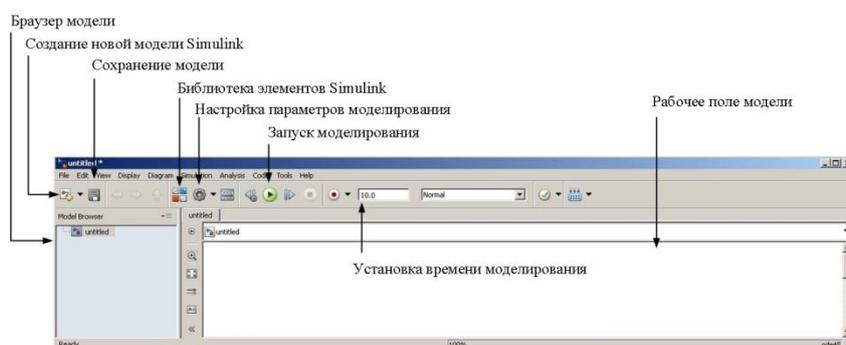


Рисунок 7.2 – Рабочее окно Simulink

Далее необходимо запустить библиотеку элементов *Simulink*. Её можно запустить как в главном окне *MATLAB*, так и в *Simulink*. Рабочее окно библиотек *Simulink* представлено на рисунке 7.3.

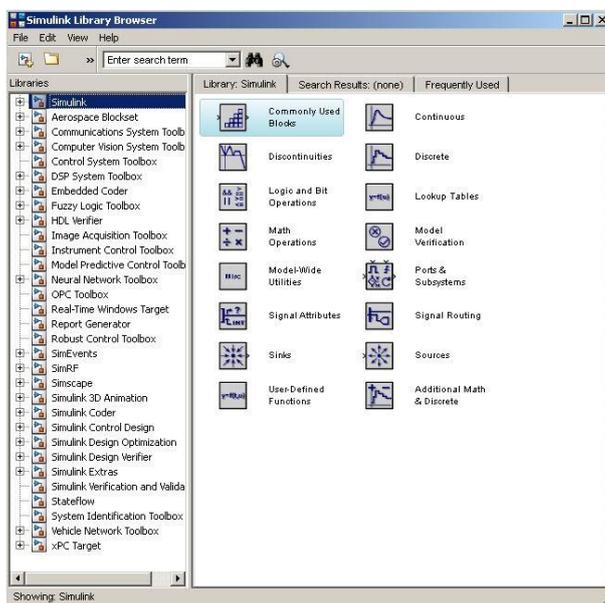


Рисунок 7.3 – Библиотека *Simulink* и путь к библиотеке *SimPowerSystem*

В окне, рисунок 7.3, слева располагается список библиотек, а справа их содержимое. Для проектирования силовых источников потребуется библиотека *SimPowerSystems*, которая располагается в библиотеки *Simscape* (рисунок 7.4).

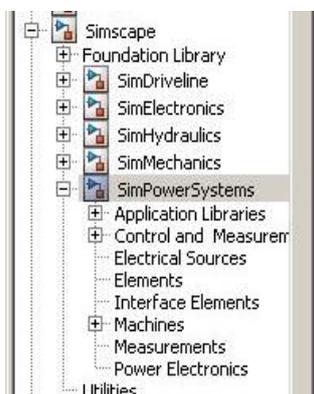


Рисунок 7.4 – Расположение библиотеки *SimPowerSystems*

В состав *SimPowerSystems* входят такие разделы как:

- **Application Libraries** (Прикладные библиотеки) состоящая из
 - **Electric Drives library** (Библиотека электрических машин) содержит двигатели переменного и постоянного тока, батареи, суперконденсаторы, топливные ячейки;
 - **Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Library** (Библиотека гибких (управляемых) систем передачи переменного тока) – включает в себя компенсаторы различных типов;
 - **Renewable Energy Library** (Библиотека возобновляемых источников энергии) – включает в себя ветрогенераторы.

- **Control and Measurements Library** (Библиотека контроля и измерений) – состоит из блоков генераторов импульсов, блоков измерений действующего, среднего и т. д. значений сигналов, блоков логики, фильтров и т. д.
- **Electrical Sources** (Источники электрические энергии) – управляемые и неуправляемые источники постоянного или переменного напряжения (тока), трехфазные источники, аккумуляторные батареи.
- **Elements** (Электрические элементы) – последовательные и параллельные *RLC*-цепи, трансформаторы и т. д.
- **Machines** (Электрические машины) – асинхронные двигатели, шаговые двигатели и т. д.
- **Measurements** (Блоки измерений) – блоки измерения тока, напряжения, импеданса, мультиметр и т. д.
- **Power Electronics** (Элементы силовой электроники) – содержит блоки транзисторов, диодов, тиристоров, мостовые и полумостовые сборки и т. д.

Методика создания *SimPowerSystems*-модели (SPS-модели) ничем не отличается от методики создания модели на основе базовой библиотеки *Simulink*. Так же, как и для обычной *Simulink*-модели (*S*-модели), необходимо выполнить расстановку блоков на схеме, задать их параметры, соединить блоки и установить параметры расчета модели в целом. Для *SPS*-моделей доступен ускоренный режим расчета и все возможности *Simulink*, включая набор инструментов *Simulink Performance Tools*, линейный анализ, отладчик и т. д.

Однако *SPS*-модели имеют и некоторые особенности: Входы и выходы *SPS*-блоков, в отличие от блоков *Simulink*, не показывают направление передачи сигнала, поскольку фактически являются эквивалентами электрических контактов. Таким образом, электрический ток может через вход или выход блока протекать в двух направлениях: как вовнутрь блока, так и наружу.

Соединительные линии между блоками являются, по сути, электрическими проводами, по которым ток может протекать также в двух направлениях. В *Simulink*-моделях (*S*-моделях) информационный сигнал распространяется только в одном направлении – от выхода одного блока к входу другого.

Simulink-блоки (*S*-блоки) и *SimPowerSystems*-блоки не могут быть непосредственно соединены друг с другом. Сигнал от *S*-блока можно передать к *SPS*-блоку через управляемые источники тока или напряжения, а наоборот – с помощью измерителей тока или напряжения.

Несколько линий связи (проводов) могут быть соединены между собой. Для выполнения такого соединения должны использоваться специальные блоки – *Connectors* (соединители).

При расчете схемы, содержащей нелинейные блоки, следует использовать методы:

- **ode15s** – многошаговый метод переменного порядка (от 1 до 5), использующий формулы численного дифференцирования;
- **ode23tb** – неявный метод Рунге – Кутты в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка в последующем, которые дают наилучшие результаты по быстродействию [1].

Для уменьшения числа одновременно отражаемых блоков на экране и лучшего восприятия модели используются *Simulink* – подсистемы – модели, оформленные в виде отдельного блока. Для создания в модели подсистемы необходимо выполнить несколько шагов:

- Скопировать нужную подсистему из библиотеки **Subsystem** в модель.
- Выделить с помощью мыши нужный фрагмент модели и выполнить команду *Create Subsystem* из меню *Edit* окна модели. Выделенный фрагмент будет помещен в подсистему, а входы и выходы подсистемы будут снабжены соответствующими портами. Отменить группировку блоков в подсистему можно командой *Undo* [1].

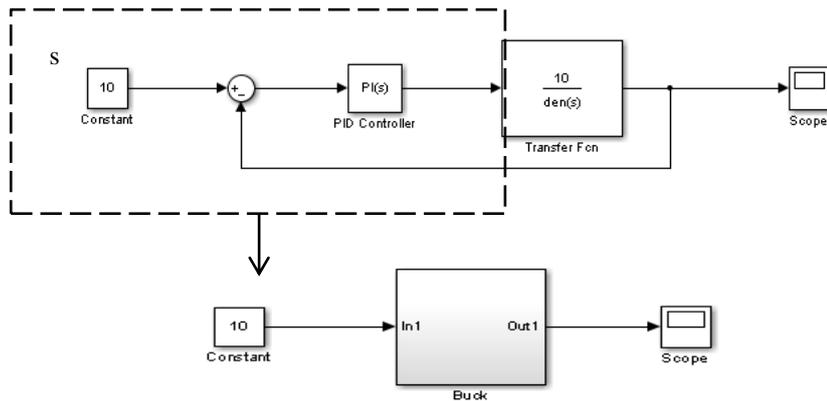


Рисунок 7.5 – Создание подсистемы *Subsystem*

На рисунке 7.5 представлена малосигнальная модель понижающего преобразователя с обратной связью, состоящая из сумматора S , ПИД – регулятора *PID Controller* и блока *Transfer Fcn*, с заданной передаточной функцией НПП 1-го рода – всё это преобразуется в подсистему *Buck*.

7.2 Построение компьютерной модели импульсного преобразователя

7.2.1 Принцип работы импульсных преобразователей напряжения на примере преобразователя понижающего типа

Структурная схема непосредственного преобразователя напряжения понижающего типа (НПП-1, ИРН-1) [2] представлена на рисунке 7.6.

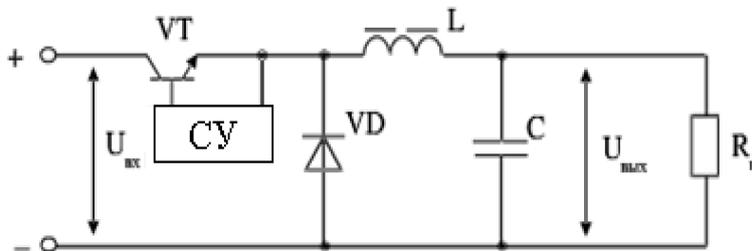


Рисунок 7.6 – Схема НПП понижающего типа

Регулирование выходного напряжения в этой схеме осуществляется изменением относительно времени включенного состояния транзистора $\gamma = \frac{t_{\text{имп}}}{T}$, где $t_{\text{имп}}$ – время включённого состояния транзистора, T – период работы ключа. Такое регулирование принято называть широтно-импульсным (ШИР) [3].

Система управления CU формирует управляющие импульсы и подаёт их на транзистор VT . На интервале γT открытого состояния транзистора VT напряжение прикладывается к дросселю L и нагрузке R_n , диод VD выключен. Ток источника питания протекает по контуру: плюс источника питания \Rightarrow транзистор $VT \Rightarrow$ дроссель $L \Rightarrow$ нагрузка R_n и конденсатор $C \Rightarrow$ минус источника питания.

На интервале $(1 - \gamma)T$ закрытого состояния транзистора VT ток дросселя протекает по контуру: дроссель $L \Rightarrow$ нагрузка R_n и конденсатор $C \Rightarrow$ диод VD .

Временные диаграммы, поясняющие работу НПП-1 представлены на рисунке 7.7.

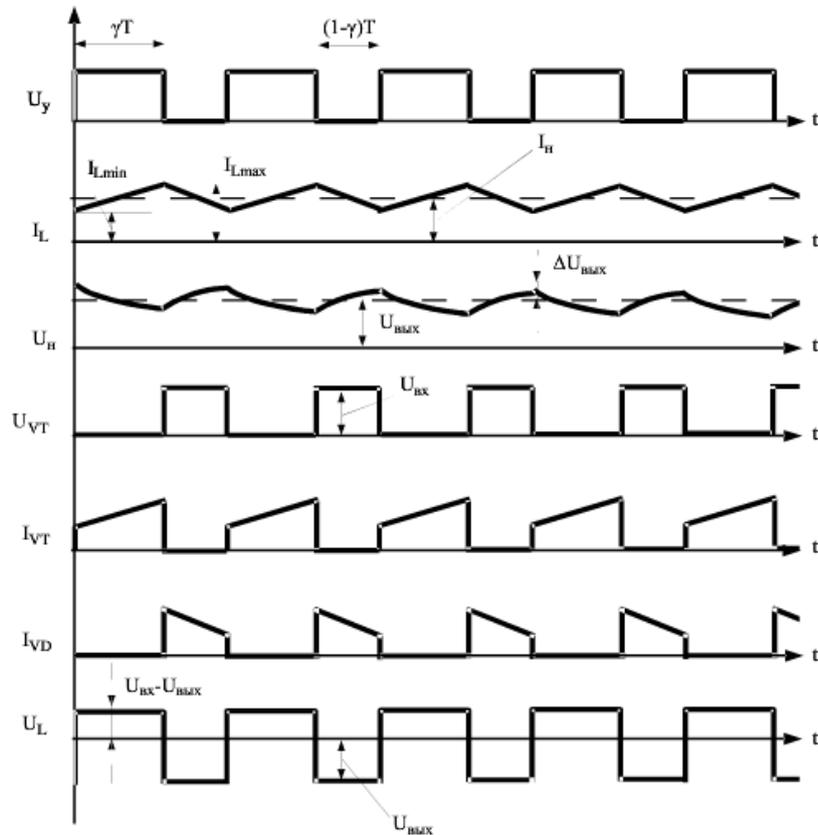


Рисунок 7.7 – Диаграммы, поясняющие работу НПН понижающего типа

В установившемся режиме работы среднее напряжение на дросселе за период равно нулю, что позволяет получить регулировочную характеристику понижающего преобразователя в виде:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{Н}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \gamma \quad (7.1)$$

7.2.2 Расчет основных элементов импульсного преобразователя напряжения понижающего типа

Чтобы рассчитать основные элементы схемы понижающего преобразователя (рисунок 7.6), воспользуемся расчетными соотношениями, представленными в литературе [2].

Пусть мощность преобразователя равна $P_{\text{Н}} = 100$ Вт, входное напряжение $U_{\text{ВХ}} = 50$ В, напряжение на нагрузке $U_{\text{Н}} = 25$ В. Минимальное значение тока I_{MIN} нагрузки равно 10% от номинального значения тока нагрузки $I_{\text{НОМ}}$. Преобразователь работает на частоте $f = 100$ кГц, а коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке $k_{\text{П}}$ должен быть менее 5%.

Для упрощения расчета и компьютерного моделирования сделаем следующие допущения: входной источник напряжения идеальный и не имеет внутреннего сопротивления, дроссель не имеет активного сопротивления, ключевые элементы схемы (VT_1 и VD_1) идеальны, т. е. открываются и закрываются мгновенно, а в открытом состоянии не имеют сопротивления электрическому току. При необходимости все эти параметры можно будет задать в модели дополнительно.

Расчет произведен по литературе [2]. Зная входное и выходное напряжение преобразователя (7.1), можно рассчитать относительную длительность открытого состояния транзистора γ по выражению (7.1).

$$\gamma = \frac{U_H}{U_{BX}} = \frac{25 \text{ В}}{50 \text{ В}} = 0,5. \quad (7.2)$$

Номинальное значение сопротивления нагрузки равно:

$$R_H = \frac{U_H^2}{P_H} = \frac{(25 \text{ В})^2}{100 \text{ Вт}} = 6,25 \text{ Ом} \quad (7.3)$$

Номинальное значение тока нагрузки равно:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{U_H}{R_H} = \frac{25 \text{ В}}{6,25 \text{ Ом}} = 4 \text{ А} \quad (7.4)$$

Тогда минимальный ток нагрузки равен:

$$I_{\text{МІН}} = 0,1 \cdot I_{\text{НОМ}} = 0,1 \cdot 4 \text{ А} = 0,4 \text{ А}.$$

По выражению (7.4) пересчитаем максимальное сопротивление нагрузки:

$$R_{\text{НМАХ}} = \frac{U_H}{I_{\text{МІН}}} = \frac{25 \text{ В}}{0,4 \text{ А}} = 62,5 \text{ Ом}$$

Определим граничное значение индуктивности выходного дросселя L_1 . При $L_1 = L_{\text{ГР}}$ преобразователь переходит из одного режима (непрерывный ток дросселя) в другой (прерывистый ток дросселя).

$$L_{\text{ГР}} = \frac{R_{\text{НМАХ}}(1-\gamma)}{2f} = \frac{62,5 \text{ Ом} \cdot (1-0,5)}{2 \cdot 100000 \text{ Гц}} = 156,25 \text{ мкГн}. \quad (7.5)$$

В случае, когда $L_1 < L_{\text{ГР}}$ преобразователь работает в режиме прерывистого тока дросселя (ПТ). Когда $L_1 > L_{\text{ГР}}$, преобразователь работает в режиме непрерывного тока дросселя (НТ).

Определим значение LC выходного фильтра преобразователя, учитывая его параметры:

$$LC = \frac{1}{2\pi^2 f^2 k_{\text{П}}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14^2 \cdot (100000 \text{ Гц})^2 \cdot 0,05} = 1,013 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot \text{Гн}.$$

Зададимся значениями индуктивности дросселя для разных режимов работы, исходя из значения граничной индуктивности $L_{\text{ГР}}$, рассчитанной по выражению (7.4).

Пусть для режима ПТ индуктивность дросселя $L_{1\text{ПТ}} = 100 \text{ мкГн}$. Тогда, учитывая выражение (7.5), рассчитаем значение выходного конденсатора:

$$C_{\text{ПТ}} = \frac{LC}{L_{1\text{ПТ}}} = \frac{1,013 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot \text{Гн}}{100 \text{ мкГн}} = 1,013 \text{ мкФ}.$$

Из ряда Е6 ближайшие номиналы емкости 1 мкФ и 1,5 мкФ. Выберем большее значение емкости $C_{1\text{ПТ}} = 1,5 \text{ мкФ}$, это позволит улучшить сглаживающие свойства выходного фильтра.

Для режима НТ зададимся значением индуктивности дросселя в два раза большем значения граничной индуктивности $L_{1HT} = 300$ мкГн. Тогда емкость выходного конденсатора будет равна:

$$C_{2HT} = \frac{LC}{L_{1HT}} = \frac{1,013 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot \text{Гн}}{300 \text{ мкГн}} = 337,7 \text{ нФ}.$$

Из ряда Е6 выберем значение емкости $C_{1HT} = 470$ нФ.

Тогда для режима ПТ LC-фильтр имеет следующие параметры: $L_{1ПТ} = 100$ мкГн, $C_{1ПТ} = 1,5$ мкФ.

Резонансная круговая частота фильтра определяется выражением $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ [рад/сек] и для режима ПТ равна $\omega_{p1} = 81650$ рад/сек.

Для режима НТ $\omega_{p1} = 84215$ рад/сек.

Для режима НТ LC-фильтр имеет следующие параметры: $L_{1HT} = 300$ мкГн, $C_{1HT} = 470$ нФ.

7.2.3 Построение компьютерной модели преобразователя без обратной связи и её исследование

Перед началом моделирования требуется создать рабочую область Simulink. Для этого, в главном меню окна Matlab производится следующая последовательность действий: HOME => New => Simulink Model. Чтобы сохранить файл модели, в панели задач окна Simulink выбирается File => Save As, где указывается каталог сохранения и имя файла модели.

ВНИМАНИЕ! Название модели не должно начинаться с цифровых символов и должно иметь только буквы латинского алфавита (Например: *NPN1*, *irn_1* и др).

Из окна просмотра Simulink Library Browser (View => Library Browser) воспользуемся следующими библиотеками и элементами в них:

Библиотека **Simscape** => **SimPowerSystems**:

powergui

Electrical Sources (Источники питания):

DC Voltage Source (Источник постоянного напряжения)

Elements (Элементы):

Series RLC Branch (Последовательная RLC цепь) – 3шт.

Measurements (Измерения):

Current Measurement (Датчик тока)

Voltage Measurement (Датчик напряжения)

Power Electronics (Силовая электроника):

Diode (Диод)

Ideal Switch (Идеальный ключ)

Библиотека **Simulink**:

Sinks (Приёмники):

Scope (Осциллограф)

Sources (Источники):

Pulse Generator (Генератор импульсов)

Рабочая область Simulink с расположенными на ней элементами представлена на рисунке 7.8.

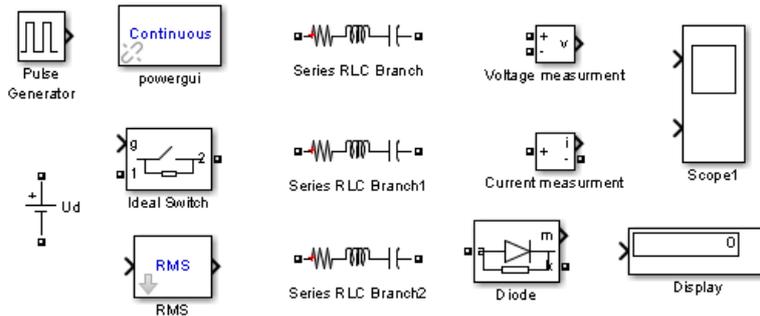


Рисунок 7.8 – Элементы модели в окне Simulink

Далее проведем настройку блоков. Переименуем их для удобства работы с моделью и зададим параметры элементов схемы в соответствии с расчетом, приведенном в параграфе 7.2.

Откроем блок powergui (два раза кликнув по нему правой кнопкой мыши). В появившемся окне нажимаем первую кнопку Configure parameters, в результате чего активируется окно с настройкой параметров powergui. Во вкладке Solver этого окна требуется проставить галочки, как показано на рисунке 7.9.

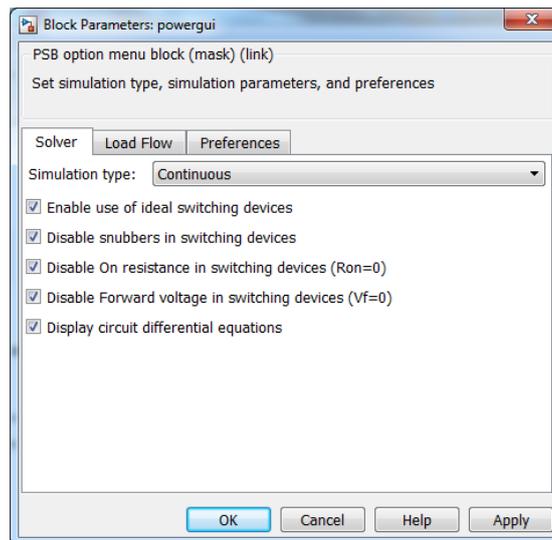


Рисунок 7.9 – Окно настройки параметров powergui

Первый пункт Enable use of ideal switching devices (Включить использование идеальных коммутационных устройств) отвечает за активацию параметров ключевых элементов. Далее появляются четыре пункта, которые позволяют **отключать** в ключевых элементах (транзисторы, диоды, тиристоры) **следующие функции**:

- снабберы;
- сопротивление в открытом состоянии ($R_{ON} = 0$);
- падение напряжения в открытом состоянии ($U_F = 0$);
- включает отображение дифференциальных моделей элементов в окне командной строки Matlab.

DC Voltage Source переименуем в U_d и установим его значение 50 V. Diode переименуем в $VD1$, а Ideal Switch в $K1$. Поскольку в модели используются дискретные (отдельные) датчики тока и напряжения, то галочку с параметра Show measurement port (Показывать измерительный порт), в настройках блоков $VD1$ и $K1$ можно убрать. Pulse Generator является упрощенной

системой управления ключом преобразователя. Переименовываем его в $G1$ и настраиваем его параметры в соответствии с настройками, приведенными на рисунке 7.10.

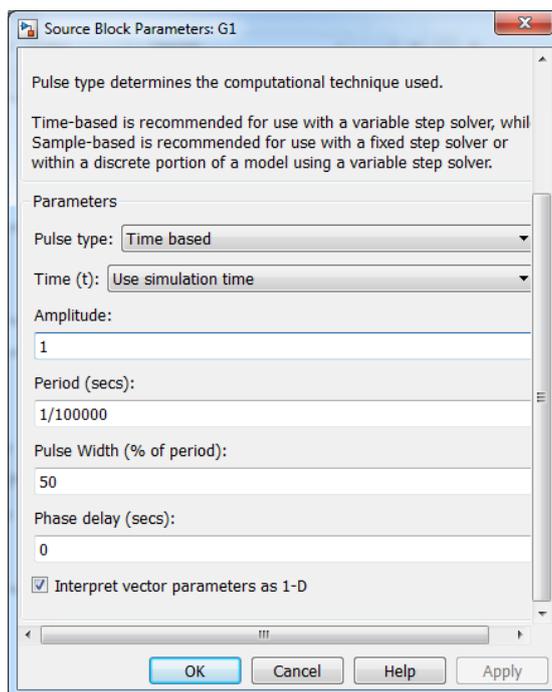


Рисунок 7.10 – Окно параметров блока Pulse Generator

На рисунке 7.10 обозначено:

Amplitude – амплитуда выходного импульса. Поскольку мы используем идеальные компоненты, то для их управления достаточно величины 1В.

Period – значение периода следования импульсов, задаем равным 1/100000 Гц. Pulse Width (% of period) – время длительности импульса с амплитудой 1 В (в процентном отношении от периода), у нас длительность импульса равна половине периода или 50%.

Phase delay – фазовый сдвиг сигнала задаем равным 0.

Блоки Current Measurement (Датчик тока) и Voltage Measurement (Датчик напряжения) переименуем соответственно в $A1$ и $V1$.

ВНИМАНИЕ! Датчик тока подключается последовательно с тем элементом, ток в котором требуется измерить. Датчик напряжения подключается параллельно тому элементу, напряжение на котором требуется измерить.

Теперь проведем настройку блоков Series RLC Branch. Выберем один блок, переименовываем его в Rn , а в окне его параметров в поле Branch type установим значение R (резистор). В поле Resistance (Ohms) введем значение сопротивления нагрузки 62,5 Ом, соответствующее минимальному току нагрузки.

Один из оставшихся блоков Series RLC Branch переименовываем в $L1$ и переделываем в катушку индуктивности (Branch type: L). Из другого блока делаем конденсатор (Branch type: C) с названием блока $C1$. Соединим элементы схемы в соответствии с топологией НПН понижающего типа, при этом датчик тока $A1$ подключим последовательно дросселю $L1$, а вольтметр $V1$ параллельно нагрузке Rn . Информационные выходы датчиков тока $A1$ и напряжения $V1$ подключим к входным каналам осциллографа Scope1, предварительно установив в настройках осциллографа 2 канала Number of axes и отключив предел точек моделирования рисунок 7.11. Блоки RMS и $Display$ подключаем согласно рисунку 7.12.

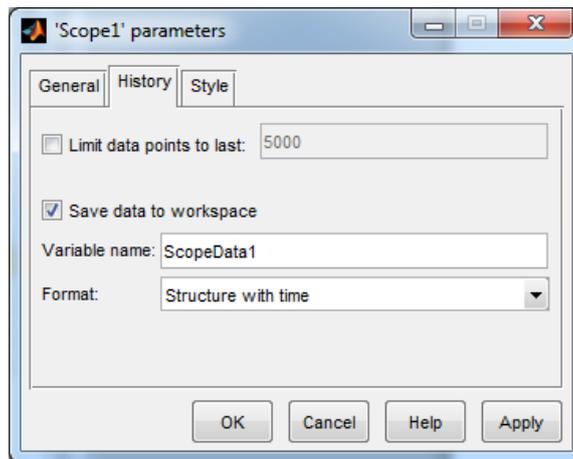
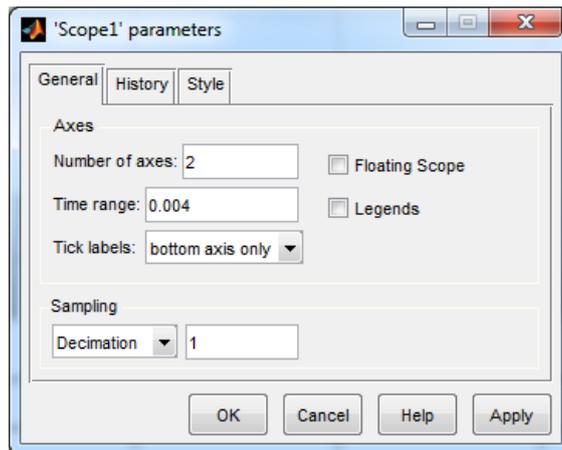


Рисунок 7.11 – Окно параметров осциллографа

Получившееся графическое отображение компьютерной модели приведено на рисунке 7.12.

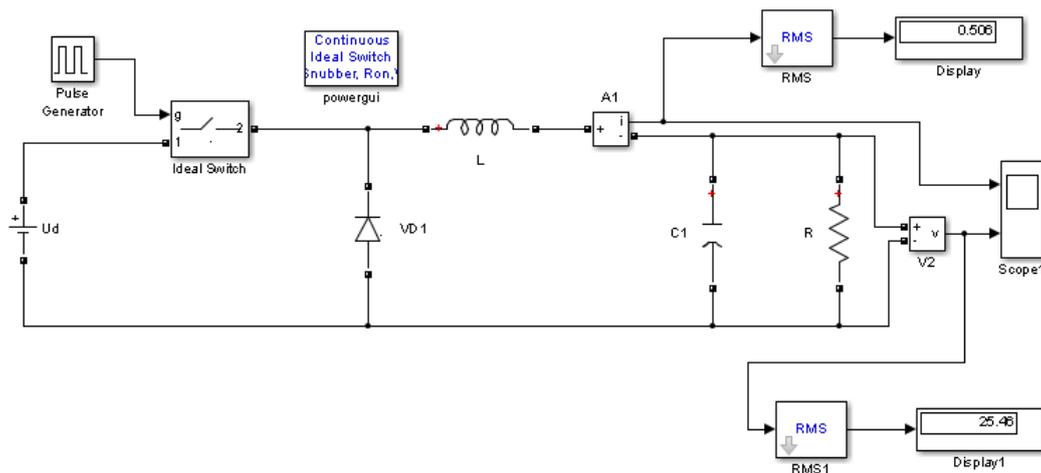


Рисунок 7.12 – Компьютерная модель НПП-1 в Matlab Simulink

Проведем выбор решателя для модели и проведем его настройку. Для этого откроем окно настройки параметров моделирования Simulation => Model Configuration Parameters (рисунок 7.13).

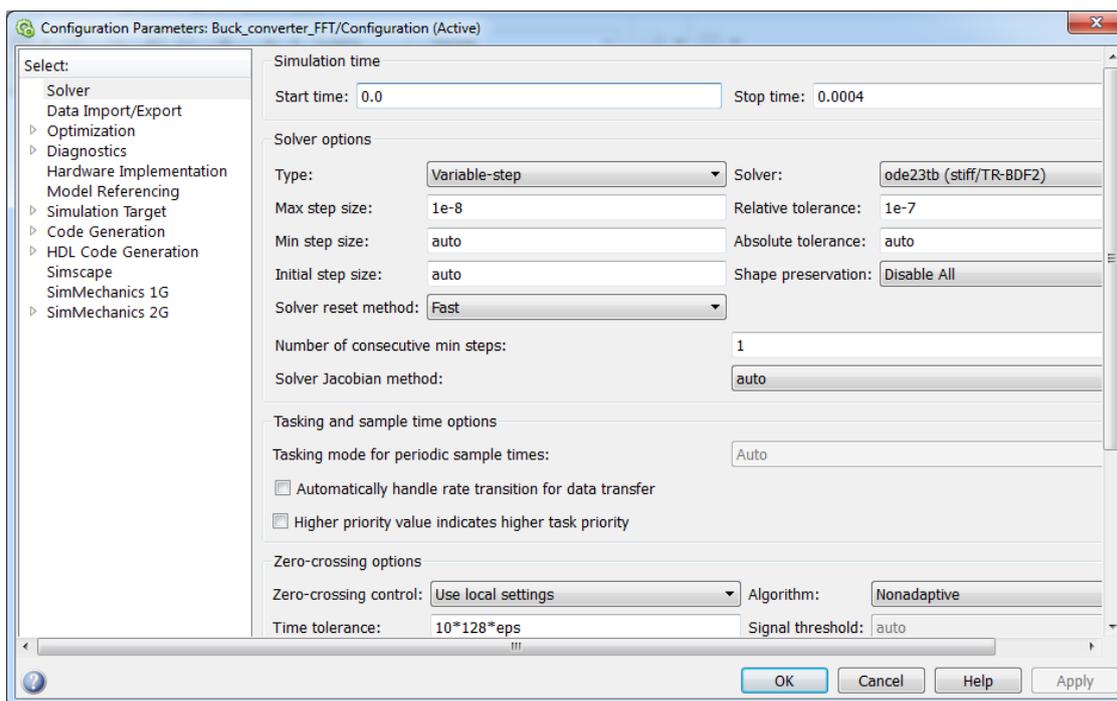


Рисунок 7.13 – Окно параметров моделирования

Зададим следующие параметры в полях:

Start time (время начала моделирования) – 0 сек.

Stop time (время окончания моделирования) – 0.0004 сек.

(Время окончания моделирования зададим равным 40 периодам коммутации Pulse generator G1, что составляет $40 \cdot \frac{1}{f} = 400 \cdot 10^{-6}$ с, или 0,0004 с.)

Solver (решатель) – ode23tb.

Max. step size (максимальный шаг расчета) – 1e-8.

(Максимальный шаг расчёта выбирается из такого условия, чтобы на одном периоде коммутации «укладывалось» 1000 шагов, что составляет $10 \cdot 10^{-6} / 1000 = 10^{-8}$ с.)

Relative tolerance (относительная сходимость) – 1e-7.

Остальные значения параметров настроек оставим по умолчанию.

Для того, чтобы проверить рассчитанные параметры элементов схемы понижающего преобразователя, поочередно изменим значения дросселя и выходного конденсатора при каждом режиме работы.

Чтобы запустить компьютерную модель преобразователя в режиме прерывистого тока дросселя, подставим значение индуктивности в блок L1 равное 100e-6 Гн, а значение емкости блока C1 изменим на 1,5e-6 Ф. Запускаем модель (Simulation => Run). После окончания моделирования открываем блок осциллографа Scope1. Результат моделирования НПП-1 в режиме ПТ представлен на рисунке 7.14.

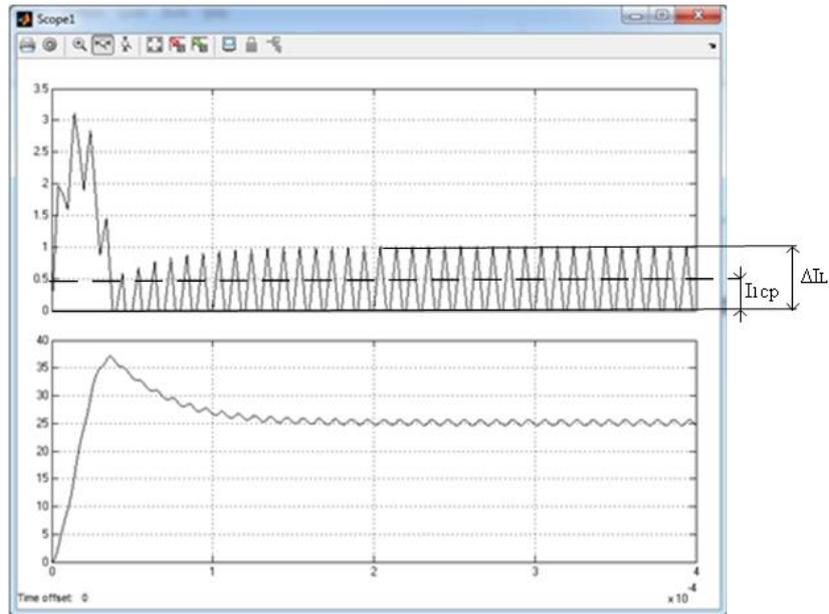


Рисунок 7.14 – Осциллограммы тока дросселя и напряжения на конденсаторе НПН-1 в режиме ПТ

К первому каналу осциллографа подключен датчик тока А1, измеряющий ток дросселя L1. По осциллограмме видно, что ток дросселя, в установившемся режиме прерывистый. Размах пульсаций тока ΔI_L приблизительно равен 1 А, среднее значение тока I_{Lcp} , полученное с помощью блока *RMS*, составляет 0,46 А.



Рисунок 7.15 – показания блока *RMS*

Ко второму каналу осциллографа подключен вольтметр, измеряющий напряжение на конденсаторе C1. Как видно на осциллограмме напряжение устанавливается до уровня 25 В за время 150 мкс, при этом пульсации напряжения не превышают 2%. Это можно оценить следующим образом: с помощью блока *RMS*, получаем значение напряжения на конденсаторе (см. рис. 7.16).

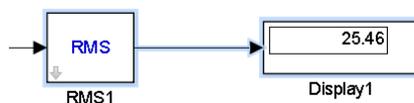


Рисунок 7.16 – показания блока *RMS*

Теперь, получим значение пульсаций выходного напряжения в процентах:

$$\Delta U_c = 1 - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{RMS}}} = 1 - \frac{25}{25,46} = 0,01806 = 1,8\%.$$

Чтобы запустить компьютерную модель преобразователя в режиме непрерывного тока дросселя, подставим значение индуктивности в блок L1 равное $300 \cdot 10^{-6}$ Гн, а значение емкости блока C1 изменим на $470 \cdot 10^{-9}$ Ф. Запускаем модель (Simulation => Run). Результат моделирования НПН-1 в режиме ПТ представлен на рисунке 7.17.

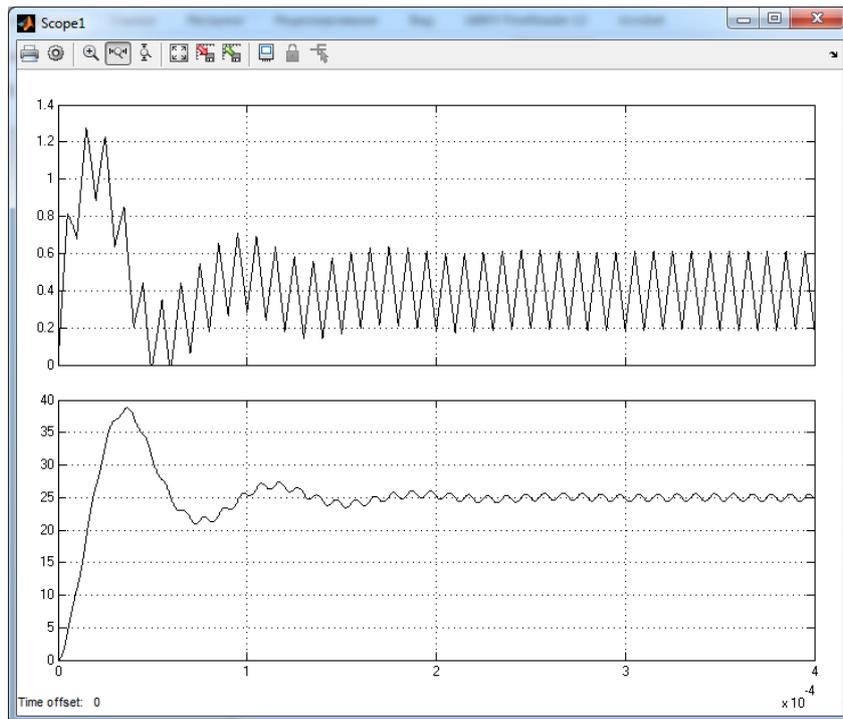


Рисунок 7.17 – Осциллограммы тока дросселя и напряжения на конденсаторе НПН-1 в режиме НТ

По осциллограммам на рисунке 7.17 видно, что ток дросселя непрерывен и не спадает до нулевого значения, среднее значение тока составляет 0,42 А.

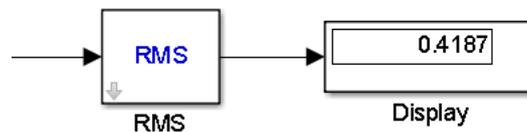


Рисунок 7.18 – показания блока RMS

Напряжение на конденсаторе устанавливается на уровне 25 В в течении 0,2 мс. Пульсации напряжения на конденсаторе не более 2%.

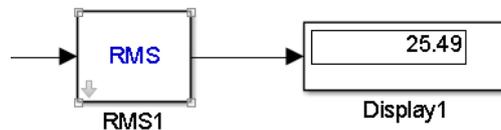


Рисунок 7.19 – показания блока RMS

$$\Delta U_c = 1 - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{RMS}}} = 1 - \frac{25}{25,49} = 0,01922 = 1,9\%.$$

7.3 Импульсный преобразователь напряжения понижающего типа с замкнутой обратной связью

7.3.1 Предварительные замечания к построению модели импульсного преобразователя с обратной связью

На разработанной нами модели можно изучать переходные и пусковые (рис 7.14, 7.17), а также другие временные характеристики понижающего преобразователя при изменении относительной длительности включённого состояния ключа, или получить регулировочные и нагрузочные (внешние) характеристики преобразователя без обратной связи.

Отрицательная обратная связь применяется для уменьшения (или исключения) влияния дестабилизирующих факторов на выходную (стабилизированную) величину.

Пусть, в нашем случае, выходной стабилизированной величиной является среднее значение выходного напряжения $U_{вых} = 25 В$. Дестабилизирующими факторами, изменяющими это среднее значение выходного напряжения, являются изменение входного напряжения U_d преобразователя и изменение тока нагрузки I_R , если внутреннее сопротивление преобразователя не равно нулю. Если имеются потери мощности на силовом ключе, диоде или дросселе, то внутреннее сопротивление отлично от нуля.

Пусть входное напряжение U_d в процессе работы преобразователя изменяется в пределах от $U_{dmin} = 45 В$ до $U_{dmax} = 55 В$. Тогда и среднее выходное напряжение будет изменяться в пределах от $U_{выхmin} = 22,5 В$ до $U_{выхmax} = 27,5 В$. В этом можно убедиться с помощью разработанной модели и построить зависимость среднего значения выходного напряжения от входного напряжения $U_{вых}(U_d)$.

Компенсировать это влияние можно путём «ручного» изменения γ в блоке *Pulse generator*.

Действительно, если входное напряжение $U_d = U_{dmax} = 55 В$, то выходное напряжение можно уменьшить путем изменения γ от значения $\gamma = 0,5$ до значения $\gamma_{min} = \frac{25}{55} = 0,45$. В этом легко убедиться, задавая нужные параметры в модели. При уменьшении входного напряжения до уровня $U_{dmin} = 45 В$, выходное напряжение можно увеличить путём изменения γ до величины $\gamma_{max} = \frac{25}{45} = 0,55$.

Чтобы обеспечить автоматическую компенсацию изменения выходного напряжения $U_{вых}$, то есть его стабилизацию, необходимо решить 2 задачи:

1) разработать устройство, способное, под действием электрического сигнала, изменять относительную длительность γ включённого состояния ключа, и включить его вместо генератора *Pulse Generator*;

2) ввести отрицательную обратную связь (ООС) по среднему значению выходного напряжения.

7.3.2 Разработка модели импульсного преобразователя с ШИМ и получение её частотных характеристик

Устройство, способное, под действием электрического сигнала, изменять относительную длительность γ включённого состояния ключа, упомянутого в разделе 7.20, называется широтно-импульсным модулятором (ШИМ). Его функциональная схема и временные диаграммы, поясняющие принцип работы, представлены на рисунках 7.20,а–б.

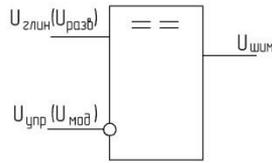


Рисунок 7.20а – Широтно-импульсный модулятор (ШИМ)

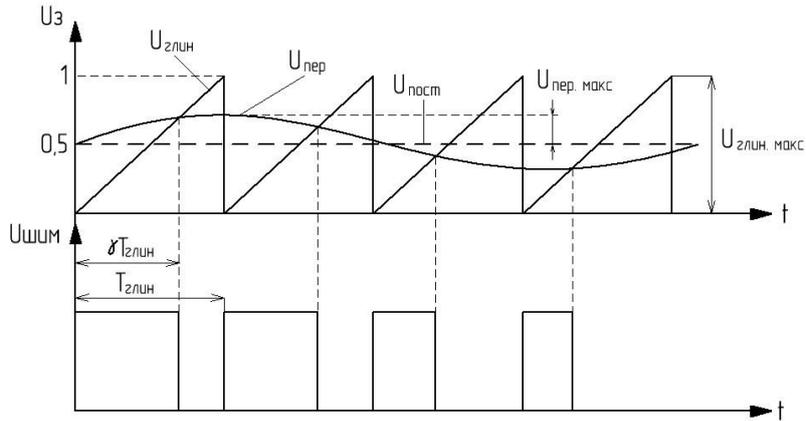


Рисунок 7.20б – Временные диаграммы ШИР

ШИМ на рисунке 7.20а состоит из компаратора, на инвертирующий вход которого поступает управляющий сигнал $U_{упр}(t)$ (его еще называют сообщением с точки зрения передаваемой информации), который модулирует (изменяет) ширину (длительность) прямоугольных импульсов, играющих роль переносчика информации в системе управления. Управляющий сигнал часто называют еще и модулирующим сигналом $U_{мод}$. На неинвертирующий вход компаратора поступает сигнал $U_{глин}$ от генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), с амплитудой управляющего напряжения $U_{глин макс}$. Этот сигнал называют еще и развертывающим $U_{разв}$.

Управляющий (модулирующий) сигнал, в общем случае, может состоять из сигнала $U_{пост}$ постоянного напряжения и сигнала $U_{пер}(t)$ переменного напряжения так, что

$$U_{упр}(t) = U_{пост} + U_{пер}(t).$$

Причём в качестве переменного напряжения часто принимается тестовый синусоидальный сигнал

$$U_{пер}(t) = U_{пер макс} \cdot \sin(\omega t + \varphi),$$

где $U_{пер макс}$ – амплитуда синусоиды,
 $\omega t = 2\pi t$ – круговая частота синусоиды,
 φ – фаза синусоиды.

Для исключения перемодуляции (перерегулирования, насыщения ШИМ) необходимо выполнить следующие условия:

- 1) $U_{пер макс} \leq U_{пост}$;
- 2) $U_{пост} + U_{пер макс} \leq U_{глин макс}$.

Временные диаграммы ШИМ, соответствующие $U_{\text{глин max}} = 1\text{В}$, $U_{\text{пост}} = 0,5\text{В}$, $U_{\text{пер}} = 0,15\text{В}$, представлены на рисунке 7.20б. Частота работы генератора ГЛИН определяет частоту выходного сигнала $U_{\text{шим}}$, который подаётся на ключ *Ideal Switch*, и задаёт частоту коммутации ключа.

Недостаточно просто замкнуть преобразователь обратной связью, необходимо также выбрать корректирующее звено и его коэффициенты таким образом, чтобы система оставалась устойчивой. Кроме того, эти коэффициенты также влияют на перерегулирование, время и качество переходного процесса и т. д. [4, 5, 6].

Одним из самых распространенных методов синтеза корректирующего звена для линейных САУ является метод, основанный на исследовании логарифмических частотных характеристик разомкнутой системы (объекта управления), амплитудной и фазовой [5, 7].

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика показывает коэффициент усиления системы при разных значениях частоты в логарифмическом масштабе. Математически эта зависимость определяется следующим выражением:

$$G(\omega) = 20 \log \frac{A_B(\omega)}{A_Z(\omega)}, \quad (7.6)$$

где $G(\omega)$, – коэффициент усиления, [дБ]; ω – круговая частота [рад]; A_B – амплитуда выходного напряжения, [В] на частоте ω [рад]; A_Z – амплитуда входного напряжения (задатчика), [В] на частоте ω [рад].

Логарифмическая фазо-частотная характеристика показывает зависимость разности фаз выходного напряжения относительно входного в логарифмическом масштабе по оси абсцисс и линейном масштабе по оси ординат с единицами измерения [радиан] или [градус электрический]. Математически ЛФЧХ можно записать следующим выражением:

$$\varphi(\omega) = \varphi_B(\omega) - \varphi_Z(\omega), \quad (7.7)$$

где φ_B – фаза входного напряжения на частоте ω , φ_Z – фаза выходного напряжения (задатчика) на частоте ω .

Поскольку импульсные преобразователи с широтно-импульсной модуляцией не являются линейными системами в «большом» из-за принципиально нелинейных звеньев (ШИМ, усилителей с насыщением и так далее, то необходимо получить их линеаризованные частотные характеристики в «малом» для усредненных сигналов [2, 5, 8, 9]. Получить такие частотные характеристики импульсного преобразователя можно экспериментально на имитационных моделях, построенных в среде Matlab/Simulink. Для этого необходимо в систему управления ввести некоторый тестовый гармонический сигнал заданной частоты с заданной малой амплитудой и фазой. После этого оценить отклик системы (амплитуду выходного сигнала на той же частоте и его фазу) и по известным и полученным величинам рассчитать линеаризованные частотные характеристики. На рисунке 7.20б представлены временные диаграммы управляющего сигнала $U_{\text{упр}}(t)$, переменная составляющая $U_{\text{пер}}(t)$ которого и будет являться описанным тестовым сигналом, а его постоянная составляющая $U_{\text{пост}}$ будет определять точку, в которой осуществляется линеаризация. Процесс формирования выходного сигнала ШИМ при различных видах модуляции описан, например, в литературе [3].

Величина постоянной составляющей $U_{\text{пост}}$ задает рабочую точку преобразователя и определяет расчетное значение относительной длительности импульсов γ , в этой точке. По расчету $\gamma = 0,5$, соответственно, напряжение $U_{\text{пост}} = 0,5\text{В}$ при $U_{\text{глин}}=1$. При сравнении напряжения $U_{\text{пост}}$ и $U_{\text{глин}}$ формируются управляющие импульсы широтно-импульсного регулирования (ШИР) без модуляции. Если наложить на $U_{\text{пост}}$ некоторую переменную составляющую, малой величины, по сравнению с величиной $U_{\text{пост}}$, то получим управляющее

воздействие, которое, в свою очередь, приведет к малому изменению γ и к появлению на выходе фильтра преобразователя переменной составляющей с амплитудой A_B и фазой φ_B .

Описанный алгоритм реализуем на блоках библиотеки *Simulink* следующим образом:

Logic and Bit Operations:

Relational Operator – переименовываем в Comp, а в окне настройки выбираем функцию \geq ;

Sources:

Repeating Sequence – переименовываем в ГЛИН, устанавливаем значения Time values: [0 1/100000], Output values [0 1].

Sine Wave – переименовываем в Sine, устанавливаем

Amplitude: 0.1 – амплитуда переменной составляющей.

Bias: 0.5 – величина постоянной составляющей.

Frequency (rad/sec): $2 \cdot 3.14 \cdot f$ – круговая частота переменной составляющей в рад/сек, где f – частота в Гц, которая и является варьируемой величиной.

Подключаем выход блока Sine к первому входу блока Comp, а выход ГЛИН ко второму входу Comp. Выход блока Comp подключаем к управляющему выводу ключа g . Также подключаем выход блока Sine к первому каналу осциллографа Scope1. Полученная модель представлена на рисунке 7.21.

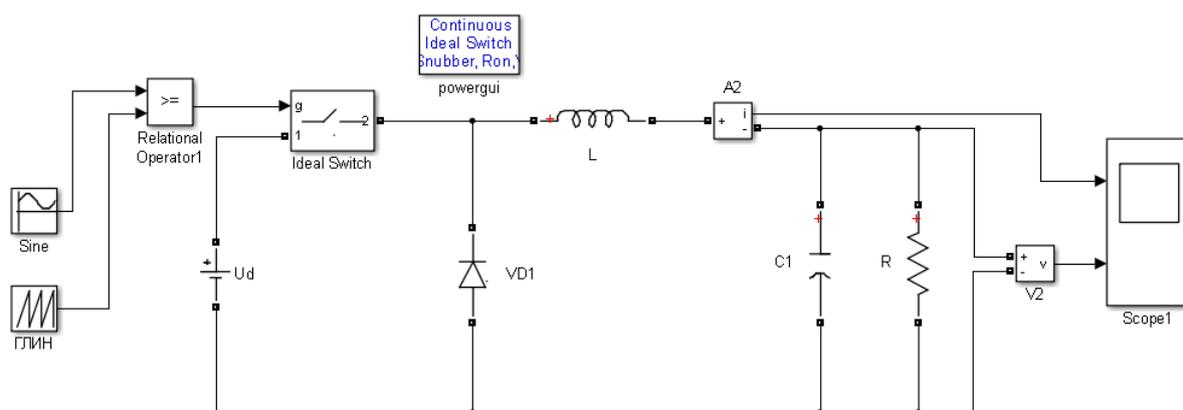


Рисунок 7.21 – Компьютерная модель ППН-1 в Simulink

ВНИМАНИЕ! Для проведения последующих измерений убедитесь, что в настройках осциллографа, во вкладке **History** установлена галочка на **Save data to workspace**. По умолчанию в поле **Variable name** стоит **ScopeData1**. Это позволит работать с результатами измерений в подпрограмме **FFT Analysis**.

Для примера, в настройках блока Sine, вместо f установим значение частоты равное 6000. Запускаем модель. После расчета открываем в блоке powergui вкладку **FFT Analysis** (рисунок 7.22).

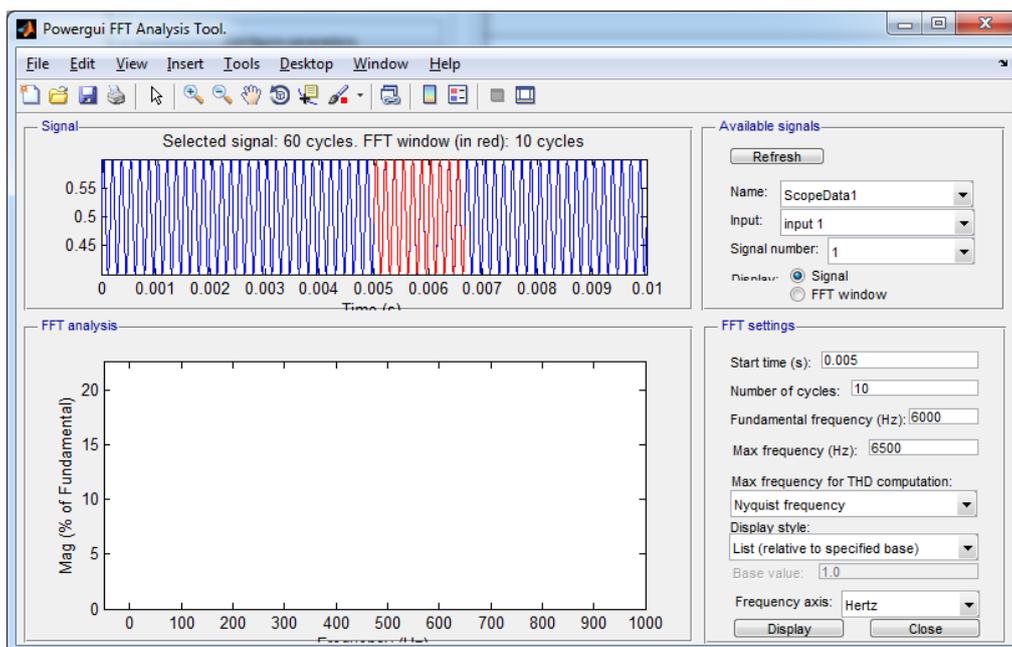


Рисунок 7.22 – Рабочее окно FFT Analysis

В окне FFT Analysis слева располагаются поля Signal, на котором отображается форма текущего сигнала, и поле FFT analysis, в котором представляются результаты разложения сигнала в ряд Фурье.

Поля справа:

Name – название функции, куда записывались данные осциллографа (по умолчанию ScopeData1);

Input – номер канала осциллографа;

Signal number – номер сигнала на канале осциллографа;

Start time – время с которого начинается выборка для разложения;

Number of cycles – количество периодов для разложения;

Fundamental frequency – частота сигнала;

Max. frequency – максимальная частота при разложении.

Остальные поля отвечают за представление данных разложения сигнала в ряд Фурье.

Чтобы получить значения $G(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ в точке $\omega = 2\pi 6000$ необходимо выполнить следующую последовательность действий.

Name: ScopeData

Input: Input 1

Signal number: 1

Start time: 0,005

Number of cycles: 10

Fundamental frequency: 6000

Max. Frequency: 6500

Max frequency for THD computation: Nyquist frequency

Display style: List (relative to specified base)

Base value: 1.0

Нажимаем кнопку Display

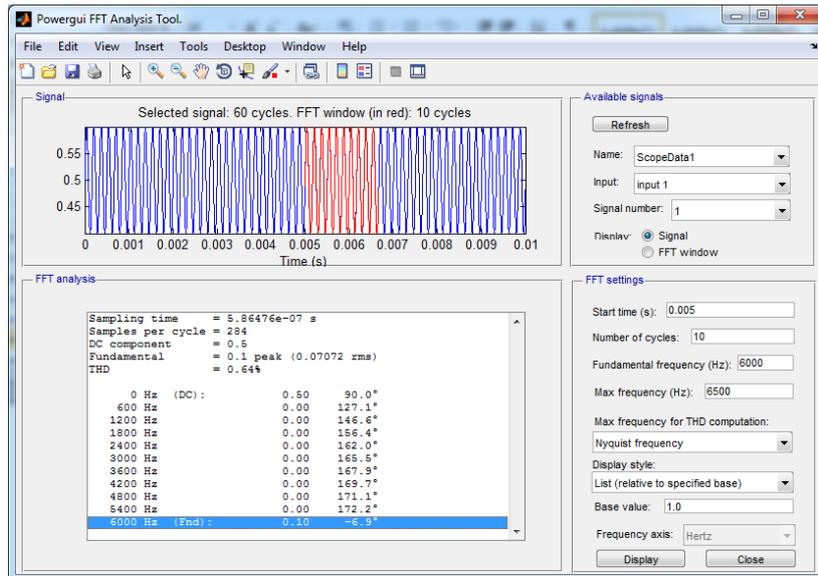


Рисунок 7.23 – Рабочее окно FFT Analysis input 1

Произошло разложение сигнала блока Sine, при этом на частоте 6000 Гц амплитуда гармоники равна 0,1, В, а ее фаза $-6,9^\circ$.

Меняем значение поля Input: Input 2.

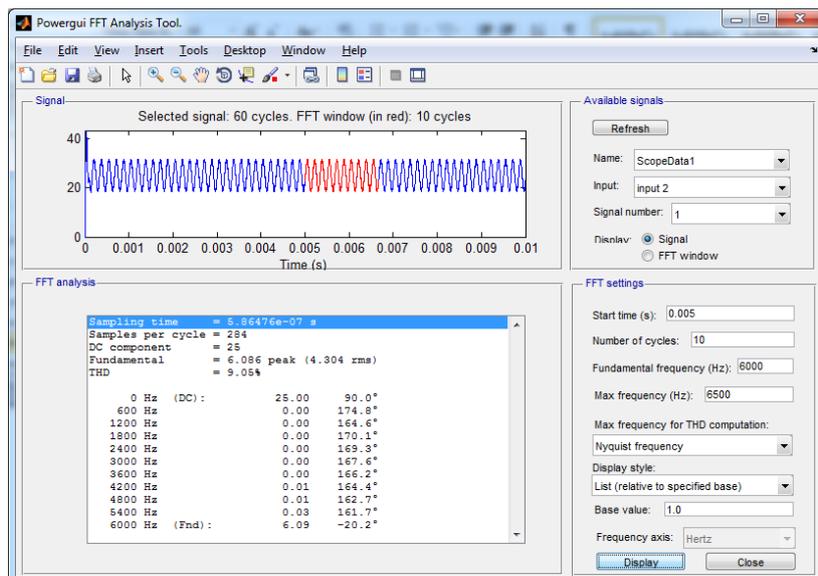


Рисунок 7.24 – Рабочее окно FFT Analysis input 2

Произошло разложение выходного сигнала, при этом на частоте 6000 Гц амплитуда гармоники равна 6,09 В, а ее фаза $-20,2^\circ$.

Для расчета величин (7.8a) и (7.9a) воспользуемся выражениями (7.6) и (7.7):

$$G(\omega) = 20 \log \frac{6,09}{0,1} = 35,68 \text{ дБ.} \quad (7.8a)$$

$$\varphi(\omega) = -20,2 + 6,9 = -13,3^\circ. \quad (7.2a)$$

Таким образом, мы получили одну точку ЛАЧХ и ЛФЧХ для частоты 6000 Гц. Используя описанную выше методику, были получены остальные точки частотных характеристик (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Измерения для построения частотных характеристик

f , Гц	A_B , В	φ_B ,	A_3 , В	φ_3	$G(\omega)$	$\varphi(\omega)$
100	5	-1,3	0,1	-1,1	33,9794	-0,2
200	5	-2,4	0,1	-2	33,9794	-0,4
300	5	-3,5	0,1	-2,9	33,9794	-0,6
400	5,01	-4,5	0,1	-3,8	33,99675	-0,7
500	5,01	-5,7	0,1	-4,8	33,99675	-0,9
600	5,01	-6,8	0,1	-5,7	33,99675	-1,1
700	5,01	-7,9	0,1	-6,6	33,99675	-1,3
800	5,02	-9	0,1	-7,5	34,01407	-1,5
900	5,02	-10,1	0,1	-8,5	34,01407	-1,6
1000	5,03	-11,8	0,1	-10	34,03136	-1,8
2000	5,1	-22,8	0,1	-19,1	34,1514	-3,7
3000	5,24	-34,3	0,1	-28,6	34,38663	-5,7
4000	5,44	-45,9	0,1	-38,1	34,71198	-7,8
5000	5,71	-57,6	0,1	-47,2	35,13272	-10,4
6000	6,08	-69,2	0,1	-55,9	35,67807	-13,3
7000	6,58	-82,2	0,1	-65,4	36,36452	-16,8
8000	7,23	265	0,1	-73,7	37,18277	-21,3
9000	7,79	247,7	0,1	-83,2	37,83075	-29,1
10000	8,19	228,2	0,1	268,3	38,26568	-40,1
20000	3,62	24	0,1	177	31,17417	-153
30000	1,21	-85,1	0,1	81,5	21,65571	-166,6
40000	0,62	184,5	0,1	-4,2	15,84783	-171,3

В таблице 7.1 приняты обозначения: f , Гц – частота входного сигнала в Гц; A_B , В – амплитуда выходного сигнала в В; φ_B – фаза выходного сигнала в электрических градусах; A_3 , В – амплитуда входного (задающего) сигнала в В; φ_3 – фаза входного сигнала в электрических градусах; $G(\omega)$ – коэффициент усиления в дБ, рассчитанный по выражениям (7.6) и (7.8а); $\varphi(\omega)$ – сдвиг фазы выходного сигнала относительно входного, рассчитанный по выражениям (7.7) и (7.9а);

Полученные частотные характеристики представлены на рисунках 7.25 и 7.26.

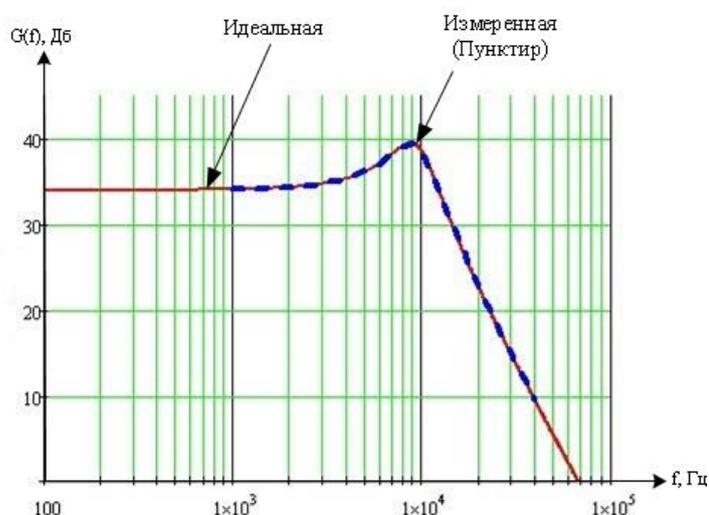


Рисунок 7.25 – ЛАЧХ НПН-1

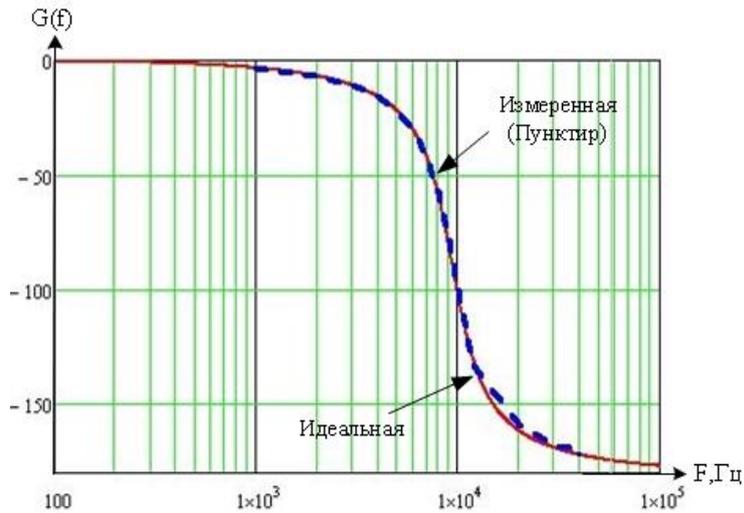


Рисунок 7.26 – ЛФЧХ НПН-1

При частоте ШИМ, заданной частотой ГЛИН, равной частоте 100000 Гц, частоту тестового сигнала, в соответствии с теоремой В.А. Котельникова [3], ограничиваем на уровне 40000 Гц, что меньше половины частоты ГЛИН. Теоретическая частотная характеристика, которая условно, и даже может быть неудачно, названа на рисунках 7.25 и 7.26 «идеальной» построена по известной аналитической модели импульсного преобразователя понижающего типа [6, 10]. Неплохое схождение характеристик в области средних частот подтверждает адекватность импульсной и усредненной моделей.

7.3.3 Разработка структурной схемы, замкнутой САУ на основе НПН понижающего типа

В данном разделе упрощенно описан процесс замыкания обратной связи импульсного преобразователя. Более подробное описание и математические выкладки приведены в соответствующей литературе по теории автоматического управления.

На рисунке 7.27 представлена упрощенная схема системы автоматического регулирования понижающего преобразователя с обратной связью.

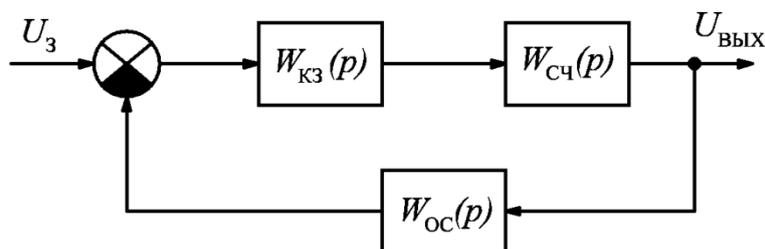


Рисунок 7.27 – Структурная схема САУ НПН-1

Здесь $W_{сч}(p)$ – линеаризованная передаточная функция силовой части преобразователя, которая зависит от положения рабочей точки (постоянной составляющей $U_{пост}$ сигнала управления на ее входе и напряжения питания U_d импульсного преобразователя на рис. 7.21); $W_{ос}(p)$ – передаточная функция цепи обратной связи, которая в простейшем случае представляет собой безынерционное звено с коэффициентом передачи, обеспечивающим согласование уровней выходного $U_{вых}$ и задающего U_3 напряжений (сигналов); $W_{кз}(p)$ – передаточная функция корректирующего звена (регулятор), которая выбирается или синтезируется с целью придания САУ необходимых статических и динамических характеристик [5, 7].

7.3.4 Компьютерная модель импульсного преобразователя с обратной связью и её исследование

В качестве корректирующего звена используем интегратор, что позволит обеспечить наклон ЛАЧХ (рисунок 7.25) и пересечение с осью абсцисс с углом -20 дБ/дек и наглядно показать влияние корректирующего звена на статические и динамические свойства САР.

Для реализации структуры на рисунке 7.21 необходимо блок Sine заменить на блок корректирующего звена с сумматором и задатчиком из библиотеки Simulink:

Continuous:

Integrator;

Math Operations:

Gain – устанавливаем значение 100, это позволит компенсировать коэффициент обратной связи;

Sum – устанавливаем один из входов сумматора на знак «-»;

Source:

Constant – устанавливаем значение 25

Выход блока Constant подключаем к отрицательному входу сумматора, а выход вольтметра V1 к положительному входу сумматора Sum. Выход сумматора подключаем ко входу интегратора Integrator1, выход которого подключаем ко входу усилителя Gain1. Выход усилителя Gain1 подключаем к блоку компаратора Comp, в окне настроек которого установлена функция $<=>$.

Результат описанных действий приведен на рисунке 7.28.

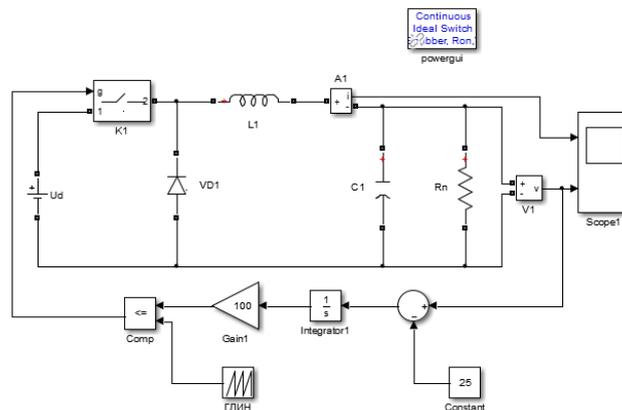


Рисунок 7.28 – Модель НПП-1 с обратной связью

Чтобы увеличить точность расчета, в окне настроек модели Simulation => Model Configuration Parameters установим:

Stop time (время окончания моделирования) – 0.004

Max. step size (максимальный шаг расчета) – $1e-8$

Relative tolerance (относительная сходимость) – $1e-7$

Результат моделирования представлен на рисунке 7.29.

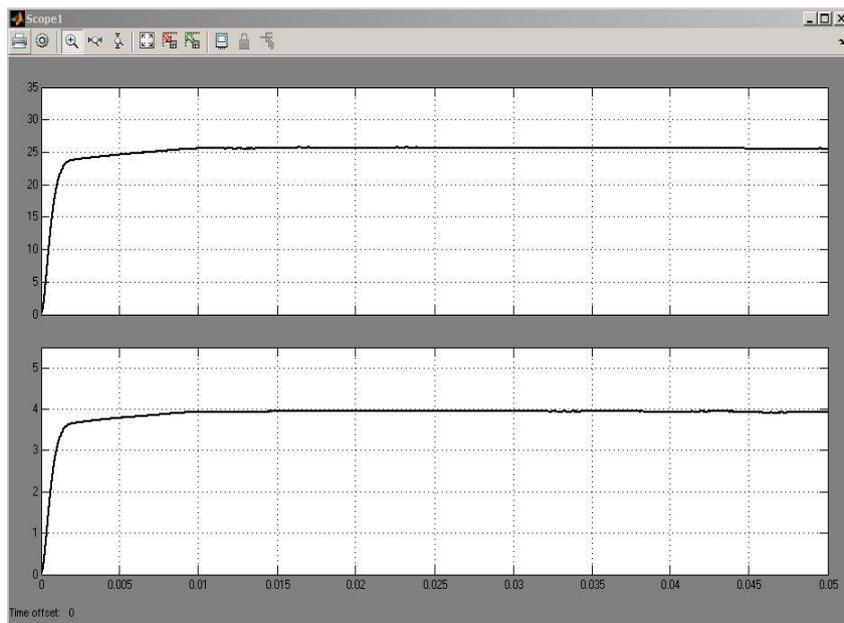


Рисунок 7.29 – Ток дросселя L1 и напряжение на конденсаторе C1

По осциллограммам, приведенным на рисунке 7.29, видно, что время переходного процесса составляет примерно 2 мс, перерегулирование отсутствует.

По осциллограммам на рисунке 7.30 можно определить пульсации тока и напряжения, которые составляют 33% и 2,3% соответственно.

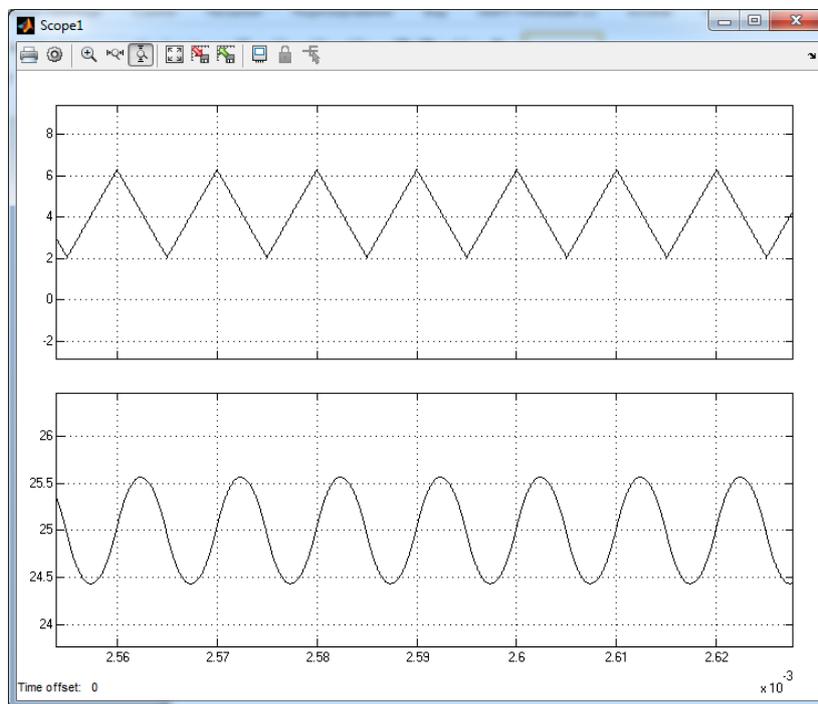


Рисунок 7.30 – Пульсации тока дросселя L1 и напряжения на конденсаторе C1

Переходный процесс, показанный на рисунке 7.29, излишне затянут, что, вероятнее всего связано с выбором не оптимального корректирующего звена. Над этим придется поработать и в этом нам поможет работа [11].

8 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ (ШИМ) В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Для исследования стабилизированных транзисторных преобразователей напряжения с широтно-импульсной модуляцией на современном научно-техническом уровне нужно знать: силовую электронику [6], теорию автоматического управления [7], цифровые системы управления [8] и принцип работы подчиненных систем автоматического регулирования (САР) [9]. И что самое замечательное все это можно проделать в среде MATLAB. Для исследования нужных характеристик таких преобразователей необходимо построить их имитационные модели, что и рассматривается в этом разделе.

8.1 Теоретические сведения по транзисторным преобразователям с модулятором ШИМ-2

Функциональная схема стабилизированного транзисторного преобразователя на основе понижающего преобразователя с ШИМ-2 приведена на рисунке 8.1. Она представляет собой понижающий преобразователь, включающий в себя: источник E входного напряжения; силовой транзисторный ключ $VT1$ с драйвером $Др$ и обратный диод $VD1$, обеспечивающие периодическое подключение и отключение источника E к сглаживающему LC-фильтру. Фильтр LC состоит из дросселя L и выходного конденсатора C , параллельно которому подключен датчик напряжения (ДН) и нагрузка преобразователя с эквивалентным активным сопротивлением R . Управляющий вход транзистора $VT1$ подключен к выходу $Y_{рwm}$ широтно-импульсного модулятора (ШИМ) или (PWM в английской транскрипции).

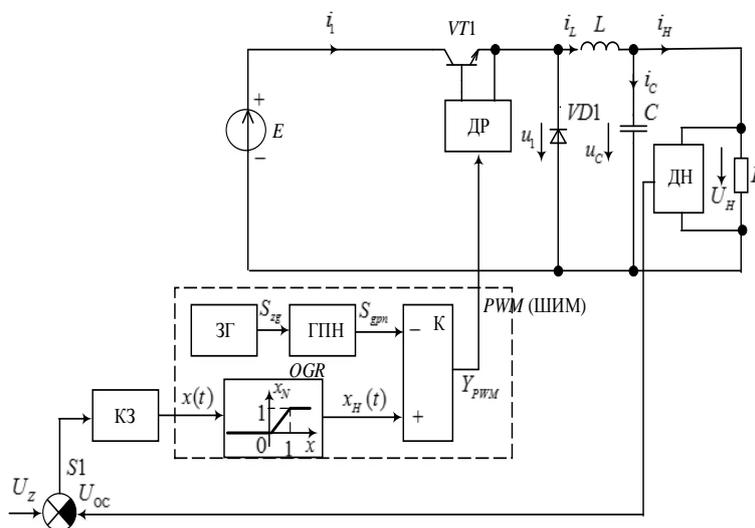


Рисунок 8.1 – Функциональная схема
стабилизированного транзисторного преобразователя

На вход модулятора PWM подан входной сигнал модулятора $x(t)$, который является сигналом обратной связи, полученным в сумматоре $S1$ из задающего сигнала (задатчика) U_z и сигнала U_{oc} обратной связи от датчика ДН. Для обеспечения статических и динамических свойств рассматриваемой системы автоматического регулирования (САР) в контур регулирования напряжения включено корректирующее звено (КЗ), параметры которого зависят как технических требований на САР по точности и быстродействию, так и от самого объекта регулирования САР. Объектом регулирования в данном случае является, собственно, сам понижающий преобразователь и ШИМ модулятор (PWM). Для изучения объекта управления САР

с разомкнутой обратной связью удобно разомкнуть эту связь после корректирующего звена КЗ, как показано на рисунке 8.1.

Параметры силовой части понижающего преобразователя: диапазон изменения входного напряжения E ; диапазон изменения сопротивления R нагрузки; индуктивность дросселя L ; емкость конденсатора C ; частота переключения и тип транзистора $VT1$ и диода $VD1$ должны быть известны из ТЗ или по результатам энергетического расчета понижающего преобразователя. Такой расчет вы уже проделывали в курсе «Полупроводниковые ключи в силовых схемах» или в «Энергетической (силовой) электронике» [6].

Параметры силовой части понижающего преобразователя: диапазон изменения входного напряжения E ; диапазон изменения сопротивления R нагрузки; индуктивность дросселя L ; емкость конденсатора C ; частота переключения и тип транзистора $VT1$ и диода $VD1$ должны быть известны нам по результатам энергетического расчета понижающего преобразователя. Известна вам в общем также из этих же курсов и схема модулятора. Однако модуляторы являются предметом углубленного изучения в курсе «Импульсно-модуляционные системы», поэтому остановимся на них подробнее.

8.2 Структура ШИМ и функции ее основных элементов

Функциональная схема модулятора ШИМ-2, показана внутри блока ШИМ на рисунке 8.1 и состоит из задающего генератора (ЗГ) с выходным сигналом S_{zg} , период работы которого равен T_{zg} , а частота $f_{zg} = 1/T_{zg}$, генератора пилообразного напряжения (ГПН) с выходным сигналом S_{gpn} , амплитуду которого для определенности примем равной единице. Причем генератор ГПН синхронизирован генератором ЗГ так, что частота пилообразного напряжения f_i равна частоте f_{zg} . Сигнал S_{zg} подается на инвертирующий вход компаратора К, выход $Y_{pwm}(t)$ которого является выходом модулятора ШИМ-2. При этом на неинвертирующий вход компаратора К подается нормированный сигнал (нормированное сообщение) $x_N(t)$, который получается из входного сигнала $x(t)$ путем его нормирования. Математически нормирование можно записать как $x_N(t) = x(t)/X_{max}$, где X_{max} – максимальное значение входного сигнала $x(t)$. Понятно, что максимальное значение нормированного сигнала не будет превышать единицы.

Входной сигнал $x(t)$ зададим в виде

$$x(t) = X_0 + X_m \cdot \sin(\Omega t + \varphi_0), \quad (8.1)$$

где X_0 – постоянная составляющая сообщения; X_m – амплитуда переменной составляющей сообщения (амплитуда синусоиды с круговой частотой $\Omega_c = 2\pi \cdot f_c$ и начальной фазой φ_0). Здесь f_c частота переменной составляющей сигнала.

Если ввести понятие глубины модуляции $\mu = X_m/X_0$, то входной сигнал (8.1) запишется в виде

$$x(t) = X_0 + \mu \cdot X_0 \cdot \sin(\Omega t + \varphi_0). \quad (8.2)$$

Изменяя глубину модуляции μ в пределах от 0 до 1 можно изменять входной сигнал $x(t)$ от 0 до $2X_0$. Поскольку мы договорились, что амплитуда сигнала S_{gpn} генератора пилообразного напряжения равна 1, то и максимальный нормированный сигнал $x_N(t)$ не должен превышать единицы, чтобы не допускать «перемодуляции» или насыщения модулятора. Для этого входной сигнал пропускается через звено ограничения OGR , ограничивающее нормированный сигнал $x_N(t)$ на уровне 1. Звено OGR представляет собой усилитель с единичным коэффициентом усиления и нелинейностью типа насыщение на уровне единицы, при превышении входным сигналом уровня единицы.

Чтобы звено OGR не «вмешивалось в работу модулятора», необходимо чтобы выполнялось условие $X_0 < (1 + \mu)$, или

$$X_0 + X_m < 1. \quad (8.3)$$

Например, при $X_0 = 1/2$ и $X_m = 1/2$, модулятор не будет насыщаться при $0 < \mu < 1$.

Полагая $X_m = 0$, можно построить временные диаграммы работы модулятора при постоянном входном сигнале $x(t) = X_0$ и построить статическую модуляционную характеристику

$\gamma = f(X_0)$, γ – относительная длительность импульса в выходном сигнале $Y_{pwm}(t)$, равная отношению длительности импульса t_i к периоду T_i повторения импульсов генератора ЗГ.

Временные диаграммы работы модулятора ШИМ-2 показаны на рисунке 8.2. Из рисунка 8.2 видно, что импульсной несущей, на которую накладывается информация сообщения – это последовательность прямоугольных импульсов, следующих с частотой генератора ГПН. Ширина (длительность) этих импульсов изменяется в соответствии с сообщением. Поскольку при постоянном входном сигнале, ширина импульсов не изменяется, то работа модулятора в этом режиме называется широтно-импульсным регулированием (ШИР).

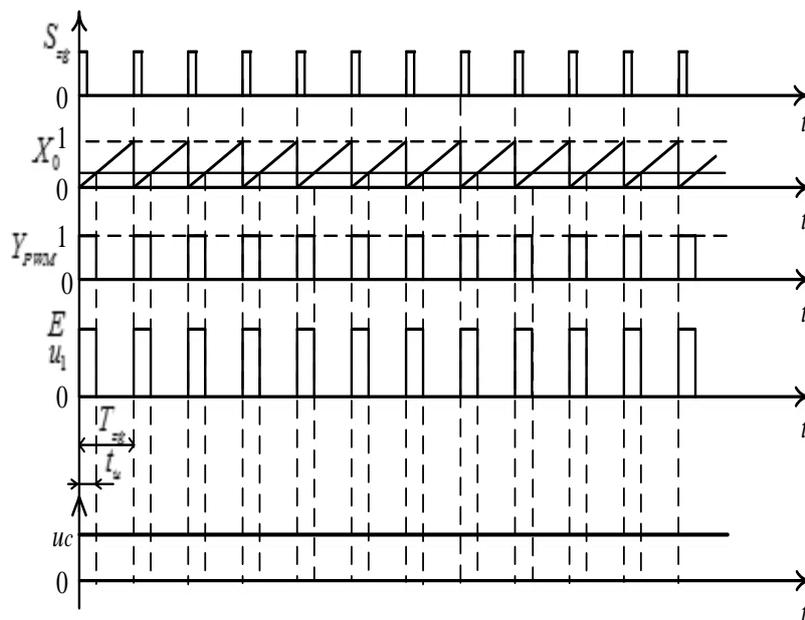


Рисунок 8.2 – Временные диаграммы работы модулятора ШИМ-2

Транзистор $VT1$, включаясь и выключаясь по сигналу $Y_{pwm}(t)$ модулятора, фактически лишь увеличивает сигнал $Y_{pwm}(t)$ по амплитуде, преобразовывает его в напряжение и подает на вход силового LC -фильтра. Таким образом, транзисторный преобразователь (транзистор $VT1$ и диод $VD1$) сам играет роль амплитудного модулятора и при необходимости его можно представить амплитудным модулятором несущего сигнала $Y_{pwm}(t)$ входным напряжением E . При этом этот амплитудный модулятор можно представить в виде функционального звена умножения. Действительно при $Y_{pwm}(t) = 1$ входное напряжение фильтра $u_1 = E \cdot 1 = E$, а при $Y_{pwm}(t) = 0$, $u_1 = E \cdot 0 = 0$. Таким образом точно выполняется равенство $u_1 = E \cdot Y_{pwm}(t)$, если сигнал $Y_{pwm}(t)$ принимает значения 0 или 1.

8.3 Сведения, необходимые для построения имитационной модели неперверсивного модулятора ШИМ-2

Для исследования работы модулятора при изменяющемся сигнале входной сигнал задаем в виде (8.2) $x(t) = X_0 + \mu \cdot X_0 \cdot \sin(\Omega_c t + \varphi_0)$, принимая во внимание условие (8.3) $X_0 + X_m < 1$.

Построение выходного сигнала $Y_{pwm}(t)$ при переменном сигнале показано на рисунке 8.3. Из сравнения рисунок 8.2 и рисунок 8.3 видно, что импульсной несущей, в этом случае можно считать импульсную последовательность с относительной длительностью импульсов γ_0 , которая определяется постоянной составляющей X_0 входного сигнала $x(t)$. Модуляцию в этом случае можно рассматривать как сумму двух действий. Первое действие – это изменение параметров несущей (γ_0) под действием X_0 , а второе действие – это нанесение переменной составляющей сообщения $\mu \cdot X_0 \cdot \sin(\Omega_c t + \varphi_0)$ на импульсную несущую. Построение

временных диаграмм при этом более трудоемкое, чем на постоянном сигнале, а аналитическое исследование, с помощью метода деформации немодулированной импульсной последовательности, также громоздко [12].

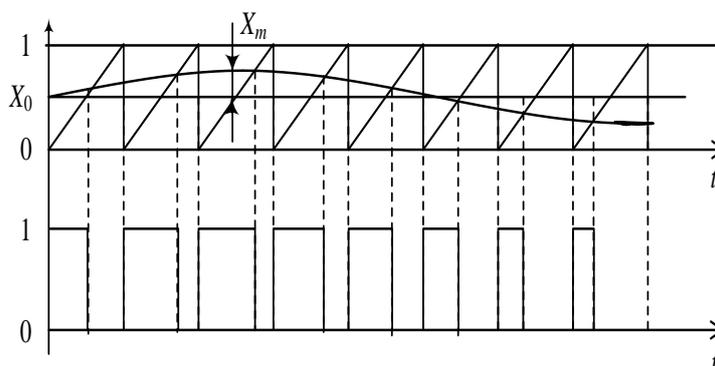


Рисунок 8.3 – Временные диаграммы работы модулятора ШИМ при входном сигнале $x(t) = X_0 + \mu \cdot X_0 \cdot \sin(\Omega_c t + \varphi_0)$

Следует уточнить, что значит исследовать модулятор? Например, можно исследовать характеристики передачи сигнала через модулятор. Какие это характеристики?

Коэффициент передачи модулятором постоянной составляющей сигнала k_{m0} , определенный, например, как

$$k_{m0} = Y_{0pwm}(X_0)/X_0, \quad (8.4)$$

где $Y_{0pwm}(X_0)$ – постоянная составляющая выходного сигнала.

X_0 – постоянная составляющая входного сигнала

Гармонический состав выходного сигнала $Y_{pwm}(X_0)$ (его частотный спектр), характеризующий способность модулятора генерировать искажающие (не нужные для модуляции) гармоники при изменении постоянной составляющей X_0 входного сигнала.

Коэффициент передачи модулятором переменной составляющей сигнала k_{mf} , определенный, например, как отношение

$$k_{mf} = Y_{1pwm}(X_0, X_m, f_i/f_c, \varphi_0) / X_m;$$

$$\varphi_1 - \varphi_0 = f(X_0, X_m, f_i/f_c, \varphi_0),$$

где $Y_{1pwm}(X_0, X_m, f_i/f_c, \varphi_0)$ – амплитуда первой гармоники выходного сигнала $Y_{1pwm}(t)$; φ_1 – фаза первой гармоники выходного сигнала $Y_{1pwm}(t)$.

Гармонический состав выходного сигнала $Y_{pwm}(t)$ (его частотный спектр), характеризующий способность модулятора генерировать искажающие (не нужные для модуляции) гармоники при изменении амплитуды X_m , частоты f_c переменной составляющей входного сигнала, а также от кратности f_i/f_c частот квантования модулятора.

Рассмотренные характеристики модулятора обеспечивают статические и динамические свойства модулятора, а значит и систем, в которых он будет применяться. А частотный состав генерируемых модулятором гармоник характеризует его как генератор внутренних помех, которые, попадая в контур управления систем с обратной связью, могут привести к нежелательным колебаниям в выходном сигнале системы.

Указанные исследования модулятора целесообразно проводить на имитационных моделях, построенных в среде MATLAB Simulink, а часто и совместно с имитационной моделью силовой части преобразователя.

Эти модели, отражающие статические и динамические свойства модуляторов, в дальнейшем можно будет применять при построении имитационных моделей силовых преобразователей, которые лежат в основе курсового проекта по импульсно – модуляционным системам.

При построении имитационных моделей модуляторов ШИМ главное внимание нужно уделить приборам, способным измерить нужные величины измеряемых сигналов, а также автоматизации измерений и испытаний, потому что рутинные измерения, например, частотных характеристик, могут занимать слишком много времени. А коэффициенты передачи модулятора на переменном токе с учетом фазовых сдвигов между выходными и входными сигналами это и есть амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики модуляторов.

8.4 Построение имитационной модели неперевсивного модулятора ШИМ-2 в среде моделирования MATLAB Simulink

Модулятор в программе Matlab Simulink можно сделать в виде блока, на вход которого подаётся постоянный сигнал γ , определяющий коэффициент заполнения, а на выходе коммутационная функция F_k [13] в виде ШИМ сигнала. Существует несколько способов формирования ШИМ сигнала, их разновидности описаны в [12]. В программе Matlab Simulink реализуем «инвертированный» ШИМ 2 рода, принцип действия которого отражён на рисунке 8.4. Период импульсов T задаётся пилообразным сигналом, а длительность импульса $t_{и}$ определяется напряжением корректирующего устройства.

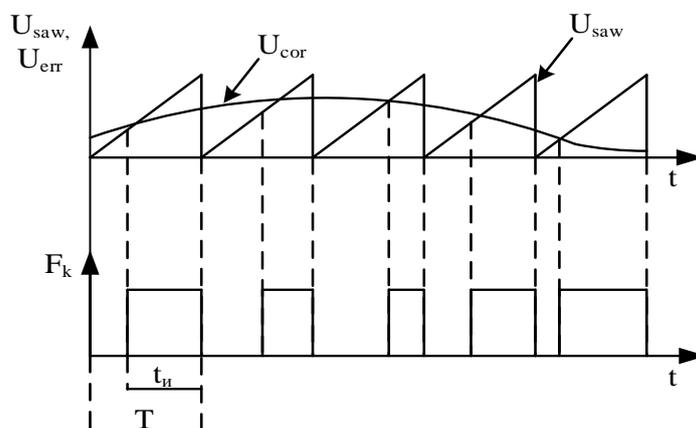


Рисунок 8.4 – ШИМ второго рода

В библиотеке Simscape имеется генератор линейного пилообразного напряжения Sawtooth Generator, однако амплитуда в нем изменяется в диапазоне от -1 до 1 . Соответственно для приведения к нужному диапазону (от 0 до 1) необходимо сместить сигнал вверх на 1 и поделить его на 2 , данные операции выполняются с помощью блока сумматора Sum, констант Const1 и Const2 со значениями 1 и 2 соответственно и блока деления Divide (рис. 8.5).

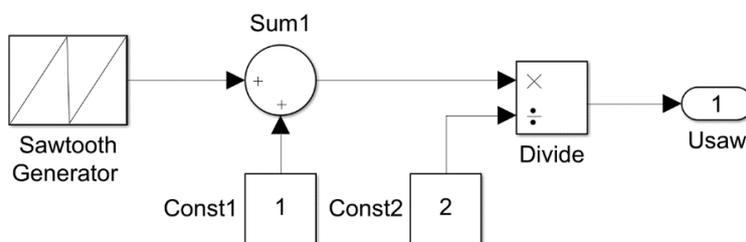


Рисунок 8.5 – Схема генератора пилообразного напряжения в диапазоне от 0 до 1

Схема на рисунке 8.5 маскируется в подсистему с названием Saw, о том, как это сделать подробно рассказано в [1]. Частота пилообразного напряжения, а соответственно и ШИМ сигнала задаётся в параметрах этого блока.

Сигнал ШИМ должен принимать высокий уровень в моменты, когда значение пилообразного напряжения выше напряжения ошибки. Такой алгоритм работы можно реализовать с помощью компаратора. Отдельного блока компаратора в Simulink нет, однако его функцию можно реализовать на блоке Relational Operator (Comparator на рисунке 8.6). Составляющие блока ШИМ в программе Matlab Simulink приведены на рисунке 8.6. Соответственно на вход этого блока подаётся гамма γ и пилообразное напряжение U_{saw} , а на выходе уже формируется ШИМ сигнал.

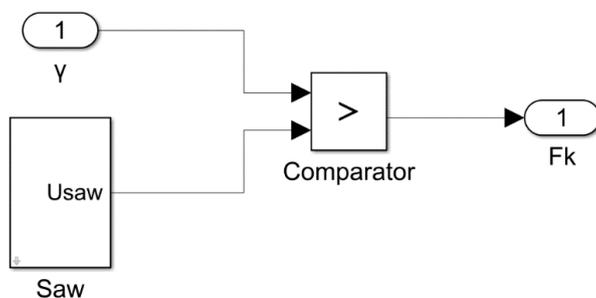


Рисунок 8.6 – Реализация блока ШИМ

Схема на рисунке 8.6 с помощью маскирования выделяется в отдельный функциональный блок PWM (рис. 8.7) с одним входом и выходом. При этом в настройках этого блока задаётся частота ШИМ сигнала.

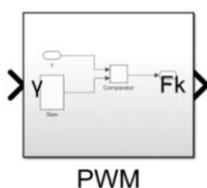


Рисунок 8.7 – Блок формирования ШИМ сигнала

8.5 Методика получения частотных характеристик разомкнутого объекта управления на основе понижающего преобразователя инструментальными средствами MATLAB

На рисунке 8.8 приведена разомкнутая имитационная модель понижающего преобразователя, собранная на элементах библиотеки Simscape/Specialized Power Systems. В ней приняты следующие допущения: сопротивление открытого ключа V_T равно 20 мОм, падение на открытом диоде V_D составляет 0.8 В, сопротивление дросселя $r_L = 10$ мОм, остальные элементы идеальны и их номиналы соответствуют рассчитанным.

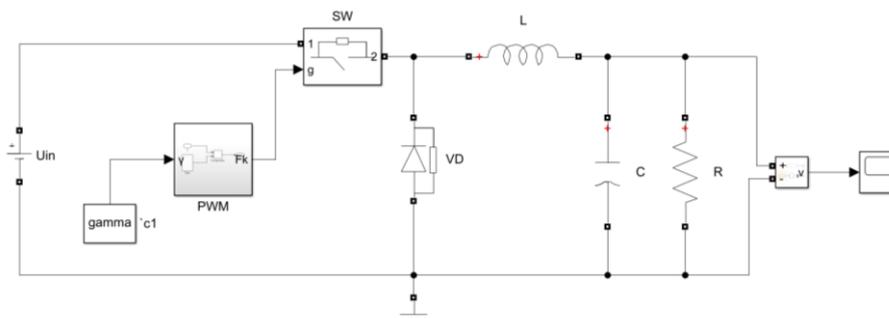


Рисунок 8.8 – Имитационная модель понижающего преобразователя в программе Matlab Simulink

Для того чтобы инструментальными средствами MATLAB снять частотные характеристики преобразователя необходимо выполнить следующие действия [14 стр. 164–167]:

1. С помощью того же инструмента Linear Analysis настраиваем параметры синусоидального воздействия (Sinestream) в точке inr (выбираем единицы измерения частоты Гц; выбираем диапазон частот от 10 до 50 кГц; выбираем в этом диапазоне тридцать точек по частоте; задаем число периодов входного сигнала, например семь, при котором гарантированно закончится переходной процесс; выбираем величину амплитуды переменной составляющей входного сигнала в пределах 0,01–0,1 от величины постоянной составляющей; выбираем число периодов, на которых вычисляется отклик системы, равным, например, сорока, причем нужно помнить, что в выбранное число периодов входит и время переходного процесса, на которое мы выделили семь периодов.

2. Запускаем процесс моделирования, при котором программа Matlab, с помощью настроенного в пункте 2 синусоидального воздействия, вычисляет частотные характеристики.

3. По полученным частотным характеристикам запускаем идентификацию имитационной модели и ее описания в виде передаточной функции, для которой необходимо указать количество полюсов и нулей, если требуется.

4. Идентифицированная передаточная функция сохраняется в рабочем пространстве Workspace в виде файла, который можно сохранить и далее работать с ним, а значит и с передаточной функцией, как с переменной. С помощью этой переменной можно определить любые интересующие исследователя параметры.

На рисунке 8.9 представлена ЛАЧХ и ЛФЧХ понижающего преобразователя в программе Matlab Simulink.

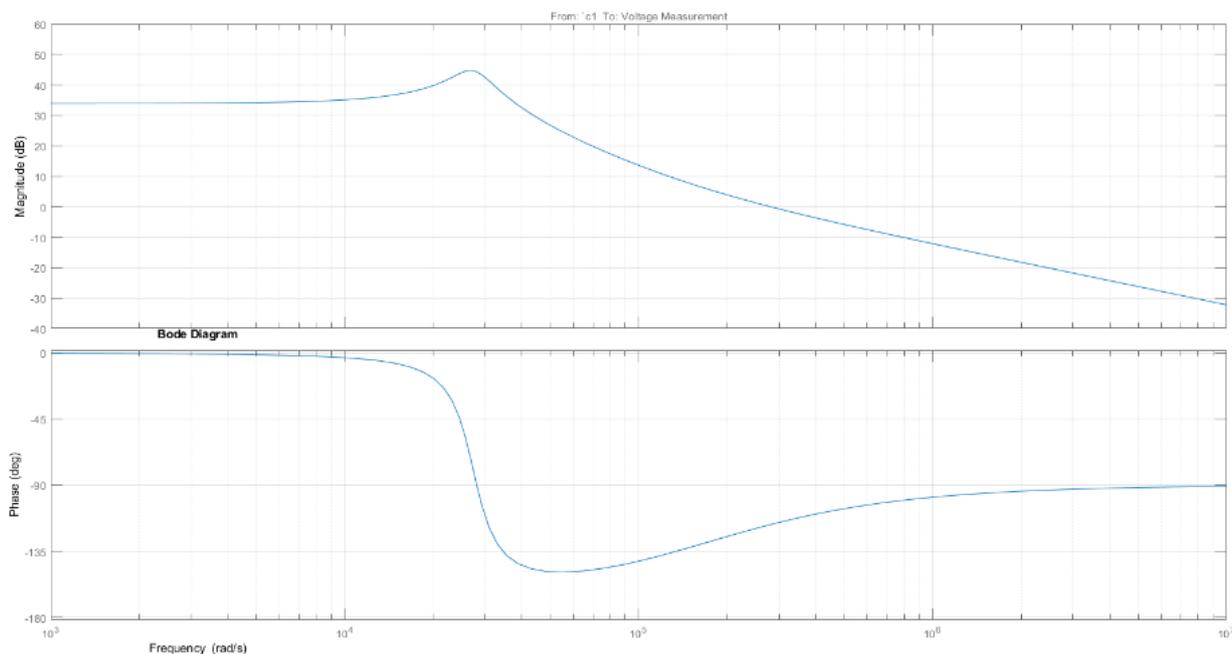


Рисунок 8.9 – ЛАЧХ и ЛФЧХ понижающего преобразователя

8.6 Задания на практические и самостоятельные занятия для изучения работы модулятора ШИМ-2

Настоящие задания помогут сформировать и закрепить практические навыки работы с ШИМ-2 в среде MATLAB Simulink.

8.6.1 Задание № 1 на практические и самостоятельные занятия для изучения работы модулятора ШИМ-2 при постоянном входном сигнале $x(t) = X_0$

1. Построить в среде MATLAB Simulink имитационную модель модулятора ШИМ-2.
2. Получить осциллограмму выходного сигнала модулятора ШИМ-2 при входном сигнале $x(t) = X_0$. $X_0 = 0,1 \text{ В}; 0,25 \text{ В}; 0,5 \text{ В}; 0,75 \text{ В}; 0,9 \text{ В}$.
3. Построить амплитудно- фазо- частотный спектр (АФЧС) выходного сигнала модулятора ШИМ-2.
4. Рассчитать полную мощность сигнала модулятора ШИМ-2.
5. Рассчитать по равенству Парсеваля число нижних гармоник, мощность которых составляет 90% от полной мощности сигнала.
6. Оформить и сдать отчет.

8.6.2 Задание № 2 на практические и самостоятельные занятия для изучения работы модулятора ШИМ-2 при входном сигнале равном сумме постоянной и переменной составляющей $x(t) = X_0 + \mu \cdot X_0 \cdot \sin(2\pi \cdot q \cdot (f_c/f_i) \cdot f_c \cdot t + \varphi_0)$

1. Построить в среде MATLAB Simulink имитационную модель модулятора ШИМ-2.
2. Получить осциллограмму выходного сигнала модулятора ШИМ-2 при входном сигнале $x(t) = X_0 + \mu \cdot X_0 \cdot \sin(2\pi \cdot q \cdot (f_c/f_i) \cdot f_c \cdot t + \varphi_0)$. $X_0 = 0,1 \text{ В}; 0,25 \text{ В}; 0,5 \text{ В}; 0,75 \text{ В}; 0,9 \text{ В}$ – постоянная составляющая входного сигнала модулятора;
 $\mu = 1; 0,75; 0,5; 0,25; 0,1$ – глубина модуляции;
 $q = f_i / f_c$ – кратность квантования;
 f_c – частота сигнала;
 f_i – частота квантования;
 φ_0 – начальная фаза входного сигнала модулятора.
3. Построить амплитудно- фазово- частотный спектр (АФЧС) выходного сигнала модулятора ШИМ-2.
4. Рассчитать полную мощность сигнала модулятора ШИМ-2.
5. Рассчитать по равенству Парсеваля число нижних гармоник, мощность которых составляет 90% от полной мощности сигнала.
6. Оформить и сдать отчет.

8.6.3 Задание № 3 на практические и самостоятельные занятия для изучения спектра выходного напряжения на входе и выходе фильтра (на примере понижающего преобразователя)

1. Рассчитать параметры понижающего преобразователя.
2. Построить в среде MATLAB Simulink имитационную модель понижающего преобразователя с модулятором ШИМ-2.
3. Получить осциллограмму выходного напряжения при входном сигнале $x(t) = X_0$.
4. Найти спектр напряжения на входе фильтра.
5. Найти спектр напряжения на выходе фильтра. Сравнить полученные спектры.
6. Оформить и сдать отчет.

8.6.4 Задание № 4 на практические и самостоятельные занятия для изучения методики снятия амплитудно-фазово-частотных характеристик (АФЧХ) по «точкам» (на примере понижающего преобразователя)

1. Рассчитать параметры понижающего преобразователя.
2. Построить в среде MATLAB Simulink имитационную модель понижающего преобразователя с модулятором ШИМ-2.

3. Снять «вручную» 3 или более точек АФЧХ.
4. Нанести эти 3 или более точек на плоскость ЛАЧХ.
5. Снять ЛАЧХ инструментальными средствами MATLAB Simulink.
6. Оформить и сдать отчет.

**8.6.5 Контрольные вопросы к заданиям на практические
и самостоятельные занятия при изучении работы модулятора**

1. Что такое нереверсивный модулятор ШИМ-2?
2. Запишите тестовый сигнал для исследования нереверсивного модулятора ШИМ-2.
3. Дать определение и графически изобразить статическую амплитудную характеристику нереверсивного модулятора ШИМ-2.
4. Дать определение и графически изобразить статическую модуляционную характеристику нереверсивного модулятора ШИМ-2.
5. Как определить частотный спектр выходного сигнала нереверсивного модулятора ШИМ-2 при постоянном тестовом сигнале $x(t) = X_0$.
6. Как определить частотный спектр выходного сигнала нереверсивного модулятора ШИМ-2 при тестовом сигнале с постоянной и переменной составляющими $x(t) = X_0 + \mu \cdot X_0 \cdot \sin(\Omega_0 t + \varphi_0)$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
2. Мелешин, В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
3. Кобзев, А. В. Модуляционные источники питания РЭА / А. В. Кобзев, Г. Я. Михальченко, Н. М. Музыченко. – Томск : Радио и связь, 1990. – 335 с.
4. Калинин, Р. Г. Выбор корректирующего звена резонансного преобразователя на основе экспериментальной АЧХ по управляющему воздействию / Р. Г. Калинин, А. В. Кобзев, В. Д. Семенов, В. А. Федотов // Доклады ТУСУРа. – 2013. – №4(30). – С. 91–95.
5. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб. : Профессия, 2007. – 752 с.
6. Кобзев, А. В. Энергетическая электроника : учеб. пособие / А. В. Кобзев, Б. И. Коновалов, В. Д. Семенов. – Томск : Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2010. – 164 с.
7. Коновалов, Б. И. Теория автоматического управления : учеб. методическое пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. – Томск : Факультет дистанционного обучения, ТУСУР, 2010. – 162 с.
8. Мелешин, В. И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В. И. Мелешин, Д. А. Овчинников. – М. : Техносфера, 2011. – 576 с.
9. Слежановский, О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с., ил.
10. Белов, Г. А. Системы управления полупроводниковыми преобразователями : монография / Г. А. Белов. – Чебоксары : ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2023. – 284 с. – ISBN 978-5-7677-3589-1. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/388808> (дата обращения: 02.06.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
11. R. Sheehan, L. Diana. Switch-mode power converter compensation made easy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://valvolodin.narod.ru/articles/slup340_ru.pdf (дата обращения: 02.06.2024).
12. Кобзев, А. В. Импульсно-модуляционные системы: учеб. пособие / А. В. Кобзев, Г. Я. Михальченко, А. С. Дякин, В. Д. Семенов. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2015. – 193 с.
13. Кобзев, А. В. Применение метода коммутационных разрывных функций для построения математических моделей силовых преобразователей / А. В. Кобзев, В. Д. Семенов, Е. К. Фединых // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), Ч.2. – С. 58–63.
14. Зазыгин, А. И. Частотные характеристики малосигнальной модели инвертирующего импульсного регулятора напряжения / А. И. Зазыгин, Д. И. Зазыгин, И. Е. Гедзенко, Д. Б. Бородин, В. Д. Семенов // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 164–167. – Режим доступа: <https://storage.tusur.ru/files/133546/essu-19-part-1new.pdf> (дата обращения: 02.06.2024).