

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ О.В.Непомнящий

« _____ » _____ 20 ____ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

**Комплекс программ для исследования
систем электропитания**

Руководитель

_____ проф., д-р техн. наук С. А. Бронов
подпись дата должность, ученая степень

Выпускник

КИ18-07Б _____ В. В. Войченко
подпись дата

Нормоконтролер

_____ проф., д-р техн. наук С. А. Бронов
подпись дата должность, ученая степень

Красноярск 2022

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ О. В. Непомнящий

« ____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Студенту Войченко Виталию Владиславовичу
Фамилия, имя, отчество

Группа КИ18-07Б **Направление** 09.03.01
номер код

Информатика и вычислительная техника
наименование

Тема выпускной квалификационной работы

Комплекс программ для исследования систем электропитания

Утверждена приказом по университету № 7914/с от 26.05.22

Руководитель ВКР С. А. Бронов, профессор, руководитель НУЛ САПР каф.
инициалы, фамилия, должность, учёное звание, место работы

ВТ ИКИТ СФУ _____

Исходные данные для ВКР

Методические указания руководителя ВКР, публикации по теме работы.

Перечень разделов ВКР

Анализ предметной области, постановка задачи исследования, выбор методов исследования и инструментальных средств, разработка алгоритмов и их программная реализация, тестирование разработанной системы.

Перечень графического материала

Слайды презентации с математическими моделями, схемами алгоритмов и результатами работы разработанной системы.

Руководитель ВКР _____ С. А. Бронов
подпись

Задание принял к исполнению _____ В. В. Войченко
подпись

« _____ » _____ 20 ____ г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа на тему «Комплекс программ для исследования систем электропитания» выполнена в научно-учебной лаборатории систем автоматизированного проектирования кафедры вычислительной техники института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. Содержит 90 страниц текстового документа, 25 иллюстраций, 3 таблицы, 6 приложений, 10 использованных источников.

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ, СЭП, СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, MATHCAD, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Объект исследования — процесс автоматизированного проектирования систем электропитания.

Объект разработки — комплекс программ для решения задач автоматизированного проектирования систем электропитания в среде MathCAD14.

Цель работы — разработка и программная реализация алгоритмов моделирования систем электропитания постоянного и переменного тока на основе универсальной модели транзисторного коммутатора с различной степенью детализации.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы разработано программное обеспечение в виде рабочих листов MathCAD14, обеспечивающее исследование систем электропитания с учётом и без учёта внутренних параметров транзисторов и диодов транзисторного коммутатора.

Результаты работы предназначены для автоматизированного рабочего места электромеханика (АРМ ЭМ), создаваемого в НУЛ САПР кафедры вычислительной техники ИКИТ СФУ.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Проблематика моделирования систем электропитания.....	8
1.1 Общие принципы систем электропитания в виде транзисторных коммутаторов	8
1.2 Выбор инструментальных средств для разработки комплекса программ	14
1.3 Цель и задачи работы.....	15
Выводы по разделу 1.....	16
2 Методическое и математическое обеспечение элементов систем электропитания.....	17
2.1 Математическая модель транзисторно-диодного ключа с учётом вольтамперных характеристик транзистора и диода.....	17
2.2 Модель транзисторно-диодного ключа с переменными структурой и параметрами	23
2.3 Математическая модель транзисторного коммутатора	25
2.4 Математическая модель широтно-импульсного преобразователя	26
2.5 Математическая модель широтно-импульсного модулятора по синусоидальному закону.....	31
2.6 Математическая модель двигателя постоянного тока для использования совместно с широтно-импульсным преобразователем.....	36
Выводы по разделу 2.....	37
3 Комплекс программ для моделирования систем электропитания	38
3.1 Структура разработанного комплекса программ	38
3.2 Состав разработанных функций	39
3.3 Программа для моделирования широтно-импульсного преобразователя на основе транзисторного коммутатора на примере цепи с RL-нагрузкой...	44
3.4 Программа для моделирования транзисторного коммутатора на примере двигателя постоянного тока	48
Выводы по разделу 3.....	48

Заключение	49
Сокращения.....	50
Список использованных источников	51
ПРИЛОЖЕНИЕ А Рабочие листы MathCAD. Модель ШИП и однофазной RL-нагрузки.....	53
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Рабочие листы MathCAD. Библиотека. Модель транзисторно-диодного ключа.....	65
ПРИЛОЖЕНИЕ В Рабочие листы MathCAD. Библиотека. Модель широтно-импульсного модулятора.....	67
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Рабочие листы MathCAD. Библиотека. Модель двигателя постоянного тока и механической нагрузки	70
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Рабочие листы MathCAD. Модель системы «Широтно-импульсный преобразователь – двигатель постоянного тока»	71
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Рабочие листы MathCAD. Модель «Синусоидальная широтно-импульсная модуляция с m-фазной активно-индуктивной-нагрузкой»	82

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Системы электропитания (СЭП) являются важной частью сложных электротехнических и электромеханических устройств, в частности — электроприводов (ЭП) и существенно влияют на выбор способа управления двигателем, принципы построения системы управления, процессы в нормальных и аварийных режимах. При проектировании электротехнических устройств необходимо выполнять их моделирование совместно с СЭП. Для этого необходимы модели СЭП [1, 4, 6, 7, 8, 9, 10].

Наиболее популярным является СЭП в виде транзисторного коммутатора, который применяется как для ЭП постоянного тока, так и для ЭП переменного тока.

Существующие модели транзисторных коммутаторов в основном предназначены для использования в системах моделирования электронных устройств. В этом случае невозможно объединить их с моделями элементов ЭП — электродвигателей, механической нагрузки, датчиков и регуляторов. Это не позволяет использовать их для исследования процессов в ЭП, в том числе при различных режимах работы.

Модели СЭП, предназначенные для использования при моделировании ЭП, слишком идеализированы. В частности, при их использовании отсутствует возможность учесть логику работы и процессы внутри полупроводниковых элементов, характер и величину протекающих через них токов, что важно при проектировании ответственных установок, например, исполнительных электроприводов космических аппаратов.

Таким образом, в настоящее время имеется два типа моделей СЭП:

- детализированные, которые могут применяться только в системах моделирования электроники (например, OrCAD, Multisim и др.);
- идеализированные, предназначенные для использования при моделировании ЭП (например, в SIMULINK).

В связи с этим разработка программных моделей транзисторных коммутаторов для СЭП ЭП, обеспечивающих учёт процессов в их элементах в различных режимах работы, является актуальной.

Объект исследования — процесс автоматизированного проектирования систем электропитания.

Предмет исследования — программное обеспечение для автоматизированного проектирования систем электропитания.

Объект разработки — комплекс программ для решения задач автоматизированного проектирования систем электропитания в среде MathCAD14.

Основная идея работы. Разработать комплекс моделей электропитающих устройств в виде процедур в среде MathCAD для изучения процессов в них и для последующего применения при моделировании сложных электротехнических и электромеханических устройств в целом.

Цель работы — разработка и программная реализация алгоритмов моделирования систем электропитания постоянного и переменного тока на основе универсальной модели транзисторного коммутатора с различной степенью детализации.

Задачи работы:

- 1) разработка математической модели, алгоритма функционирования и его программной реализации для транзисторно-диодного ключа различной степени детализации;
- 2) разработка математической модели, алгоритма функционирования и его программной реализации для транзисторного коммутатора;
- 3) разработка математической модели, алгоритма и его программной реализации для блока задания сигналов управления транзисторным коммутатором при реализации широтно-импульсного преобразования;
- 4) разработка математической модели, алгоритма и его программной реализации для блока задания сигналов управления транзисторным коммутатором при реализации широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону.

Методы, инструментальные средства и технологии. Для разработки математических моделей использованы методы электротехники. В качестве инструментального средства при реализации программного обеспечения использована программа MathCAD14.

Результаты работы: В среде MathCAD14 разработаны и программно реализованы модели СЭП на основе транзисторно-диодных коммутаторов с ключами различной степени детализации с учётом и без учёта реального алгоритма функционирования и внутренних параметров транзисторов и диодов.

Список использованных источников содержит 10 наименований.

1 Проблематика моделирования систем электропитания

1.1 Общие принципы систем электропитания в виде транзисторных коммутаторов

Системы электропитания (СЭП) являются важной частью электротехнических устройств. Для маломощных электротехнических устройств часто используются транзисторные коммутаторы (ТК) с транзисторно-диодными ключами (ТДК).

Принцип работы ТК следующий. Транзисторы в таких ТК используются в импульсном режиме работы с переходом из режима отсечки (транзистор полностью закрыт, не пропускает ток) в режим насыщения (транзистор полностью открыт, пропускает ток).

Эти импульсы подаются на нагрузку. Если нагрузка индуктивная (например, обмотка какого-либо двигателя), то импульсы сглаживаются.

Одной из самых распространённых схем СЭП является мостовая схема (Рисунок 1.1).

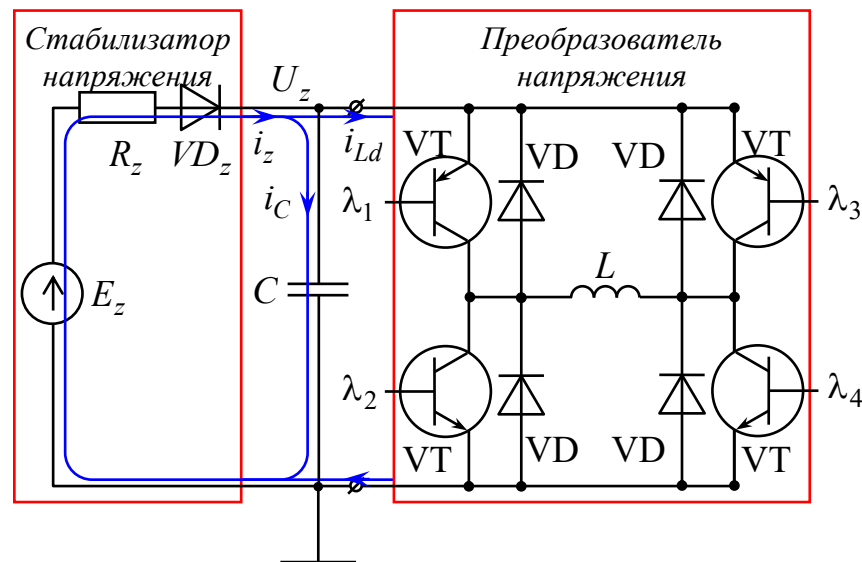


Рисунок 1.1 — Эквивалентная схема системы электропитания с обмоткой L в качестве нагрузки

Транзисторный коммутатор в мостовой схеме состоит из транзисторно-диодных ключей, которые подключены к общему источнику питания и нагрузке. В

качестве источника питания часто используется стабилизатор напряжения, возможно, с конденсатором на выходе для сглаживания пульсаций, создаваемых при работе транзисторно-диодных ключей.

Параллельно транзисторам включены «обратные диоды». Транзисторы включены так, чтобы проводить ток при указанных полярностях напряжения E . А диоды в нормальном режиме работы ток не проводят, так как включены «встречно» полярностям напряжения. Они включаются в работу в моменты переключения транзисторов.

Транзисторы управляются сигналами на открытие и закрытие. При этом транзисторы в данном случае показаны двух типов проводимости: верхние — р-п-р, нижние — п-р-п. Такие транзисторы называются «комплементарными» — они имеют одинаковые параметры, но разный тип проводимости. Они предназначены для совместного использования. Транзисторы соединены своими коллекторами, к которым присоединена обмотка, выполняющая роль нагрузки. Наличие объединённых коллекторов позволяет разместить их на одном радиаторе для охлаждения, что упрощает конструкцию и уменьшает габариты всего устройства.

Принцип работы мостового коммутатора поясняется схемами (Рисунок 1.2). На них для упрощения не показаны цепи управления базами транзисторов.

Процесс формирования импульсов можно разделить на четыре этапа.

На первом этапе в начальный момент времени считаем, что были включены транзисторы $VT1.1$ и $VT2.2$ (Рисунок 1.2, а). Тогда ток i протекает сверху вниз (в соответствии с полярностью напряжения E) и слева направо по обмотке L .

На втором этапе в следующий момент времени (Рисунок 1.2, б) эти транзисторы запираются и приходит сигнал на открытие транзисторов $VT1.2$ и $VT2.1$. Ток должен поменять полярность. Но по законам физики ток в индуктивности не может мгновенно измениться, в первый момент времени он должен сохранить прежнее направление течения, и для этого он начинает протекать через обратные

диоды $VD1.2$ и $VD2.1$. Но ток в этом случае течёт навстречу полярности источника питания, поэтому ток будет уменьшаться до нуля.

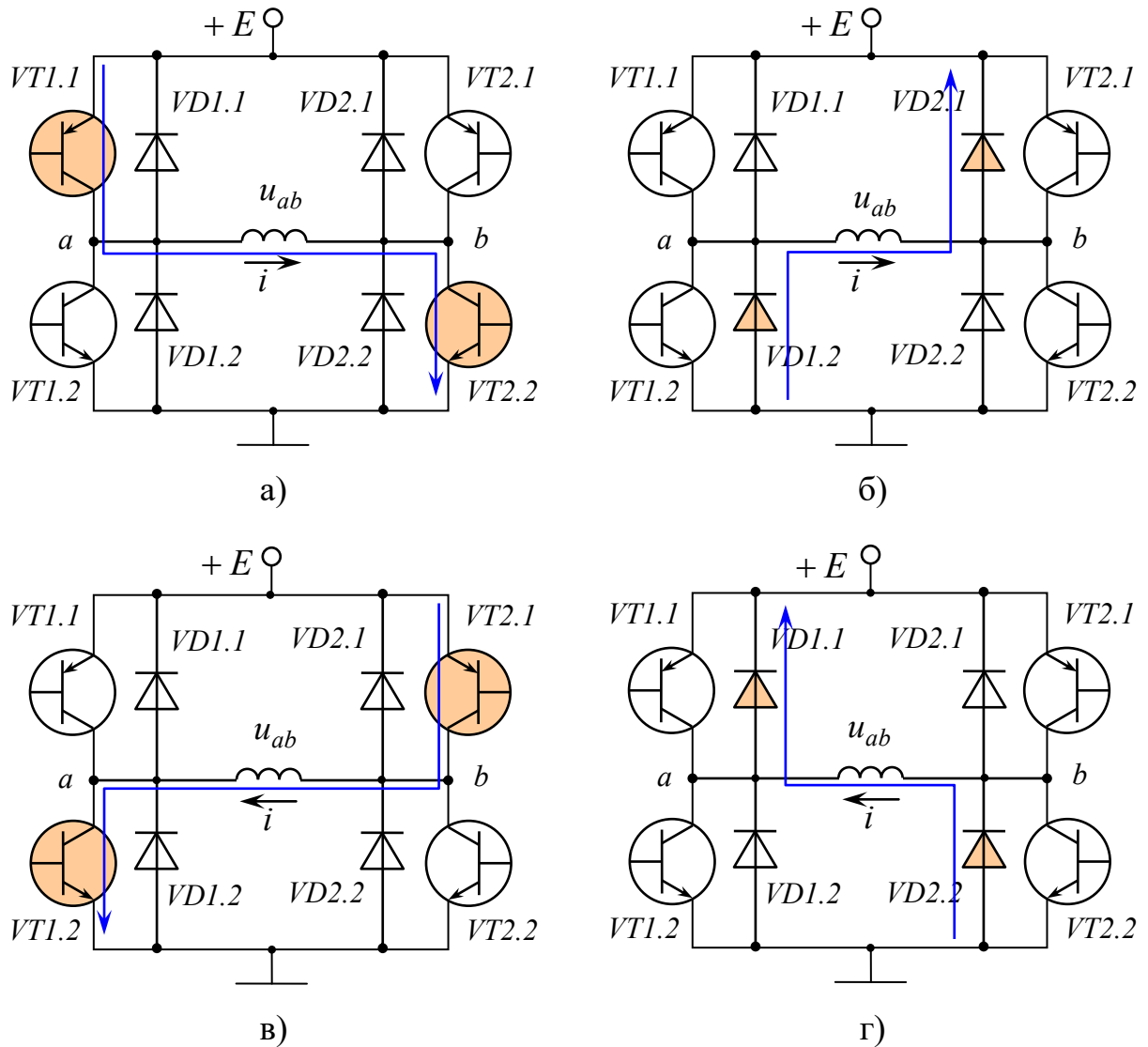


Рисунок 1.2 — Процессы включения транзисторов и диодов
в мостовом транзисторном коммутаторе

На третьем этапе (Рисунок 1.2, в) транзисторы $VT1.2$ и $VT2.1$ включаются, и ток снова протекает сверху вниз в соответствии с полярностью источника питания E , но теперь в индуктивности — справа налево, т. е. при протекании через индуктивность меняет направление на противоположное.

На четвёртом этапе выключают транзисторы $VT1.2$ и $VT2.1$ и снова включают транзисторы $VT1.1$ и $VT2.2$. Но ток, как и на этапе 2, не может мгновенно изменить своё направление течения. Поэтому включаются диоды $VD1.1$ и $VD2.2$,

ток некоторое время течёт навстречу полярности источника питания E , уменьшаясь по величине до нуля.

Затем снова включаются транзисторы $VT1.1$ и $VT2.2$ и таким образом продолжается формирование импульсов на нагрузке.

Эти этапы необходимо формализовать для создания модели транзисторного коммутатора.

Существуют два основных подхода к представлению модели транзисторного коммутатора — в виде объекта с постоянными параметрами и переменной структурой и, наоборот, — с переменными параметрами и постоянной структурой. Для более полного учёта влияния работы ключа на процессы в ЭП следует рассматривать ключ как нелинейный элемент с переменными структурой и параметрами.

Ввиду взаимного влияния узлов и элементов силовых цепей (вследствие прямой и обратной передачи энергии) для корректного описания процессов в ключе необходимо учитывать характер как входных цепей, так и подключаемой нагрузки. Входной цепью ТК обычно является ёмкостной или индуктивно-ёмкостной фильтр источника питания, и непосредственно к зажимам ТК подключается конденсатор этого фильтра, а нагрузкой служат дроссели выходного индуктивного фильтра или обмотки двигателя. Поэтому внешними воздействиями должны быть потенциалы на соответствующих шинах коммутатора, связанных с конденсатором фильтра, а также — токи нагрузки. Эти величины сохраняют непрерывность при любых внутренних переключениях коммутатора. В данных моделях не учитываются паразитные индуктивности и ёмкости проводов и элементов, и поэтому модель ключа (и коммутатора в целом) — статическая. В связи с этим переменные состояния отсутствуют. Выходными переменными ТК следует выбрать потенциалы на выходных клеммах ключей, так как именно они обычно выбираются в качестве входных для подключаемых к выходам ТК дросселей фильтра или обмоток двигателя.

Исследование СЭП методами моделирования включает разработку методического, математического, алгоритмического и программного обеспечения.

Методическое обеспечение моделирования СЭП представляет собой совокупность математических методов, используемых для создания математических, алгоритмических и программных моделей СЭП.

Математическое обеспечение моделирования СЭП представляет собой совокупность математических выражений (формул, уравнений), отражающих процессы в СЭП. Оно опирается на методическое обеспечение, так как при получении математических моделей используются соответствующие методы.

Алгоритмическое обеспечение предшествует программному обеспечению. Оно необходимо, чтобы понять общие принципы функционирования будущей программной модели. Алгоритмическое обеспечение бывает двух типов: с учётом и без учёта языка программирования, на котором будет реализовываться модель. В данном случае учитываются особенности MathCAD14.

Программное обеспечение моделирования СЭП представляет собой библиотеку программных моделей и математических процедур для решения моделей (расчётов, преобразований). Программное обеспечение представляет собой программную реализацию математических моделей и методов расчёта, оно опирается, с одной стороны, на математическое обеспечение, с другой — на алгоритмическое обеспечение применительно к среде программирования, так как каждая среда программирования обладает своими возможностями и ограничениями по написанию, отладке и использованию программ.

В рамках данной работы предполагается, что модели могут быть различной степени детализации. Каждый уровень детализации моделей имеет своё методическое обоснование с точки зрения как адекватности модели, так и её будущего использования.

Простые идеализированные модели обеспечивают малое время счёта, но отражают только конечный результат работы модели, поэтому они необходимы в том случае, если эта идеализация отбрасывает все несущественные свойства объекта, но отражает все его необходимые для исследования свойства.

Сложные модели отражают внутренние процессы в элементах устройств и влияние на выходные напряжения СЭП внутренних параметров элементов. В результате появляется возможность узнать, каким является выходное напряжение СЭП в реальности, и что влияет на него, но при этом может существенно увеличиваться время счёта.

При разработке моделей различают функциональные и поэлементные модели СЭП.

Функциональные модели воспроизводят идеализированные напряжения на выходе СЭП в виде математических функций. Например, для СЭП постоянного тока — это просто постоянное значение напряжения различной величины. Для СЭП переменного тока — синусоидальное напряжение с заданной амплитудой и частотой. В случае многофазного напряжения записывается соответствующее число синусоидальных функций с соответствующими фазовыми сдвигами. Функциональные модели обычно являются очень простыми и идеализированными, но также могут быть различной степени детализации. Например, можно задать выходные напряжения в виде синусоид, а можно — в виде последовательности импульсов с широтно-импульсной модуляцией. Функциональные модели можно реализовывать на уровне конечного результата (форма выходного напряжения) или на уровне некоторых вспомогательных процессов, происходящих внутри СЭП. Важно, что в этом случае почти не используются физические свойства реальных элементов, а только абстрактные математические понятия и соответствующие им выражения.

Поэлементные модели воспроизводят функционирование внутренних элементов СЭП, а уже из этого формируется конечный результат — выходные напряжения. При этом используют законы природы, т. е. законы и понятия той области науки и техники, к которой относятся рассматриваемый элемент и процессы в нём.

Применительно к СЭП — это, прежде всего, законы электротехники, общие понятия о процессах изменения токов и напряжений, а также законы Ома, Кирхгофа, Фарадея и др. Эти законы лежат в основе исходного математического

описания, из которого затем получаются соответствующие модели с выделением переменных состояния, входных и выходных воздействий.

Программная реализация моделей имеет как методологическое, так и практическое значение. Программные модели СЭП можно использовать как части общей модели электропривода при его моделировании, а можно выполнять исследования самих СЭП того или иного типа для получения информации об их характеристиках с целью определения возможностей их применения.

1.2 Выбор инструментальных средств для разработки комплекса программ

При разработке математических моделей необходимо учитывать их последующую программную реализацию в соответствующей программной среде.

В настоящее время существуют универсальные математические программы MathCAD [1], Matlab [3], Maple [2] и др., на основе которых можно разрабатывать системы моделирования конкретных типов устройств и систем.

Все эти программы одинаково пригодны для использования при моделировании источников электропитания и электроприводов в целом.

Данная работа выполняется в рамках других работ, ведущихся на кафедре ВТ ИКИТ СФУ, где основой моделирования является программная среда MathCAD. Этот выбор обусловлен уникальными возможностями интерфейса MathCAD, обеспечивающего представление программ в виде рабочих листов, аналогичных обычным листам бумаги. Это позволяет записывать математические выражения в обычной научной нотации и очень помогает в разработке и отладке моделей.

В программе MathCAD имеется два варианта программирования:

- 1) с помощью выражений и некоторых указаний на операции прямо в пространстве рабочего листа;
- 2) с помощью пользовательских процедур, разрабатываемых с применением встроенных средств программирования.

Вариант 1 целесообразно использовать для отладки математических моделей (при этом программирование явно не присутствует).

Вариант 2 используется для создания отдельных модулей, из которых затем можно сформировать модель всей системы электропривода.

Встроенные средства графической визуализации позволяют представлять результаты расчётов в удобном виде.

В связи с этим в данной работе в качестве инструментального средства разработки моделей СЭП выбрана программная среда MathCAD14.

1.3 Цель и задачи работы

Цель работы — разработка и программная реализация алгоритмов моделирования систем электропитания постоянного и переменного тока на основе универсальной модели транзисторного коммутатора с различной степенью детализации.

Различная степень детализации позволяет выбирать математические модели СЭП в зависимости от задач моделирования. Реализация такой модели в виде одной процедуры позволяет осуществлять сравнительные расчёты и оценивать погрешности при переходе от одного варианта модели к другому.

Задачи работы:

- 1) разработка математической модели, алгоритма функционирования и его программной реализации для транзисторно-диодного ключа различной степени детализации;
- 2) разработка математической модели, алгоритма функционирования и его программной реализации для транзисторного коммутатора;
- 3) разработка математической модели, алгоритма и его программной реализации для блока задания сигналов управления транзисторным коммутатором при реализации широтно-импульсного преобразования;
- 4) разработка математической модели, алгоритма и его программной реализации для блока задания сигналов управления транзисторным коммутатором при реализации широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону.

Выводы по разделу 1

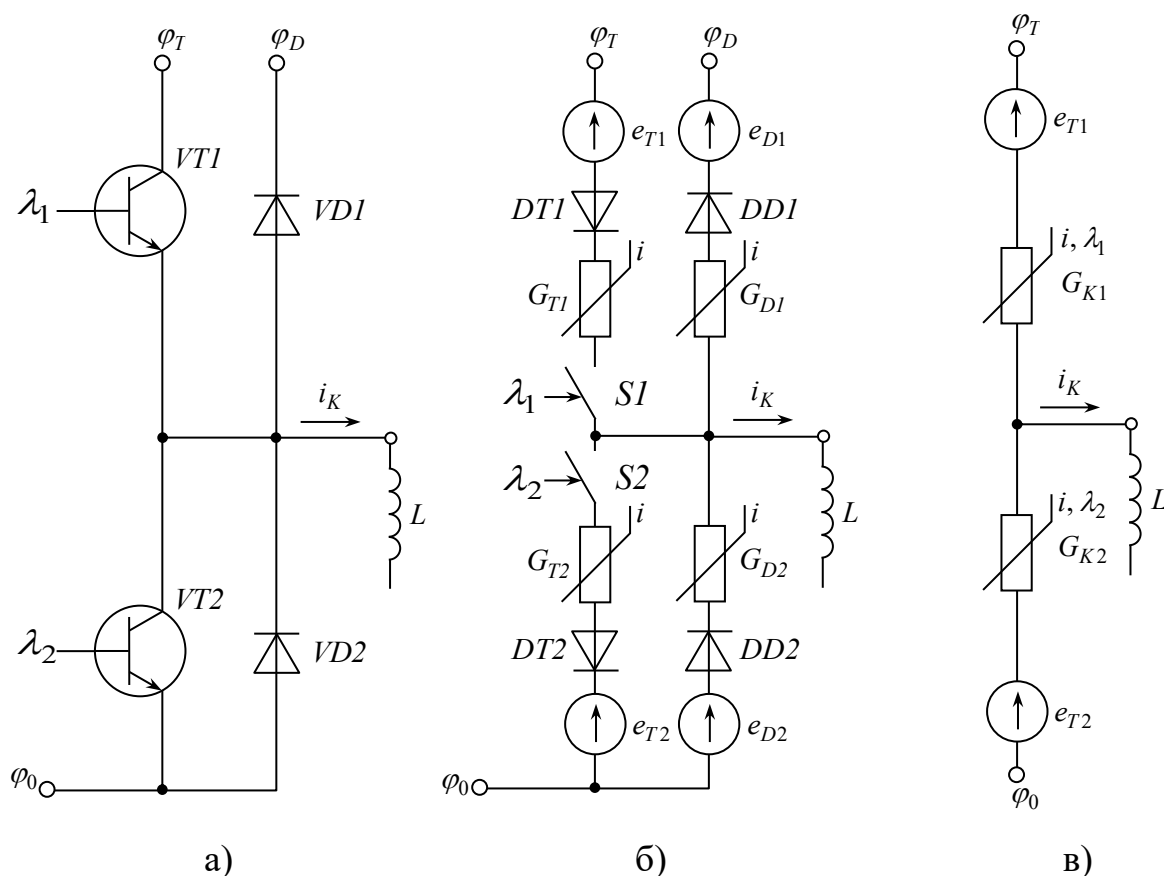
Рассмотрены общие принципы функционирования СЭП в виде транзисторного коммутатора. Показано, что возможная модель ТК должна быть с переменной структурой и переменными параметрами. Обоснована необходимость выбора в качестве инструментального средства программную среду MathCAD14.

2 Методическое и математическое обеспечение элементов систем электропитания

2.1 Математическая модель транзисторно-диодного ключа с учётом вольтамперных характеристик транзистора и диода

Транзисторно-диодный ключ является основным элементом силовой части транзисторного коммутатора. Ключ может быть представлен в виде обобщённой электрической принципиальной схемы (Рисунок 2.1, а), схемы замещения (Рисунок 2.1, б), эквивалентной схемы (Рисунок 2.1, в).

Для этого была разработана модель транзисторного ключа (Рисунок 2.1).



а) б) в)
Рисунок 2.1 — Модель транзисторно-диодного ключа:

а) схема электрическая принципиальная, б) схема замещения,
в) эквивалентная схема

Для большей общности модели потенциалы на катодах верхних диодов и коллекторах верхних транзисторов принимаются различными (такие схемы

встречаются на практике). В частном случае они могут быть одинаковыми. Работа ключа полностью определяется следующими факторами: потенциалами питающих ключ напряжений φ_I , φ_D ; сигналами управления транзисторами λ_1 , λ_2 ; величиной и направлением тока нагрузки ключа i_K . Эти переменные передаются в модель. Результатом работы модели является определение состояния ключа (включенность/выключенность того или иного транзистора или диода), расчёт падения напряжения на работающих элементах и определение потенциалов на выходах ключей.

Транзистор и диод являются элементами с нелинейными вольтамперными характеристиками (ВАХ). На графике (Рисунок 2.2, а) приведена ВАХ диода (для примера взят 2Д213), на графике (Рисунок 2.2, б) приведена ВАХ транзистора в режиме насыщения (для примера взят 286ЕПЗ).

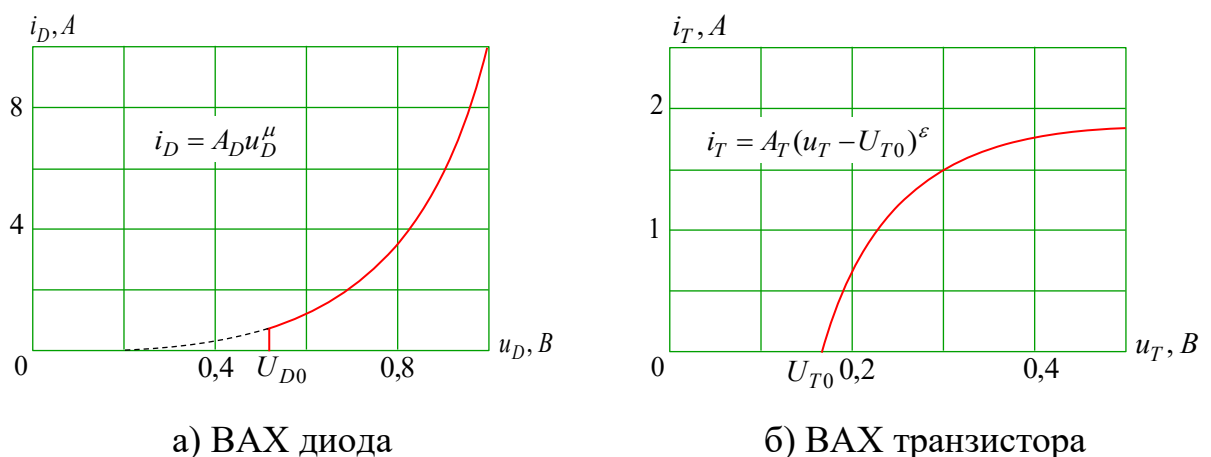
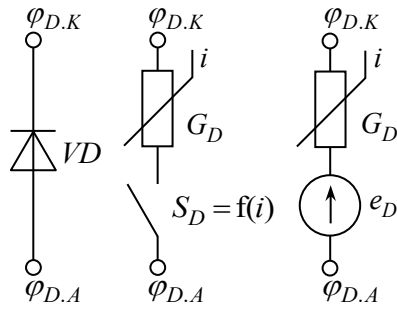


Рисунок 2.2 — Вольтамперные характеристики (ВАХ)

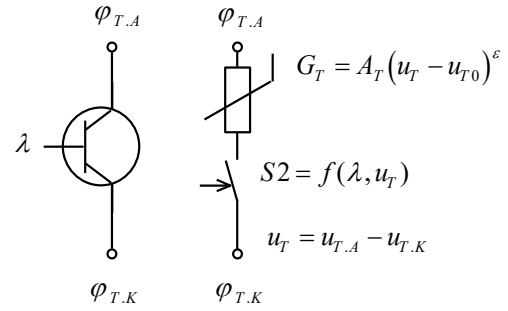
диода (2Д213) и транзистора (286ЕПЗ)

На схемах (Рисунок 2.3) приведены схемы и математические модели диода (Рисунок 2.3, а) и транзистора (Рисунок 2.3, б).

Параметры математической модели диода (Рисунок 2.3) имеют следующий физический смысл.



а) модель диода



б) модель транзистора

Рисунок 2.3 — Эквивалентные схемы и модели диода и транзистора

Зависимость тока от напряжения (ВАХ) диода можно аппроксимировать следующей формулой:

$$i_D = A_D u_D^\mu, \quad (2.1)$$

где i_D — прямой ток через диод (в направлении его проводимости);

u_D — прямое напряжение на диоде (плюс у анода, минус у катода);

A_D , μ — постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально по ВАХ конкретного диода.

Напряжение на диоде определяется как разность этих потенциалов:

$$u_D = \varphi_{D.A} - \varphi_{D.K}, \quad (2.2)$$

где $\varphi_{D.A}$ — потенциал анода;

$\varphi_{D.K}$ — потенциал катода.

Это соответствует ВАХ диода (Рисунок 2.2, а). ВАХ диода можно понимать как зависимость тока через диод от напряжения между анодом и катодом, так как обычно напряжение является исходной величиной. Но в данном случае ВАХ следует понимать как зависимость напряжения на диоде от тока через него. Это связано с особенностью режима работы диода в транзисторно-диодном ключе, нагрузкой которого является индуктивность обмотки двигателя. В част-

ности, в данном случае напряжение между катодом и анодом у диода всегда запирающее, т. е. ток вообще не должен протекать. Но в реальности ток всё равно протекает при определённых условиях, и тогда именно зависимость напряжения от тока должна считаться его ВАХ.

В частности, для рассматриваемого диода 2Д213 A_D и μ были определены следующим образом.

Поскольку искомым параметров два, берутся две точки на графике ВАХ диода:

$$u_{D1} = 0,6 \text{ В}, i_{D1} = 1,7 \text{ А},$$

$$u_{D2} = 0,9 \text{ В}, i_{D2} = 8,8 \text{ А}.$$

После элементарных преобразований с учётом выражения для ВАХ (2.1) определяются искомые параметры:

$$\mu = \frac{\lg(i_{D2}/i_{D1})}{\lg(u_{D2}/u_{D1})} = \frac{\lg(8,8/1,7)}{\lg(0,9/0,6)} \approx 4. \quad (2.3)$$

$$A_D = \frac{i_{D1}}{u_D^\mu} = \frac{1,7}{0,6^4} \approx 13,3. \quad (2.4)$$

Точки следует брать в местах характеристики, наиболее часто используемых в рабочих режимах.

Из выражения для ВАХ диода (2.1) можно получить выражение для его сопротивления и проводимости.

ВАХ насыщенного транзистора также может быть аппроксимирована выражением, похожим на выражение (2.1), но с учётом напряжения включения транзистора «коллектор–эмиттер» U_{T0} :

$$i_T = A_T (u_T - U_{T0})^\varepsilon, \quad (2.5)$$

где i_T — коллекторный ток;

u_T — напряжение «коллектор–эмиттер» (в режиме насыщения);

A_T , ε — эмпирические параметры, определяемые по ВАХ конкретного транзистора.

В общем случае параметр ε может быть любым, например, дробным. И тогда следует воспользоваться методикой, аналогичной приведённой для диода, т. е. с выбором двух точек на характеристике (u_{T1}, i_{T1}) и (u_{T2}, i_{T2}) при одинаковом u_{T0} .

Затем искомые параметры определяются по формулам:

$$\varepsilon = \frac{\lg(i_{T2}/i_{T1})}{\lg[(u_{T2} - u_{T0})/(u_{T1} - u_{T0})]}; \quad (2.6)$$

$$A_T = \frac{i_{T2}}{(u_{T2} - U_{T0})^\varepsilon}. \quad (2.7)$$

Исследование конкретного транзистора 286ЕПЗ показало, что его ВАХ линейна на рабочем участке и поэтому можно принять $\varepsilon = 1$.

u_D	Формула для расчета $G_{D.K}$
$< U_{D0}$	0
$\geq U_{D0}$	$A_D u_D^\mu$

а) модель диода

λ	u_T	Формула для расчета $G_{T.K}$
0	$\leq U_{T0}$	0
0	$> U_{T0}$	0
1	$\leq U_{T0}$	0
1	$> U_{T0}$	$A_T [1 - U_{T0} / u_T]^\varepsilon u_T^{\varepsilon-1}$

б) модель транзистора

Рисунок 2.4 — Эквивалентные схемы и таблицы переключений

диода и транзистора, в зависимости от режима работы силового ключа транзисторного коммутатора

Модели диода и транзистора (Рисунок 2.3, а и б) представлены нелинейными проводимостями и источниками ЭДС, имитирующими падение напряжения на элементе. Модель транзистора дополнительно включает управляемый

контакт, замыкающийся или размыкающийся под воздействием внешнего сигнала управления λ . Свойство диода или транзистора проводить ток только в одном направлении имитируется идеальными диодами.

Учесть реальные ВАХ диода и транзистора можно двумя способами:

- 1) путём расчёта токов через напряжения согласно выражениям (2.1) или (2.5);
- 2) путём вычисления напряжения, падающего на диоде или транзисторе, по известному току.

В рассматриваемом случае характер нагрузки — индуктивный, и поэтому базовым параметром для ключа является ток. Следовательно, необходимо получить выражения для проводимости транзистора и диода в функции тока.

Проводимость диода:

$$\left. \begin{aligned} G_D &= A_D^{1/\mu} i_D^{1-1/\mu} = B_D i_D^\beta; \\ \beta &= 1 - 1/\mu; \\ B_D &= A_D^{1/\mu}. \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Проводимость транзистора:

$$\left. \begin{aligned} G_T &= A_T^{1/\varepsilon} i_T^{1-1/\varepsilon} = B_T i_T^\alpha; \\ \alpha &= 1 - 1/\varepsilon; \\ B_T &= A_T^{1/\varepsilon}. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Полученные выражения используются далее в разработке модели транзисторно-диодного ключа. Это позволяет учитывать реальные сопротивления транзисторов и диодов с учётом протекающих токов. В результате появляется возможность рассчитать потери в транзисторах и диодах и оценить температурную напряжённость всего транзисторного коммутатора. В частности, определить необходимость и размеры радиаторов или целесообразность использования принудительного охлаждения.

2.2 Модель транзисторно-диодного ключа с переменными структурой и параметрами

Встречно-параллельное включение транзисторов и диодов позволяет перейти к обобщённой модели ключа (Рисунок 2.1, в). В этом случае для каждой пары «транзистор-диод» предусмотрена одна нелинейная проводимость G_K и один источник ЭДС e_K . Эта модель имеет более сложную логику работы, связанную с необходимостью изменять структуру и параметры в зависимости от сигнала управления и направления тока в момент коммутации. Эта логика работы иллюстрируется схемами (Рисунок 2.4 и Рисунок 2.5).

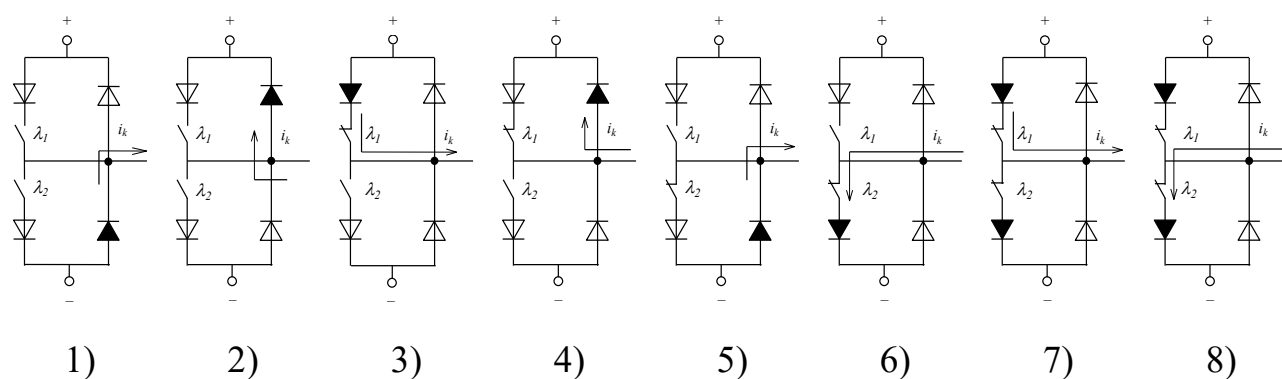


Рисунок 2.5 — Определение включённости диода или транзистора ключа,

в зависимости от направления тока нагрузки

и сигналов управления транзисторами

Работа ключа основывается на определённой логике выполнения операций, которую можно представить в виде соответствующей таблицы режимов работы (Рисунок 2.6).

В зависимости от сигналов управления и направления тока включаются те или иные ветви ключа. Соответственно этому в качестве проводимости G_K и источника ЭДС e_K берутся соответственно проводимость и ЭДС диода или транзистора. Кроме того, согласно обобщённой схеме коммутатора, коллекторы верхних по схеме транзисторов и катоды диодов подключены к различным узлам (т. е. к различным потенциалам). Соответственно, это отражается и в логике работы ключа согласно таблице (Рисунок 2.6): в зависимости от того, какой именно

элемент (транзистор или диод) является проводящим в данный момент, потенциал питания ключа φ_K берётся равным φ_T или φ_D .

№	λ_1	λ_2	i_K	G_{K1}	e_{K1}	G_{K2}	e_{K2}	φ_K
1	0	0	>0	0	0	G_D	e_D	
2	0	0	<0	G_D	e_D	0	0	φ_D
3	1	0	>0	G_T	e_D	0	0	φ_T
4	1	0	<0	G_D	e_D	0	0	φ_D
5	0	1	>0	0	0	G_D	e_D	
6	0	1	<0	0	0	G_T	e_T	
7	1	1	>0	G_T	e_T	G_T	e_T	φ_T
8	1	1	<0	G_T	e_T	G_T	e_T	φ_T

Рисунок 2.6 — Значения проводимостей и ЭДС ключа, в зависимости от направления тока нагрузки и сигналов управления транзисторами

Модель ключа, согласно рассмотренному материалу, может быть выполнена в двух вариантах:

1) с учётом реальных нелинейных ВАХ диодов и транзисторов — ЭДС e_T и e_D берутся равными нулю, а проводимости G_T и G_D рассчитываются по формулам (2.8) для диода и (2.9) для транзистора;

2) без учёта реальных ВАХ, но с учётом падения напряжения на диодах и транзисторах — ЭДС e_T и e_D задаются неравными нулю (равными средним величинам падения напряжения на соответствующих элементах при протекании через них токов), а проводимости G_T и G_D не используются.

Во всех случаях моделируется логика работы ключа и свойство односторонней проводимости диодов и транзисторов. При этом не учитываются обратные токи диодов и транзисторов, а также задержки на их включение и выключение.

2.3 Математическая модель транзисторного коммутатора

Транзисторный коммутатор содержит несколько транзисторно-диодных ключей. Для каждой обмотки требуется два таких ключа (Рисунок 1.1). Каждый ключ состоит из верхних транзистора и диода и нижних транзистора и диода. Термины «верхний» и «нижний» — условные и отражают положение соответствующих элементов на принципиальной электрической схеме.

Транзисторы в коммутаторе должны работать строго синхронно в следующей последовательности включения:

$$(VT1.1 \text{ совместно с } VT2.2), (VT1.2 \text{ совместно с } VT2.1)$$

Для этого формируются необходимые сигналы на открытие соответствующих транзисторов. Диоды включаются и выключаются сами под действием протекающих токов.

Если синхронность работы транзисторов нарушается, то могут быть следующие последствия:

- если одновременно включатся верхний и нижний транзисторы одного ключа, то возникает ток короткого замыкания между полюсами источника питания, который может привести к выгоранию транзисторов;

- если одновременно выключатся верхний и нижний транзисторы одного ключа, то ток через нагрузку перестаёт протекать.

Оба эти режима являются аварийными и не рассматриваются в данной работе, так как требуют дополнительного усложнения математической модели.

В качестве нагрузки в данной работе рассматриваются обмотки двигателей постоянного и переменного тока. Такая нагрузка имеет активно-индуктивный характер (RL -нагрузка), т. е. представляется последовательно соединёнными сопротивлением и катушкой индуктивности. Такая нагрузка обладает важной особенностью: ток в активно-индуктивной нагрузке не может меняться мгновенно, он изменяется плавно. Это позволяет при импульсной форме питающего напряжения получать сглаженную форму тока.

2.4 Математическая модель широтно-импульсного преобразователя

Как правило, транзисторно-диодные ключи работают в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Принцип работы ШИМ заключается в том, что формируются импульсы постоянной частоты. Но ширина положительного и ширина отрицательного импульсов — разная (Рисунок 2.7). Рассматривается активно-индуктивная нагрузка, например обмотка двигателя постоянного тока.

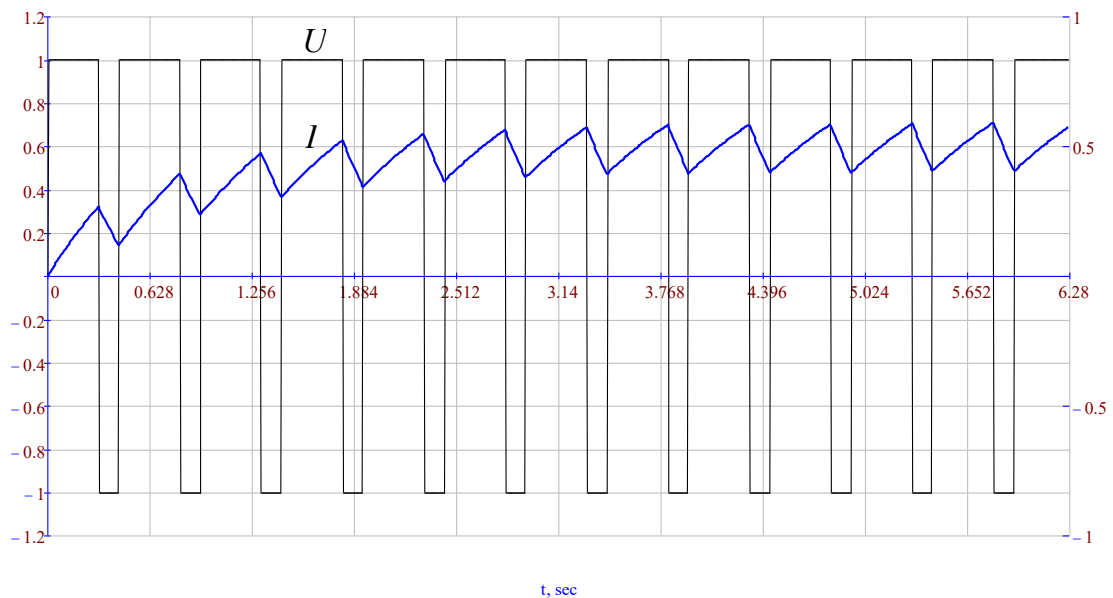


Рисунок 2.7 — Формирование постоянного тока
с помощью широтно-импульсного преобразователя при $\gamma = 0,75$

Видно, что при положительном импульсе ток в нагрузке нарастает, а при отрицательном импульсе — спадает. Если время положительного импульса больше, чем отрицательного, то ток вырастает при положительном импульсе больше, чем спадает при отрицательном. Поэтому среднее значение тока увеличивается. Достигнув некоторого среднего значения, ток остаётся на этом значении, приобретая пилообразную форму. Такое поведение тока как раз обусловлено активно-индуктивным характером нагрузки.

Соотношение между шириной положительного и отрицательного импульсов задаётся сигналом управления:

$$\gamma = \frac{\Delta t_+}{\Delta t_+ + \Delta t_-} = \frac{\Delta t_+}{\Delta t}, \quad (2.10)$$

где Δt_+ , Δt_- — ширины соответственно положительного и отрицательного импульсов;

Δt — период импульсов.

Величина γ называется скважностью. Она показывает, какую долю от периода занимает положительный импульс. Период импульсов в процессе регулирования не меняется ($\Delta t = \Delta t_+ + \Delta t_- = \text{const}$), меняется только соотношение между Δt_+ и Δt_- .

Напряжение на выходе ШИП имеет форму импульсов с постоянной амплитудой. Но это импульсное напряжение вызывает в активно-индуктивной нагрузке ток, который не является импульсным, хотя и может содержать колебательную составляющую.

Среднее значение этого тока пропорционально напряжению, величина которого определяется через скважность:

$$U = (1 - 2\gamma)U_m, \quad (2.11)$$

где U — текущее значение напряжения, U_m — максимальное напряжения.

Т. е. сигнал управления показывает, какую долю от периода должен составлять положительный импульс, чтобы обеспечить необходимую величину напряжения.

Широтно-импульсная модуляция позволяет регулировать величину тока. Например, при увеличении ширины положительных импульсов, средняя величина тока увеличивается (Рисунок 2.8).

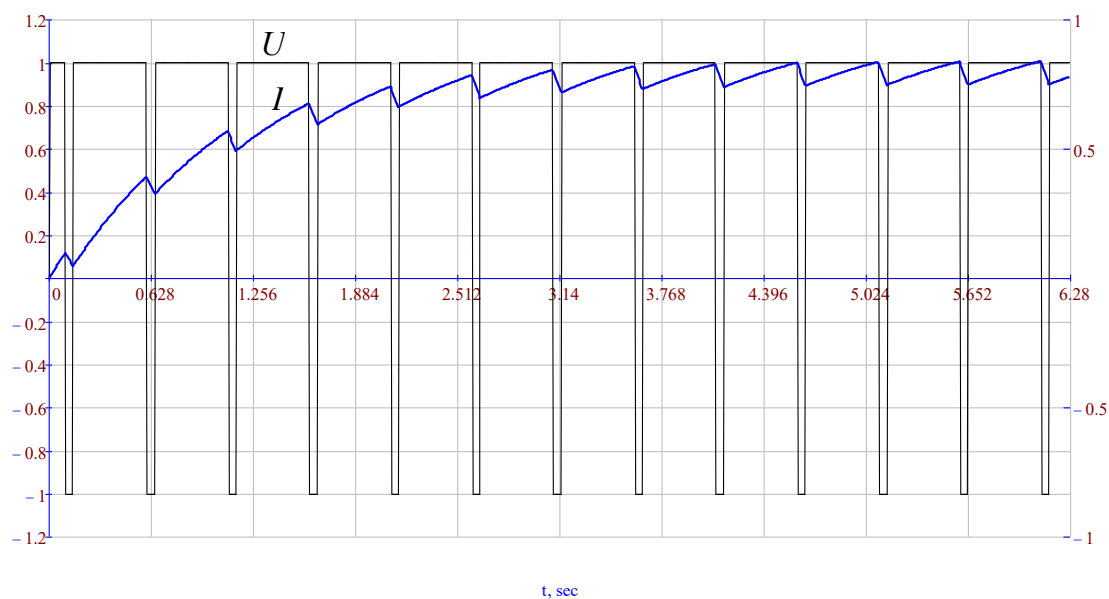


Рисунок 2.8 — Увеличение величины тока
при увеличении скважности $\gamma = 0,9$

Можно также менять полярность тока, если сделать ширину отрицательных импульсов больше ширины положительных (Рисунок 2.9).

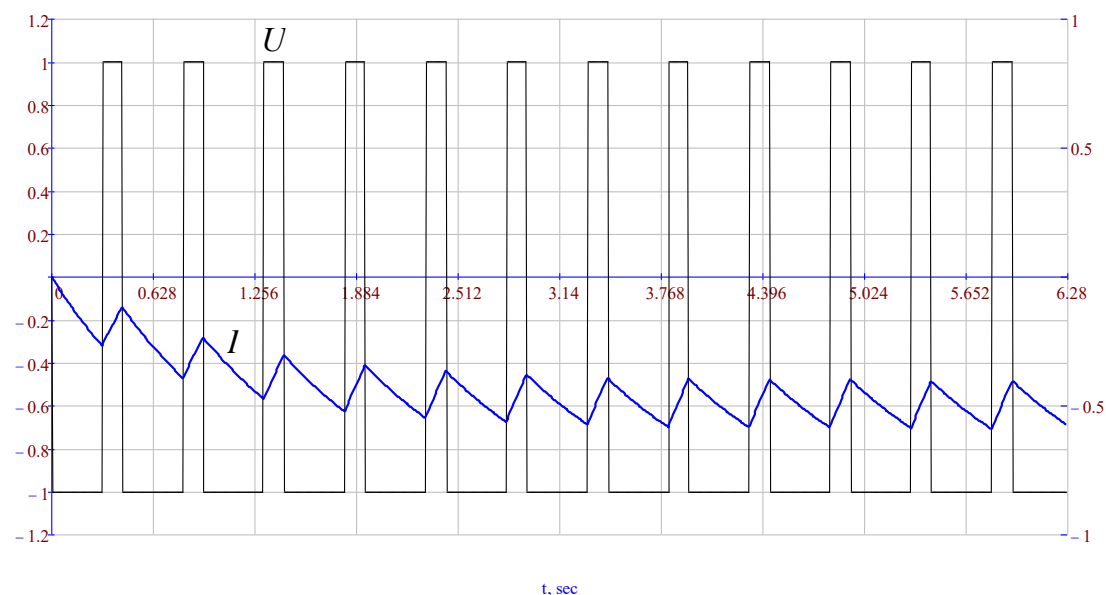


Рисунок 2.9 — Изменение полярности тока нагрузки
при изменении скважности $\gamma = 0,2$

Для уменьшения колебаний тока увеличиваются частоту импульсов (Рисунок 2.10).

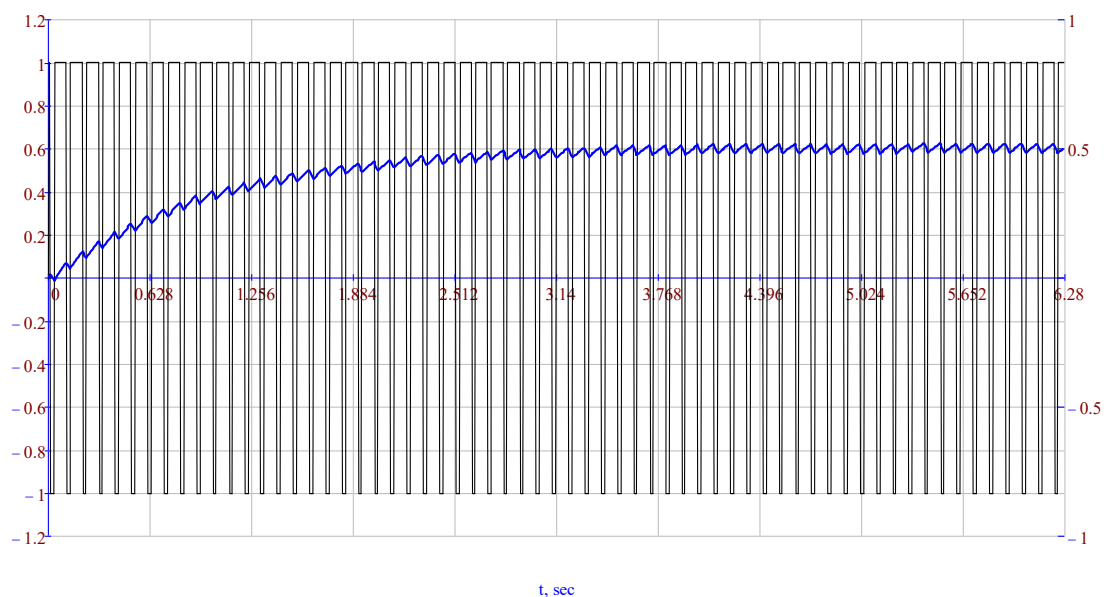


Рисунок 2.10 — Уменьшение колебательности тока
при увеличении частоты импульсов

Для формирования импульсов используются соответствующие блоки управления транзисторным коммутатором.

Общий принцип организации широтно-импульсной модуляции заключается в том, чтобы выполнять сравнение заданной величины напряжения с треугольным опорным напряжением (Рисунок 2.11).

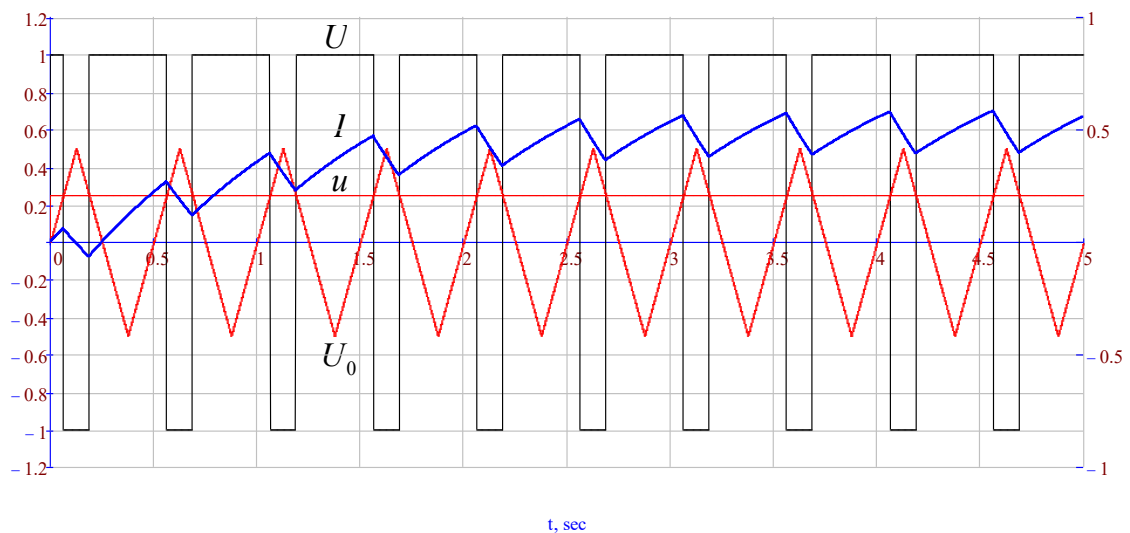


Рисунок 2.11 — Формирование широтно-модулированных импульсов с помощью опорного треугольного напряжения

На графике показан следующий процесс формирования широтно-импульсного напряжения.

С помощью специального генератора формируется опорное треугольное напряжение U_0 . С ним сравнивается сигнал задания величины эквивалентного напряжения u (соответствующего желаемому току). В моменты равенства этих двух сигналов формируется импульс напряжения U .

Для программной реализации широтно-импульсного модулятора используются следующие математические выражения.

Треугольный опорный сигнал реализуется с помощью функции:

$$U_0 = A_m \frac{2}{\pi} \arcsin[\sin(\varphi)], \quad (2.12)$$

где A_m — амплитуда треугольного сигнала;

$\varphi = 2\pi f_0 t$ — текущий фазовый сдвиг, определяемый через частоту треугольных импульсов f_0 и текущее время t .

Использование функции арксинуса обеспечивает абсолютно точное преобразование синусоидального сигнала в треугольный.

Для формирования прямоугольных импульсов используется компаратор (устройство сравнения), математическая модель которого представляет собой простое условное выражение:

$$U = \begin{cases} U_m, & \text{если } u \geq U_0; \\ -U_m, & \text{если } u < U_0, \end{cases} \quad (2.13)$$

где U — выходное напряжение, формируемое транзисторным коммутатором;

U_m — амплитудное значение импульсов напряжения (определяется напряжением используемого источника питания постоянного тока);

u — сигнал, величина которого задаёт величину эквивалентного значения выходного напряжения коммутатора (тока в нагрузке);

U_0 — треугольный сигнал в соответствии с выражением (2.12).

Приведённые формулы легко воспроизводятся в составе программной модели блока управления транзисторного коммутатора.

Графики (Рисунок 2.7, Рисунок 2.8, Рисунок 2.9, Рисунок 2.10) получены на моделях, в которых не учитываются логика работы и внутренние параметры транзисторно-диодного ключа. Т. е. в данном случае были реализованы упрощённые модели элементов транзисторного коммутатора. Более совершенные модели, основанные на материале подраздела 2.1 и являющиеся предметом исследования в данной работе, приведены далее в разделе 3.

2.5 Математическая модель широтно-импульсного модулятора по синусоидальному закону

Рассмотренный принцип функционирования транзисторного коммутатора, включая широтно-импульсную модуляцию, применяется также для питания электродвигателей переменного тока. При этом в обмотках можно формировать как постоянный ток (с некоторыми пульсациями), так и переменный ток заданной формы, обычно синусоидальный.

Вид импульсов, обеспечивающих широтно-импульсную модуляцию по синусоидальному закону, приведён на графике (Рисунок 2.12).

Формирование импульсов осуществляется по тому же алгоритму, что и в подразделе 2.4 в соответствии с выражением (2.13, но сигнал задания напряжения имеет синусоидальную форму:

$$u(t) = A_{\sin} \sin(2\pi f_u t), \quad (2.14)$$

где $A_{\sin}$ — амплитуда синусоидального сигнала;

f_u — частота синусоидального сигнала (будущего переменного тока).

Для корректной работы необходимо обеспечить, чтобы выполнялось:

$$A_{\sin} \leq U_0, \quad (2.15)$$

так как при нарушении этого условия форма тока перестаёт быть синусоидальной;

$$f_0 \gg f_u, \quad (2.16)$$

т. е. частота тактовых импульсов f_0 (в соответствии с которыми формируется треугольный сигнал) должна быть существенно больше частоты того тока, который образуется с помощью ШИМ.

Поэтому:

$$f_0 = N_T f_u, \quad (2.17)$$

где N_T — число тактовых импульсов на период тока.

В случае однофазного напряжения $N_T = 10$ и более, в случае многофазного напряжения $N_T = 12, 18, 24$ и т. д.

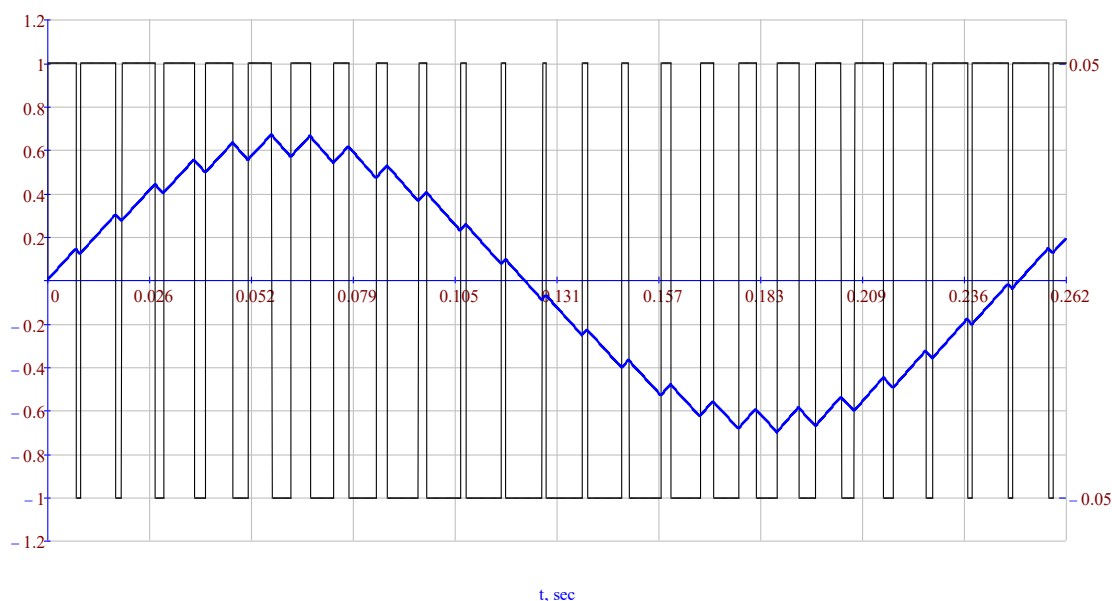


Рисунок 2.12 — Формирование широтно-модулированных импульсов по закону синуса для однофазной цепи

С точки зрения моделирования высокая тактовая частота означает, что необходимо рассчитывать большое число точек, чтобы выявить процессы формирования импульсов.

Рассматриваемый транзисторно-диодный ключ можно использовать в многофазных СЭП. Например, в трёхфазной необходимо сформировать три напряжения управления:

$$\left. \begin{aligned} u_a(t) &= A_{\sin.a} \sin(2\pi f_u t + \beta_a); \\ u_b(t) &= A_{\sin.b} \sin(2\pi f_u t + \beta_b); \\ u_c(t) &= A_{\sin.c} \sin(2\pi f_u t + \beta_c), \end{aligned} \right\}, \quad (2.18)$$

где β — фазовые сдвиги в соответствии с трёхфазной системой электропитания.

Вид токов в трёхфазной системе электропитания показан на графиках (Рисунок 2.14 для фазы А), (Рисунок 2.15 для фазы В) и (Рисунок 2.14 для фазы С).

Для этого формируют одно треугольное напряжение и три (по числу фаз) синусоидальных напряжения, которые сравниваются с общим треугольным:

$$U_a = \begin{cases} U_{m.a}, & \text{если } u_a \geq U_0; \\ -U_{m.a}, & \text{если } u_a < U_0; \end{cases} \quad (2.19)$$

$$U_b = \begin{cases} U_{m.b}, & \text{если } u_b \geq U_0; \\ -U_{m.b}, & \text{если } u_b < U_0; \end{cases} \quad (2.20)$$

$$U_c = \begin{cases} U_{m.c}, & \text{если } u_c \geq U_0; \\ -U_{m.c}, & \text{если } u_c < U_0. \end{cases} \quad (2.21)$$

Здесь сигналы управления u_a , u_b , u_c разные, а опорный треугольный сигнал U_0 общий.

В результате этого широтная модуляция обеспечит изменение ширины импульсов в зависимости от фазы напряжения.

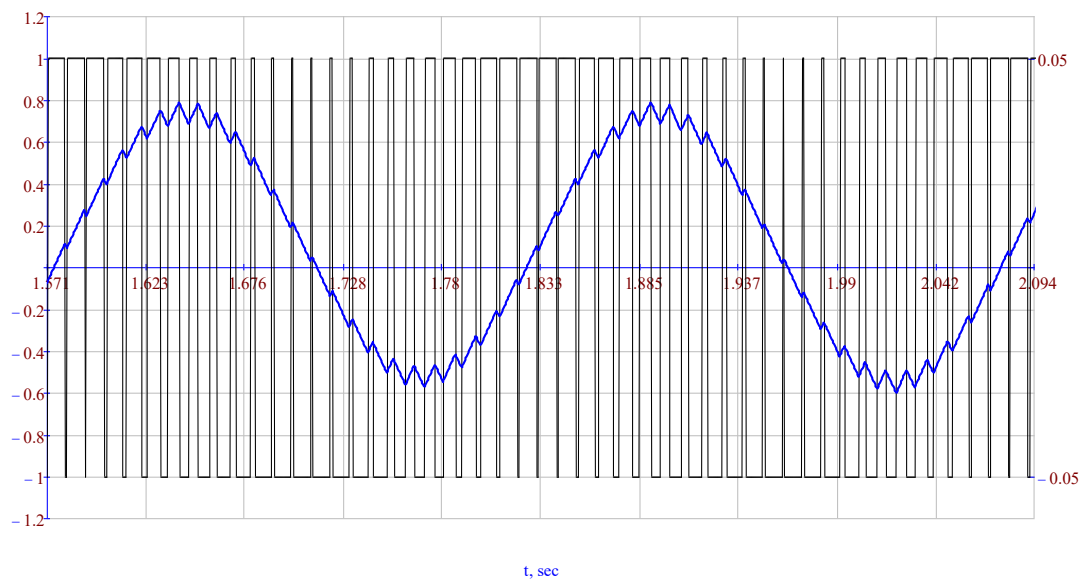


Рисунок 2.13 — Формирование широтно-модулированных импульсов по закону синуса (фаза А)

Видно, что импульсы каждой фазы смещены относительно импульсов другой фазы в соответствии со смещением формируемых токов.

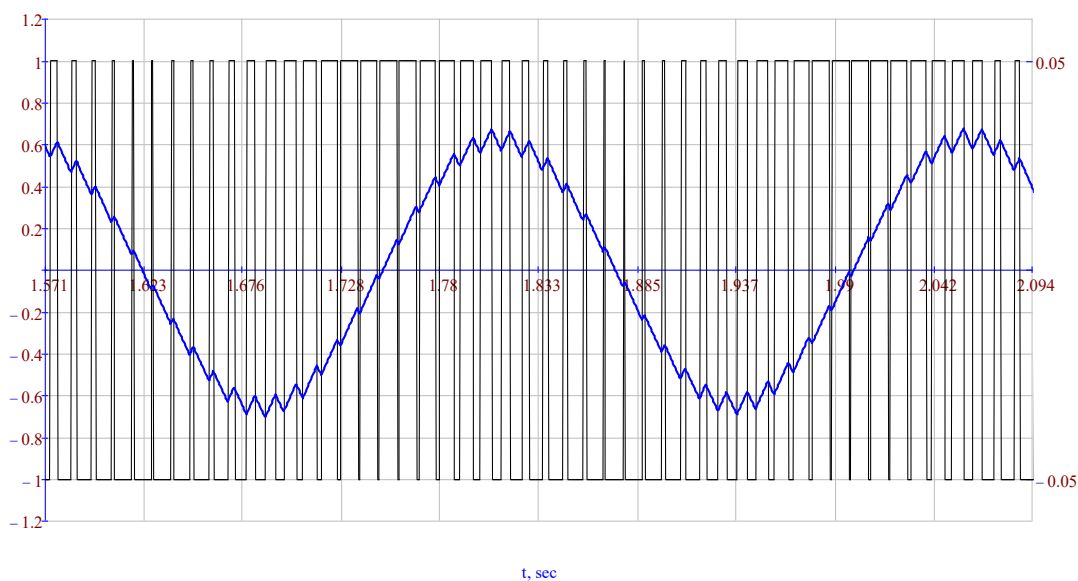


Рисунок 2.14 — Формирование широтно-модулированных импульсов по закону синуса (фаза В)

В данном случае выбрано такое число тактовых импульсов на период формируемых токов (24 импульса), что колебания токов весьма малы.

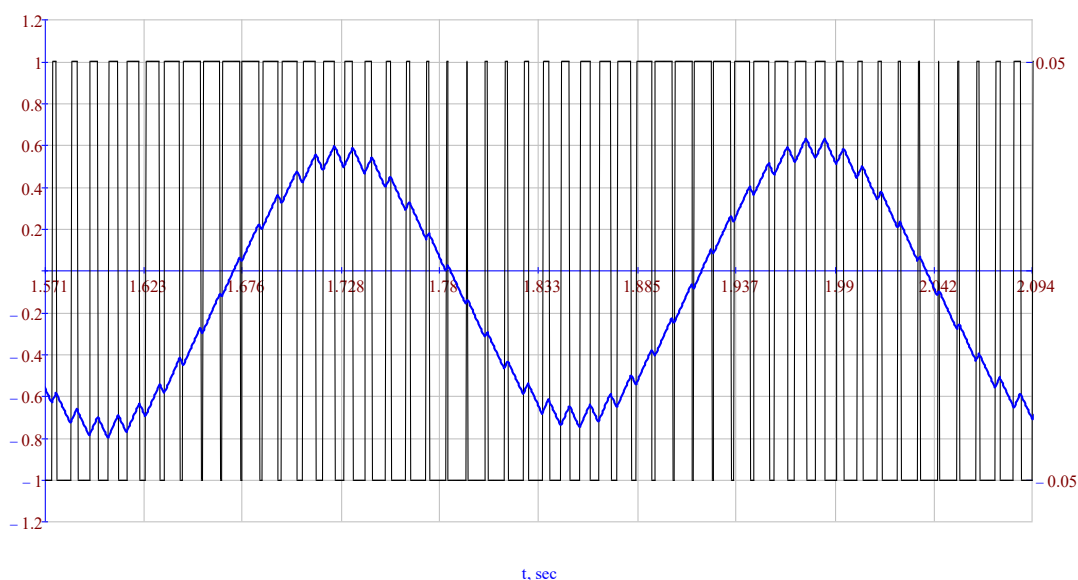


Рисунок 2.15 — Формирование широтно-модулированных импульсов по закону синуса (фаза С)

Все три тока трёхфазной системы электропитания показаны ниже (Рисунок 2.16).

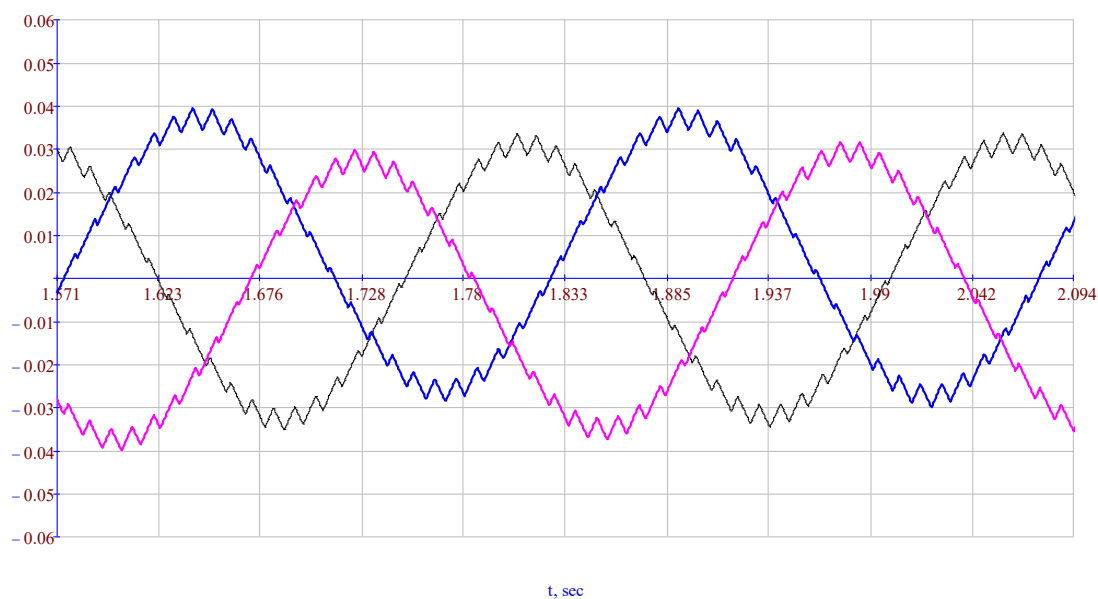


Рисунок 2.16 — Токи трёхфазной системы электропитания

Для регулирования величины тока необходимо изменять амплитуду напряжения:

$$A_{\sin}(t) = f(t),, \quad (2.22)$$

где $f(t)$ — функция изменения амплитуды.

Таким образом один и тот же транзисторно-диодный ключ и мостовая схема его использования применяются как для регулирования величины постоянного тока, так и для регулирования величины переменного тока, в том числе в многофазных цепях.

2.6 Математическая модель двигателя постоянного тока для использования совместно с широтно-импульсным преобразователем

Широтно-импульсный преобразователь формирует постоянный ток необходимой величины (подраздел 2.4). Он может применяться с любой обмоткой в качестве нагрузки. В данной работе продемонстрирована его работа с двигателем постоянного тока (ДПТ). Для этого использована модель ДПТ в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{1}{L}(-ri + U); \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J}(c_M i + M_s), \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

где i — ток якоря;

ω_r — угловая скорость вала;

r — активное сопротивление якорной обмотки;

U — напряжение питания якорной обмотки;

c_M — конструкционная постоянная (приводится в паспортных данных);

M_s — статический момент сопротивления со стороны нагрузки.

Использование ШИП с двигателем постоянного тока является общепринятым подходом к регулированию скорости ДПТ.

Выводы по разделу 2

Представлены разработанные и взятые из литературы модели элементов которые будут использованы далее при демонстрации функционирования разработанной универсальной модели транзисторного коммутатора с учётом логики работы и внутренних параметров транзисторов и диодов.

3 Комплекс программ для моделирования систем электропитания

3.1 Структура разработанного комплекса программ

Для реализации моделей системы электропитания были разработаны процедуры, которые не входят во встроенную библиотеку MathCAD14.

Процедуры связаны как с простыми логическими операциями, так и с новой моделью транзисторно-диодного коммутатора.

Все пояснения к работе программы приведены на рабочих листах в приложениях.

Комплекс программ содержит три библиотеки функций, необходимых для реализации программной реализации модели транзисторного коммутатора, и для их тестирования:

- 1) библиотека функций, формирующих модель транзисторно-диодного ключа (Приложение Б);
- 2) библиотека функция, формирующих модель широтно-импульсного модулятора и широтно-импульсного преобразователя (Приложение В);
- 3) библиотека функций, формирующих модель двигателя постоянного тока и механической нагрузки для тестирования комплекса программ (Приложение Г).

Эти библиотеки используются в модулях для тестирования усовершенствованной модели транзисторно-диодного ключа:

- 1) программа для моделирования транзисторного коммутатора на примере однофазной электрической цепи широтно-импульсным преобразователем (Приложение А);
- 2) Программа для моделирования электропривода постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем (Приложение Д);
- 3) программа для моделирования транзисторного коммутатора на примере трёхфазной электрической цепи (Приложение Е).

Разработанные модули в данном случае используются отдельно для изучения свойств различных источников электропитания. Разработанные в них модели могут быть объединены с моделями электроприводов и использоваться для моделирования соответствующих процессов. Перенесение моделей в новые программы не вызывает затруднений.

Каждый модуль выполнен в виде нескольких рабочих листов MathCAD14 с соответствующими текстовыми пояснениями. Это делает каждую программу понятной при ознакомлении с ней. В результате упрощается перенос разработанных моделей в другие программы.

В модулях имеются необходимые параметры и настройки для используемых моделей, что можно использовать для адаптации этих моделей при включении их в другие программы.

3.2 Состав разработанных функций

Библиотека функций, формирующих модель транзисторно-диодного ключа (Приложение Б), имеет следующий состав.

Все детальные пояснения к работе программы приведены на рабочих листах.

Для удобства программирования создан комплекс элементарных логических функций (Таблица 1).

Таблица 1 — Элементарные логические функции

№	Название модуля	Вид в MathCAD
1	Логическая операция Отрицание	$\text{NOT}(z) := 1 - z$
2	Логическая операция «Больше нуля»	$\text{ZNAK}(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$
3	Логическая операция И	$\text{AND}(z_1, z_2) := z_1 \cdot z_2$
4	Логическая операция «Равно»	$\text{EQ}(z_1, z_2) := \begin{cases} 1 & \text{if } z_1 = z_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

Логические операции предназначены для работы как с логическими сигналами $[0,1]$, так и с обычными аналоговыми сигналами. Единственная чисто логическая функция — NOT, она работает только с цифровыми сигналами $[0,1]$. Но на выходе всех функций формируются 0 или 1.

С использованием этих элементарных логических функций построены составные логические функции (Таблица 2).

Таблица 2 — Составные логические функции

№	Название модуля	Вид в MathCAD
1	Вспомогательная функция	$\text{Logik3}(a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3) := \text{AND}[\text{EQ}(a_1, b_1), (\text{AND}(\text{EQ}(a_2, b_2), \text{EQ}(a_3, b_3)))]$
2	Вспомогательная функция	$\text{Logik2}(a_1, b_1, a_2, b_2) := \text{EQ}(\text{EQ}(a_1, b_1), \text{EQ}(a_2, b_2))$
3	Генератор треугольного сигнала	$\text{FTriAngul}(\text{Atri}, x) := \text{Atri} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \text{asin}(\sin(x))$
4	Компаратор двусторонний	$\text{FKompar}(x1, x2) := \text{if}(x1 \geq x2, 1, -1)$

Для использования непосредственно в моделях элементов источников питания были разработаны специализированные модули (Таблица 3).

Таблица 3 — Специализированные функции для ШИМ и ШИП

№	Название модуля	Вид в MathCAD
1	Широтно-импульсный преобразователь для цепей постоянного тока	$\text{Fship}(\text{gamma}, \text{Atri}, \text{FiTri}) := \text{FKompar}(\text{gamma}, \text{FTriAngul}(\text{Atri}, \text{FiTri}))$
2	Широтно-импульсный модулятор для цепей переменного тока	$\text{Fshim}(\text{Asin}, \text{FiSin}, \text{Atri}, \text{FiTri}) := \text{FKompar}(\text{Asin} \cdot \sin(\text{FiSin}), \text{TriAngul}(\text{Atri}, \text{FiTri}))$
3	Функция расчёта потенциала на выходе ключа	$\text{FiTK}(\text{KL}, i) := \text{KL}_5 - \text{KL}_4 - \text{KL}_2 - (\text{KL}_1 \cdot i) - (\text{KL}_3 \cdot i)$

Эти функции используются далее в других программах.

Для имитации работы транзисторно-диодного ключа используется таблица состояния его элементов (диода, транзистора):

$$\text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i) := \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{G_D(i)} & \frac{1}{G_T(i)} & \frac{1}{G_D(i)} & 0 & 0 & \frac{1}{G_T(i)} & \frac{1}{G_T(i)} \\ 0 & e_D & e_T & e_D & 0 & 0 & e_T & e_T \\ \frac{1}{G_D(i)} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_D(i)} & \frac{1}{G_T(i)} & \frac{1}{G_T(i)} & \frac{1}{G_T(i)} \\ e_D & 0 & 0 & 0 & e_D & e_T & e_T & e_T \\ 0 & \phi_D & \phi_T & \phi_D & 0 & 0 & \phi_T & \phi_T \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.1 — Таблица состояния его элементов (диода, транзистора)

Собственно модель транзисторно-диодного ключа реализована следующим образом:

$$\begin{array}{l}
\text{KL}(\lambda_1, \lambda_2, \phi_D, \phi_T, i) := \text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 0, \lambda_2, 0, \text{Znak}(i), 1) = 1 \\
\quad \left| \begin{array}{l} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{\langle 1 \rangle} \\ q_6 \leftarrow 1 \end{array} \right. \\
\text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 0, \lambda_2, 0, \text{Znak}(i), 0) = 1 \\
\quad \left| \begin{array}{l} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{\langle 2 \rangle} \\ q_6 \leftarrow 2 \end{array} \right. \\
\text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 1, \lambda_2, 0, \text{Znak}(i), 1) = 1 \\
\quad \left| \begin{array}{l} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{\langle 3 \rangle} \\ q_6 \leftarrow 3 \end{array} \right. \\
\text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 1, \lambda_2, 0, \text{Znak}(i), 0) = 1 \\
\quad \left| \begin{array}{l} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{\langle 4 \rangle} \\ q_6 \leftarrow 4 \end{array} \right. \\
\text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 0, \lambda_2, 1, \text{Znak}(i), 1) = 1 \\
\quad \left| \begin{array}{l} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{\langle 5 \rangle} \\ q_6 \leftarrow 5 \end{array} \right. \\
\text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 0, \lambda_2, 1, \text{Znak}(i), 0) = 1 \\
\quad \left| \begin{array}{l} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{\langle 6 \rangle} \\ q_6 \leftarrow 6 \end{array} \right. \\
\text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 1, \lambda_2, 1, \text{Znak}(i), 1) = 1 \\
\quad \left| \begin{array}{l} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{\langle 7 \rangle} \\ q_6 \leftarrow 7 \end{array} \right. \\
\text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 1, \lambda_2, 1, \text{Znak}(i), 0) = 1 \\
\quad \left| \begin{array}{l} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{\langle 8 \rangle} \\ q_6 \leftarrow 8 \end{array} \right. \\
q
\end{array}$$

Рисунок 3.2 — Модель транзисторно-диодного ключа

Для визуализации работы элементов транзисторно-диодного ключа разработана специальная процедура:

```

VDVT(k, vD, vT) := if k = 1
                    | z1 ← 0
                    | z2 ← -vD
                    if k = 2
                    | z1 ← vD
                    | z2 ← 0
                    if k = 3
                    | z1 ← vT
                    | z2 ← 0
                    if k = 4
                    | z1 ← vD
                    | z2 ← 0
                    if k = 5
                    | z1 ← 0
                    | z2 ← -vD
                    if k = 6
                    | z1 ← 0
                    | z2 ← -vT
                    if k = 7
                    | z1 ← vT
                    | z2 ← -vT
                    if k = 8
                    | z1 ← vT
                    | z2 ← -vT
                    z

```

Рисунок 3.3 — Функция для визуализации работы элементов транзисторно-диодного ключа

Данная процедура используется там, где необходимо контролировать состояние диодов и транзисторов. На работу самой модели транзисторно-диодного ключа эта процедура не влияет.

Расчёт модели транзисторно-диодного ключа производится следующим образом:

- 1) анализируется состояние ключа: направление тока, сигналы на открытие верхнего и нижнего транзистора;
- 2) определяется, какому из шести возможных состояний это состояние соответствует (Рисунок 3.2);
- 3) для выбранного состояния из таблицы (Рисунок 3.1) выбираются параметры ключа;
- 4) рассчитывается потенциал напряжения на выходе ключа (Таблица 3);
- 5) потенциал напряжения передаётся в модель нагрузки (двигатель или др.);
- 6) выполняется численное интегрирование стандартной программой и определяется новое значение тока на очередном шаге;
- 7) далее выполняются вычисления по пунктам 1–6 до момента окончания расчётов, заданного при моделировании.

Эти расчёты могут сочетаться с другими вычислениями — в зависимости от используемой программы.

3.3 Программа для моделирования широтно-импульсного преобразователя на основе транзисторного коммутатора на примере цепи с RL-нагрузкой

Программа реализована в MathCAD14 (Приложение А).

Цель этой программы — продемонстрировать различия в токах при использовании идеализированных транзисторов и диодов и с учётом реальных вольтамперных характеристик. Для этого разработана универсальная модель транзисторно-диодного ключа и транзисторного коммутатора на его основе (Приложение В):

$$\begin{aligned}
 \text{FTK_2}(t, I, \lambda, \phi_D, \phi_T, vD, vT, \text{indU}, \text{indR}) := & \left[\begin{array}{l}
 \text{KL1} \leftarrow \text{KL}(\lambda, 1 - \lambda, \phi_D, \phi_T, I) \\
 \text{KL2} \leftarrow \text{KL}(1 - \lambda, \lambda, \phi_D, \phi_T, I) \\
 \text{if } \text{indR} = 1 \\
 \quad \left[\begin{array}{l}
 \text{KL1}_1 \leftarrow 0 \\
 \text{KL2}_1 \leftarrow 0 \\
 \text{KL1}_3 \leftarrow 0 \\
 \text{KL2}_3 \leftarrow 0
 \end{array} \right. \\
 \text{R}_{1,1} \leftarrow \text{KL1}_1 \\
 \text{R}_{1,2} \leftarrow \text{KL1}_3 \\
 \text{R}_{2,1} \leftarrow \text{KL2}_1 \\
 \text{R}_{2,2} \leftarrow \text{KL2}_3 \\
 \text{if } \text{indU} = 1 \\
 \quad \left[\begin{array}{l}
 \text{KL1}_2 \leftarrow 0 \\
 \text{KL2}_2 \leftarrow 0 \\
 \text{KL1}_4 \leftarrow 0 \\
 \text{KL2}_4 \leftarrow 0
 \end{array} \right. \\
 \phi_1 \leftarrow \text{FiTK}(\text{KL1}, I) \\
 \phi_2 \leftarrow \text{FiTK}(\text{KL2}, I) \\
 \text{S}_{1,1} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL1}_6, vD, vT)_1 \\
 \text{S}_{2,1} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL1}_6, vD, vT)_2 \\
 \text{S}_{1,2} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL2}_6, vD, vT)_1 \\
 \text{S}_{2,2} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL2}_6, vD, vT)_2 \\
 \text{S}_{1,3} \leftarrow \text{R}_{1,1} \cdot I^2 \\
 \text{S}_{2,3} \leftarrow \text{R}_{1,2} \cdot I^2 \\
 \text{S}_{1,4} \leftarrow \text{R}_{2,1} \cdot I^2 \\
 \text{S}_{2,4} \leftarrow \text{R}_{2,2} \cdot I^2 \\
 \left(\begin{array}{c} \phi \\ S \end{array} \right)
 \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Рисунок 3.4 — Универсальная модель транзисторного коммутатора с учётом и без учёта реальных вольтамперных характеристик элементов

В зависимости от значения указателя indU и indR возможен полный учёт BAX или только его частичный учёт.

При $\text{indU}=0$ и $\text{indR}=0$ реальные BAX учитываются полностью.

При $\text{indU}=1$ не учитываются напряжение насыщения на транзисторе и прямое напряжение на диоде.

При $\text{indR}=1$ не учитываются внутренне сопротивление транзистора и диода.

В результате расчётов получены значения токов для случая идеализированной модели и для случая учёта реальных BAX диодов и транзисторов в соответствии с предложенным подходом. Разность между значениями токов может составлять до 10% в зависимости от типа транзисторов и диодов (их конкретных BAX) и напряжения питания. При малых напряжениях питания падение напряжения на внутренних сопротивлениях становится заметнее (Рисунок 3.5).

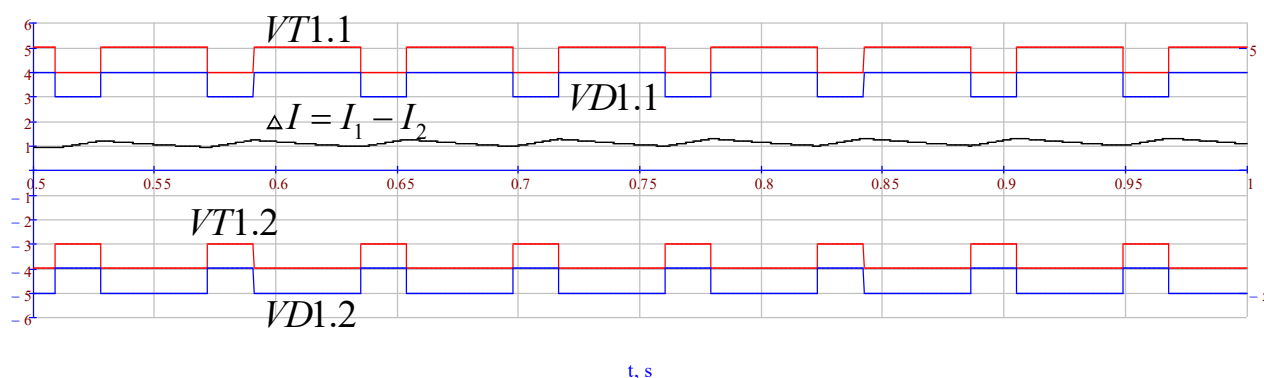


Рисунок 3.5 — Разность между значениями тока, рассчитанного по идеализированной и уточнённой моделями

Имеется возможность увидеть, на каком этапе работы ключа имеется то или иное различие в определении значений тока.

Поскольку в уточнённой модели рассчитываются сопротивления транзисторов и диодов, имеется возможность расчёта рассеиваемой мощности на них, например, для верхних транзистора и диода левого (по схеме) ключа транзисторного коммутатора (Рисунок 3.6).

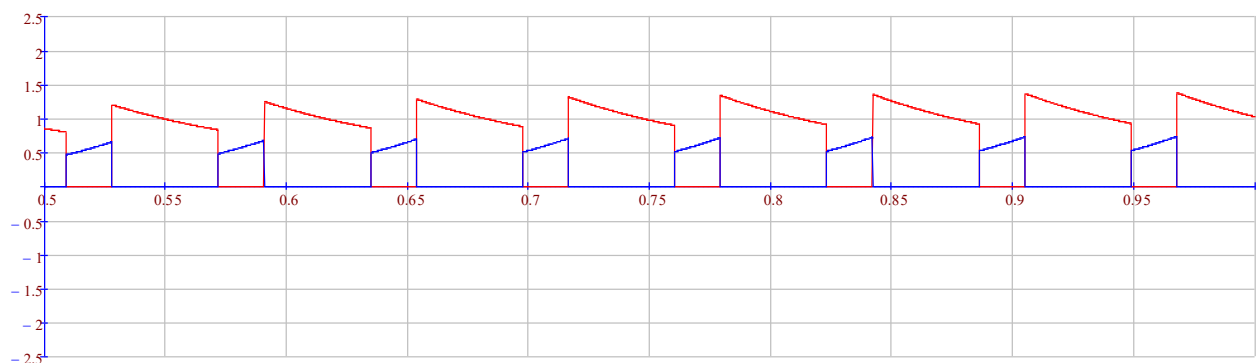


Рисунок 3.6 — Рассеиваемая мощность на верхних транзисторе и диоде
левого ключа

Аналогично рассеиваемая мощность для нижних транзистора и диода левого (по схеме) ключа транзисторного коммутатора (Рисунок 3.6).

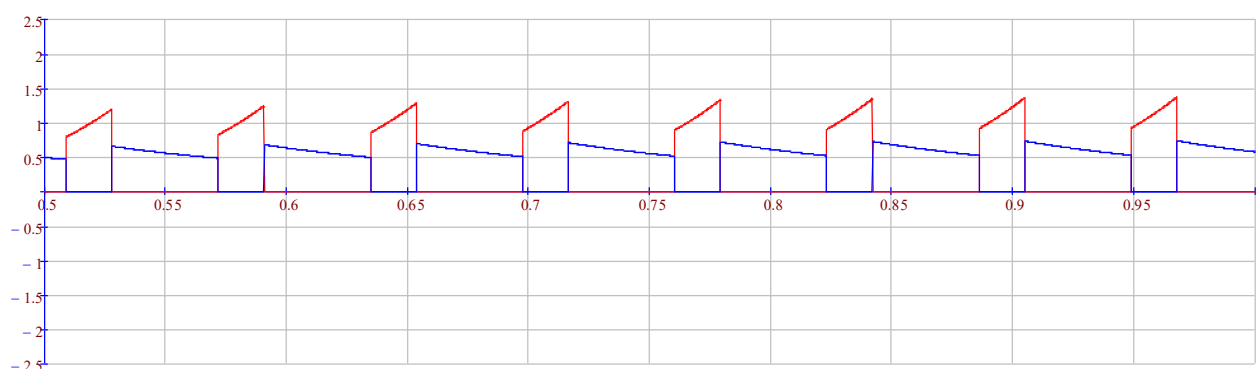


Рисунок 3.7 — Рассеиваемая мощность на нижних транзисторе и диоде
левого ключа

Аналогичные графики получаются и для транзисторов и диодов правого (по схеме) ключа транзисторного коммутатора.

Такие расчёты позволяют проектировщикам более обоснованно выбрать типы транзисторов и диодов с учётом их рассеиваемой мощности, приближенной к процессам в реальной схеме.

3.4 Программа для моделирования транзисторного коммутатора на примере двигателя постоянного тока

Проведено тестирование разработанной модели транзисторно-диодного ключа для управления двигателем постоянного тока (Приложение Д).

Здесь так же реализована универсальная модель электропривода с двигателем постоянного тока (Приложение Г).

Выполнены расчёты по известной идеализированной и предложенной усовершенствованной моделям транзисторно-диодного ключа.

Все результаты приведены в приложении (Приложение Д).

В целом получены результаты, аналогичные результатам, рассмотренным в подразделе 3.3.

Также выявлены расхождения в расчёте токов порядка нескольких процентов (до 10%), а также продемонстрирована возможность расчёта рассеиваемой мощности на транзисторах и диодах при использовании усовершенствованной модели транзисторно-диодного ключа.

В целом показано, как можно использовать разработанную модель транзисторно-диодного ключа в электроприводах с двигателем постоянного тока.

Выводы по разделу 3

В разделе рассмотрен состав комплекса программ для моделирования процессов в системах электропитания. Рассмотрены библиотеки разработанных функций и программы, в которых они используются. Продемонстрированы возможности предложенной уточнённой модели транзисторно-диодного ключа для повышения точности расчётов, а также для получения дополнительной информации — о рассеиваемой мощности на транзисторах и диодах в различных режимах работы и на различных этапах процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе разработан комплекс программ в среде MathCAD14 для исследования процессов в системах электропитания на основе транзисторного коммутатора.

Основой для программных моделей является предложенный в работе учёт логики работы транзисторно-диодных ключей, соответствующей реальным процессам при работе на активно-индуктивную нагрузку, а также реальные параметры транзисторов и диодов — их вольтамперные характеристики.

Полученная модель позволяет более точно моделировать процессы. Показано, что при использовании идеальных ключей погрешность расчёта токов может составлять до 10% — в зависимости от используемых транзисторов и диодов и от величины напряжения питания: чем меньше напряжение питания, тем больше погрешность расчётов.

Учёт реальных вольтамперных характеристик (т. е. внутренних сопротивлений) транзисторов и диодов позволяет рассчитывать рассеиваемую мощность на них. Это даёт возможность проектировщикам более точно выбирать типы транзисторов и диодов, а также оценить необходимость и параметры теплоотвода.

Разработанная модель транзисторного коммутатора пригодна для моделирования как цепей постоянного, так и переменного тока.

Тестирование программ показало их качественное соответствие результатам, известным из литературы.

СОКРАЩЕНИЯ

ВТ — (кафедра) вычислительной техники

ДПТ — двигатель постоянного тока

ИКИТ — Институт космических и информационных технологий

НУЛ — научно-учебная лаборатория

САПР — системы автоматизированного проектирования

СФУ — Сибирский федеральный университет

СЭП — система электропитания

ТДК — транзисторно-диодный ключ

ТК — транзисторный коммутатор

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Владимиров, Я. Г. Моделирование на ЭВМ процессов в полупроводниковом преобразователе БДПТ / Я. Г. Владимиров // Электронная техника в автоматике : сб. статей / под ред. Ю. И. Конева. – Вып. 17. – Москва : Радио и связь, 1986. – С. 28–35.
- 2 Дьяконов, В. Maple 7 : учебный курс / В. Дьяконов. – Санкт-Петербург : Питер, 2002. – 672 с. – ISBN 5-318-00719-8.
- 3 Дьяконов, В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 /7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2006. – 456 с. – ISBN 5-98003-255-X.
- 4 Мелешин, В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. — М. : Техносфера, 2006. — 632 с. — ISBN 5-94836-051-2.
- 5 Очков, В. Ф. MathCAD 14 для инженеров и конструкторов / В. Ф. Очков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2007. – 368 с. – ISBN 978-5-9775-0129-3.
- 6 Розанов, Ю. К. Электронные устройства электромеханических систем / Ю. К. Розанов, Е. М. Соколов. – 2-е изд., стер. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с. – ISBN 5-7695-3515-6.
- 7 Розанов, Ю. К. Силовая электроника / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – 2-изд. стер. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с. – ISBN 978-5-383-00403-6.
- 8 Смирнов, А. Ю. Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями : учеб. пособие / А. Ю. Смирнов. – Москва : Инфра-Инженерия, 2022. – 228 с. – ISBN 978-5-9729-0869-1.
- 9 Соболев, Л. Б. Моделирование электрических процессов в полупроводниковом преобразователе при управлении бесколлекторным двигателем постоянного тока / Л. Б. Соболев // Электронная техника в автоматике : сб. ст. / под ред. Ю. И. Конева. – Вып. 17. – Москва : Радио и связь, 1986. – С. 23–28.

10 Соболев, Л. Б. Цифровое моделирование процессов в импульсных источниках вторичного электропитания и бесколлекторных двигателях постоянного тока / Л. Б. Соболев // Электронная техника в автоматике : сб. ст. / под ред. Ю. И. Конева. – Вып.16. – Москва : Радио и связь, 1985. – С. 186–191.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Рабочие листы MathCAD.
Модель ШИП и однофазной RL-нагрузки

ORIGIN = 1	МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ "Однофазная обмотка - широтно-импульсный преобразователь"
СЭП: транзисторно-диодный ключ:	
	Reference: D:\0-Dokument\0-Дипломирование-Бронов\0-СбУ\Бакалавры\2022\Дипломники\Войченко-КИ18-07Б-СЭП\Программы\СЭП-библиотека-ТДК.xmcd(R)
СЭП: транзисторный коммутатор:	
	Reference: D:\0-Dokument\0-Дипломирование-Бронов\0-СбУ\Бакалавры\2022\Дипломники\Войченко-КИ18-07Б-СЭП\Программы\СЭП-библиотека-ШИМ.xmcd(R)
СЭП: чистое индуктивное сопротивление:	
	Reference: D:\0-Dokument\0-Дипломирование-Бронов\0-СбУ\Бакалавры\2022\Дипломники\Войченко-КИ18-07Б-СЭП\Программы\СЭП-библиотека-RKF45.xmcd(R)

Параметры моделей

RL-нагрузка

Сопротивление, Ом	$R_x := 10$	Индуктивность, Гн	$L_x := 0.1$
	$FLR1(R, L, x, U) := \frac{(-R \cdot x + U)}{L}$		

Параметры источника питания

Потенциал источника питания, В:	$\phi_T := 5$	Уровень индикации открытого транзистора:	$vT := 1$
Частота импульсов ШИП, Гц	$f_0 := 100$	Уровень индикации открытого диода	$vD := 1$
Функция изменения напряжения	$FU_{pit}(t) := 0.4$		

Выбор формирователи напряжения питания и упрощения модели транзисторно-диодного ключа

Формирователи напряжения питания:

- KU=1 - постоянное;
- KU=2 - идеальный ПИИП без учёта наличия диодов;
- KU=3 - идеальный ПИИП с учётом наличия диодов;
- KU=4 - ПИИП с учётом внутренних сопротивлений диодов и транзисторов

Вариант 1: KU1 := 4 indU1 := 0 indR1 := 0

D1(t,x) :=

$L \leftarrow \text{Fship}(\text{FUpit}(t), 1, f_0 \cdot t)$
 $\lambda \leftarrow \text{if}(L \geq 0, 1, 0)$
 $KL1 \leftarrow KL(\lambda, 1 - \lambda, \phi_T, \phi_T, x_1)$
 $KL2 \leftarrow KL(1 - \lambda, \lambda, \phi_T, \phi_T, x_1)$
 if KU1 = 1
 $\phi_1 \leftarrow 0.5 \cdot \text{FUpit}(t) \cdot \phi_T$
 $\phi_2 \leftarrow -0.5 \cdot \text{FUpit}(t) \cdot \phi_T$
 if KU1 = 2
 $\phi_1 \leftarrow \lambda \cdot \phi_T$
 $\phi_2 \leftarrow (1 - \lambda) \cdot \phi_T$
 if KU1 = 3
 $\phi_1 \leftarrow KL1_5$
 $\phi_2 \leftarrow KL2_5$

$\begin{pmatrix} \phi \\ S \end{pmatrix} \leftarrow \text{FTK_2}(t, x_1, \lambda, \phi_T, \phi_T, vD, vT, \text{indU1}, \text{indR1})$ if KU1 = 4
 $u \leftarrow \phi_1 - \phi_2$
 $z_1 \leftarrow \text{FLR1}(R, L, x_1, u)$
 $z_2 \leftarrow \phi_1$
 $z_3 \leftarrow \phi_2$
 $z_4 \leftarrow u$
 $z_5 \leftarrow S_{1,1}$
 $z_6 \leftarrow S_{2,1}$
 $r \leftarrow s$

Формирователи напряжения питания:

- indU=1 - постоянные падения напряжения транзистора и диода =0;
- indR=1 - внутренние сопротивления транзистора и диода =0;

Вариант 2: KU2 := 4 indU2 := 1 indR2 := 1

D2(t,x) :=

$L \leftarrow \text{Fship}(\text{FUpit}(t), 1, f_0 \cdot t)$
 $\lambda \leftarrow \text{if}(L \geq 0, 1, 0)$
 $KL1 \leftarrow KL(\lambda, 1 - \lambda, \phi_T, \phi_T, x_1)$
 $KL2 \leftarrow KL(1 - \lambda, \lambda, \phi_T, \phi_T, x_1)$
 if KU2 = 1
 $\phi_1 \leftarrow 0.5 \cdot \text{FUpit}(t) \cdot \phi_T$
 $\phi_2 \leftarrow -0.5 \cdot \text{FUpit}(t) \cdot \phi_T$
 if KU2 = 2
 $\phi_1 \leftarrow \lambda \cdot \phi_T$
 $\phi_2 \leftarrow (1 - \lambda) \cdot \phi_T$
 if KU2 = 3
 $\phi_1 \leftarrow KL1_5$
 $\phi_2 \leftarrow KL2_5$

$\begin{pmatrix} \phi \\ S \end{pmatrix} \leftarrow \text{FTK_2}(t, x_1, \lambda, \phi_T, \phi_T, vD, vT, \text{indU2}, \text{indR2})$ if KU2 = 4
 $u \leftarrow \phi_1 - \phi_2$
 $z_1 \leftarrow \text{FLR1}(R, L, x_1, u)$
 $z_2 \leftarrow \phi_1$
 $z_3 \leftarrow \phi_2$
 $z_4 \leftarrow u$
 $z_5 \leftarrow S_{1,1}$
 $z_6 \leftarrow S_{2,1}$
 $r \leftarrow s$

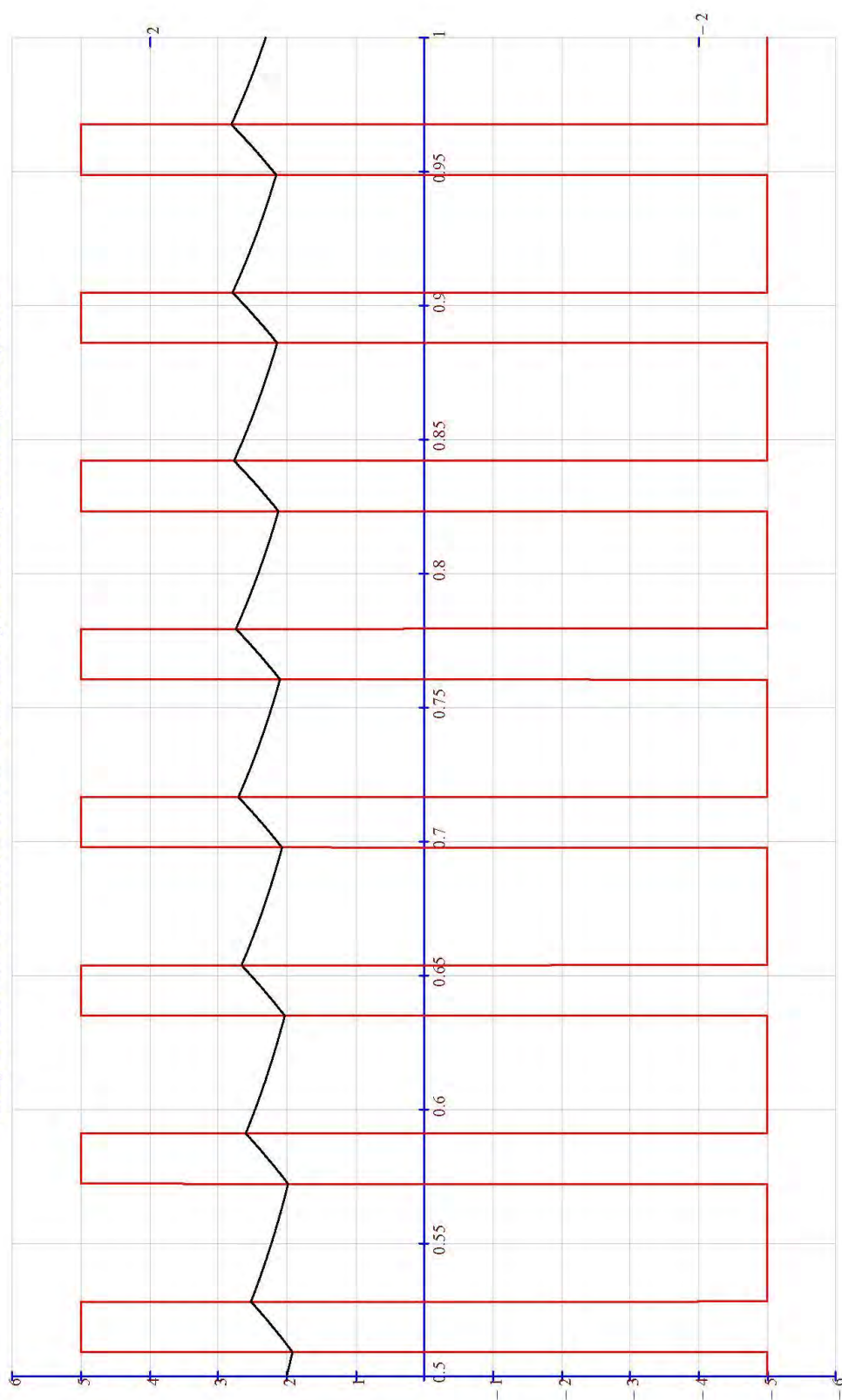
Состояние транзисторов и диодов ключей

Состояние верхнего ключа ТК1, вариант 1:	$V1K11 := Z1^{(6)}$	Состояние верхнего ключа ТК1, вариант 2:	$V2K11 := Z2^{(6)}$
Состояние нижнего ключа ТК1, вариант 1:	$V1K12 := Z1^{(7)}$	Состояние нижнего ключа ТК1, вариант 2:	$V2K12 := Z2^{(7)}$
Состояние верхнего ключа ТК2, вариант 1:	$V1K21 := Z1^{(8)}$	Состояние верхнего ключа ТК1, вариант 2:	$V2K21 := Z2^{(8)}$
Состояние нижнего ключа ТК2, вариант 1:	$V1K22 := Z1^{(9)}$	Состояние нижнего ключа ТК1, вариант 2:	$V2K22 := Z2^{(9)}$

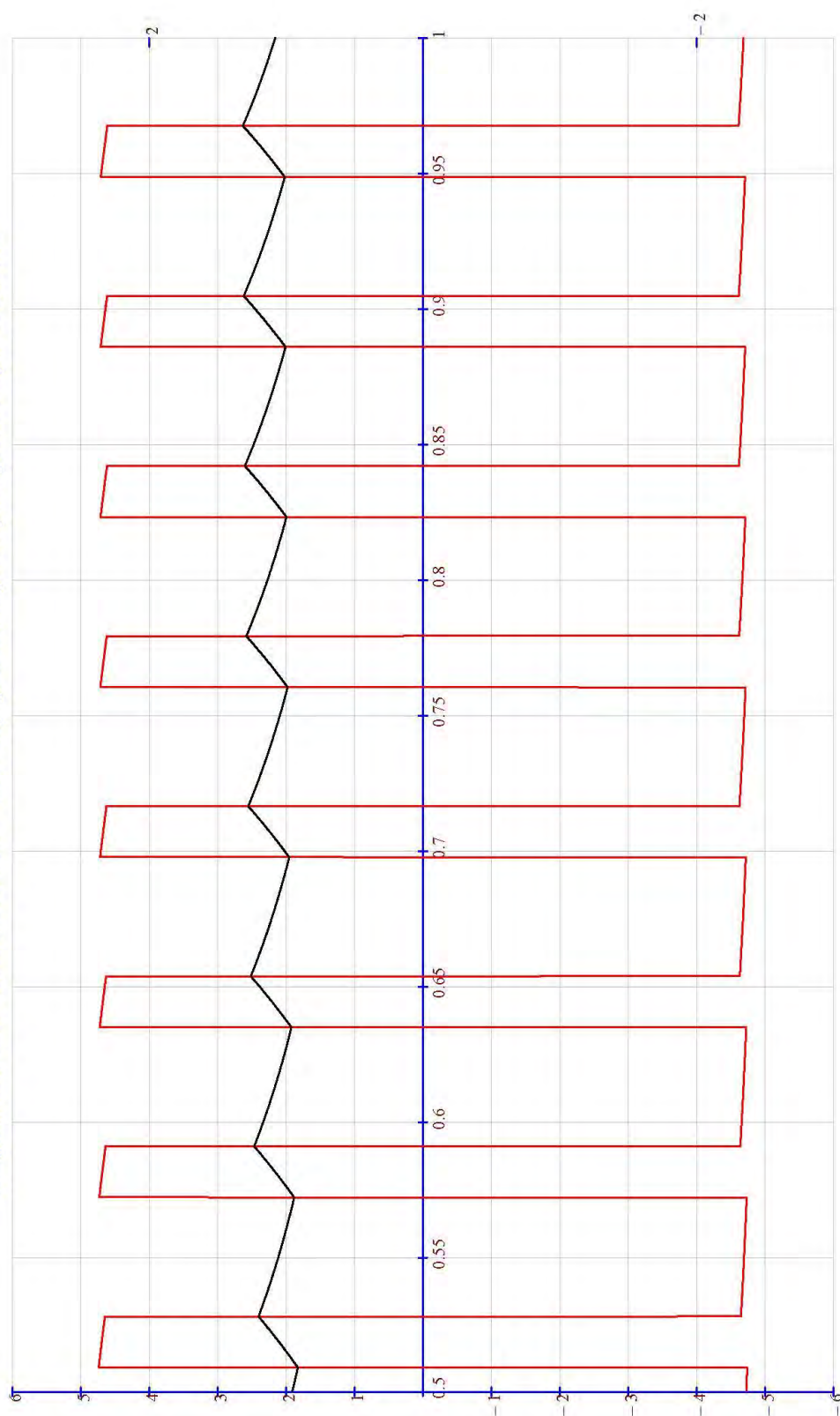
Потери в транзисторах и диодах ключей

Потери в верхнем транзисторе, вариант 1, Вт:	$p1T1 := Z1^{(10)}$
Потери в верхнем диоде, вариант 1, Вт:	$p1D1 := Z1^{(11)}$
Потери в нижнем транзисторе, вариант 1, Вт:	$p1T2 := Z1^{(12)}$
Потери в нижнем диоде, вариант 1, Вт:	$p1D2 := Z1^{(13)}$

Напряжение на обмотке, ток ТК1 - Идеализированные транзисторы и диоды



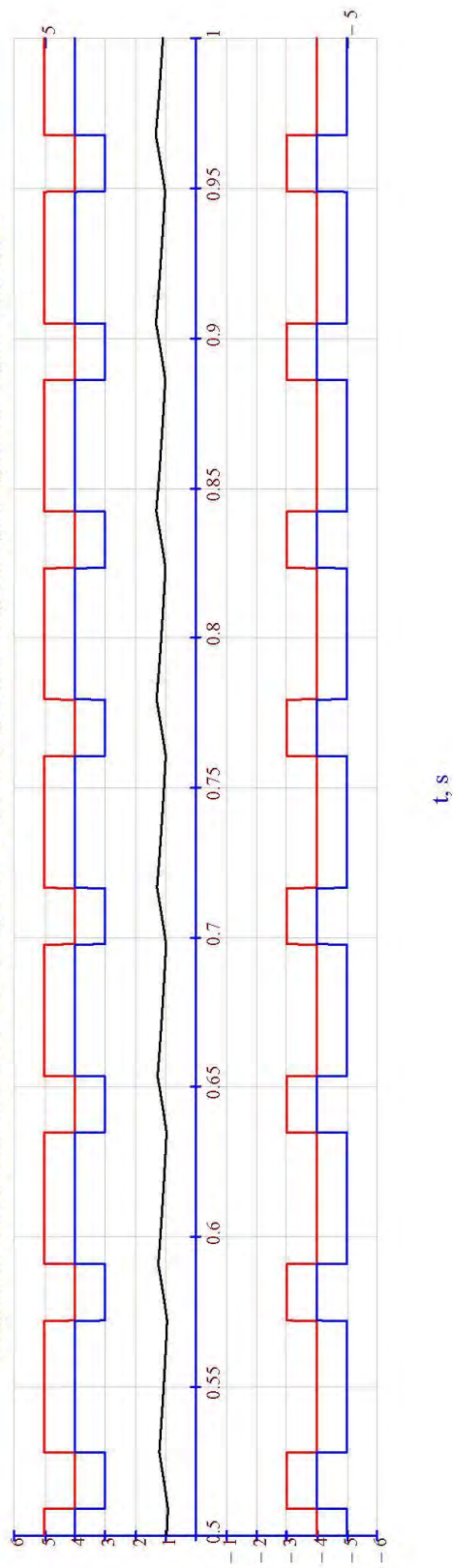
Напряжение на обмотке, ток ТК1 - Учёт внутренних параметров транзисторов и диодов



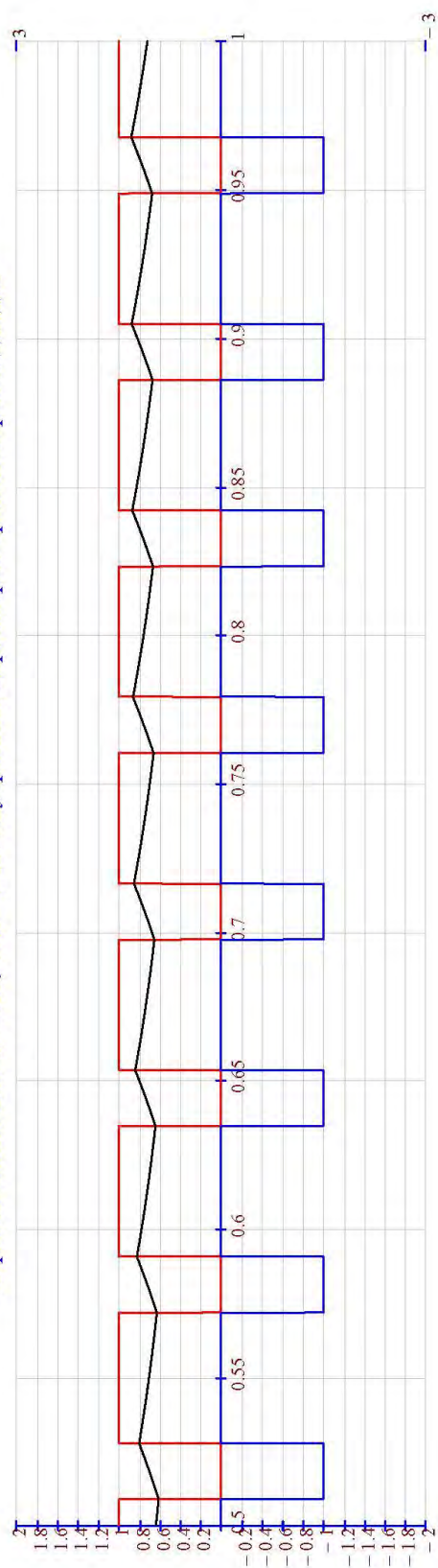
Разность токов - Идеализированные транзисторы и диоды и учёт внутренних параметров транзисторов и диодов



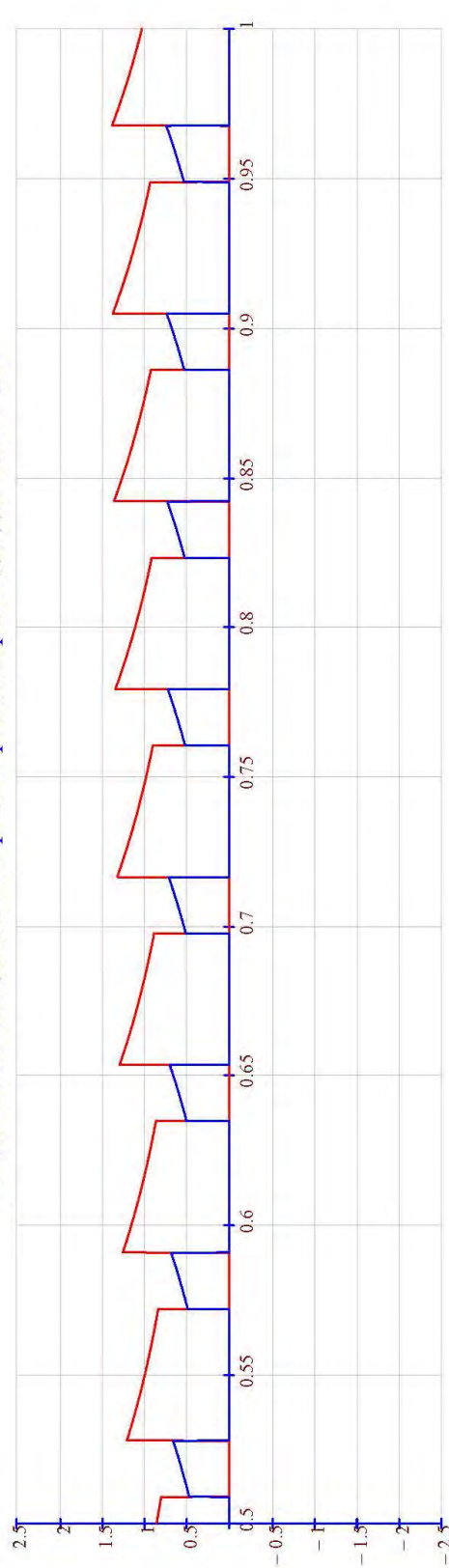
Переключение ключей ТК1 и ТК2, ток - Учёт внутренних параметров транзисторов и диодов



Переключение ключа ТК1, ток - Учёт внутренних параметров транзисторов и диодов



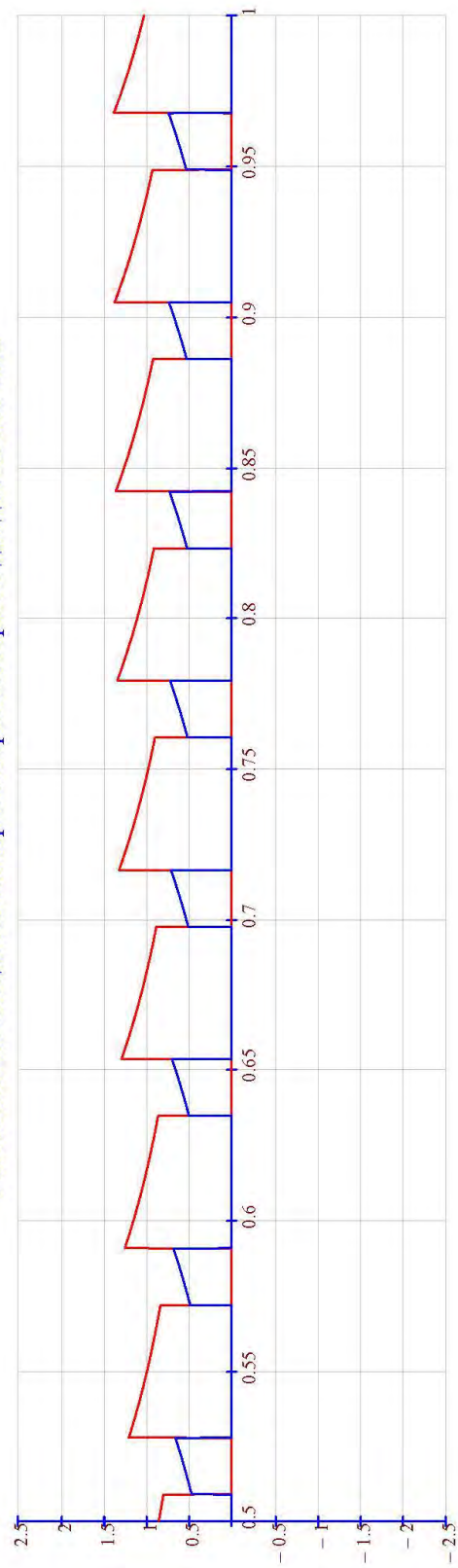
Рассеиваемая мощность на верхних транзисторах и диодах ключа ТК1



Рассеиваемая мощность на нижних транзисторах и диодах ключа ТК1



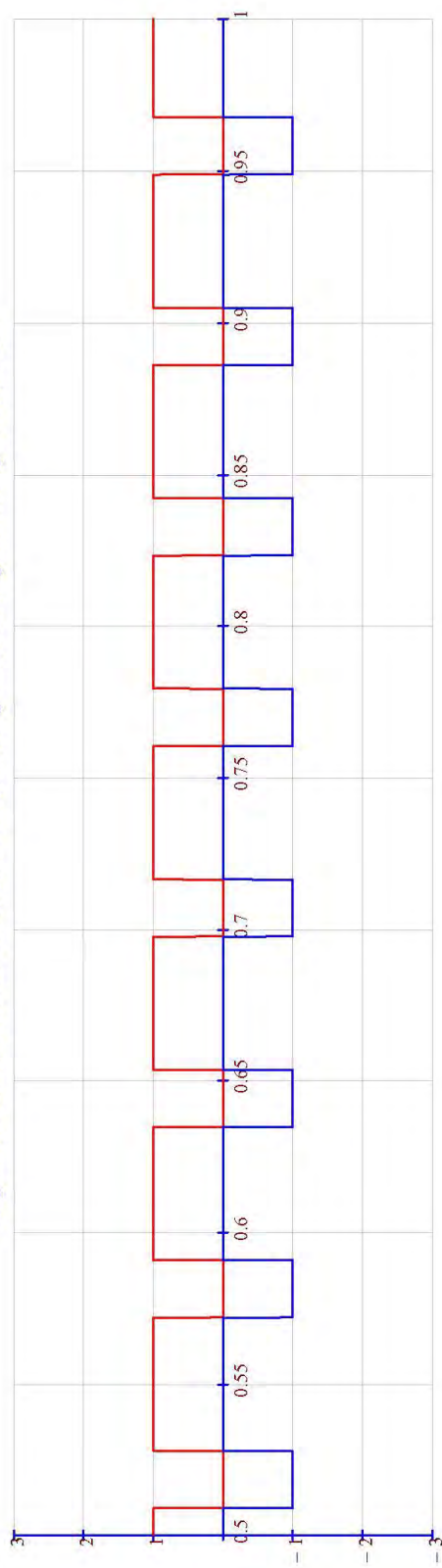
Рассеиваемая мощность на верхних транзисторах и диодах ключа ТК2



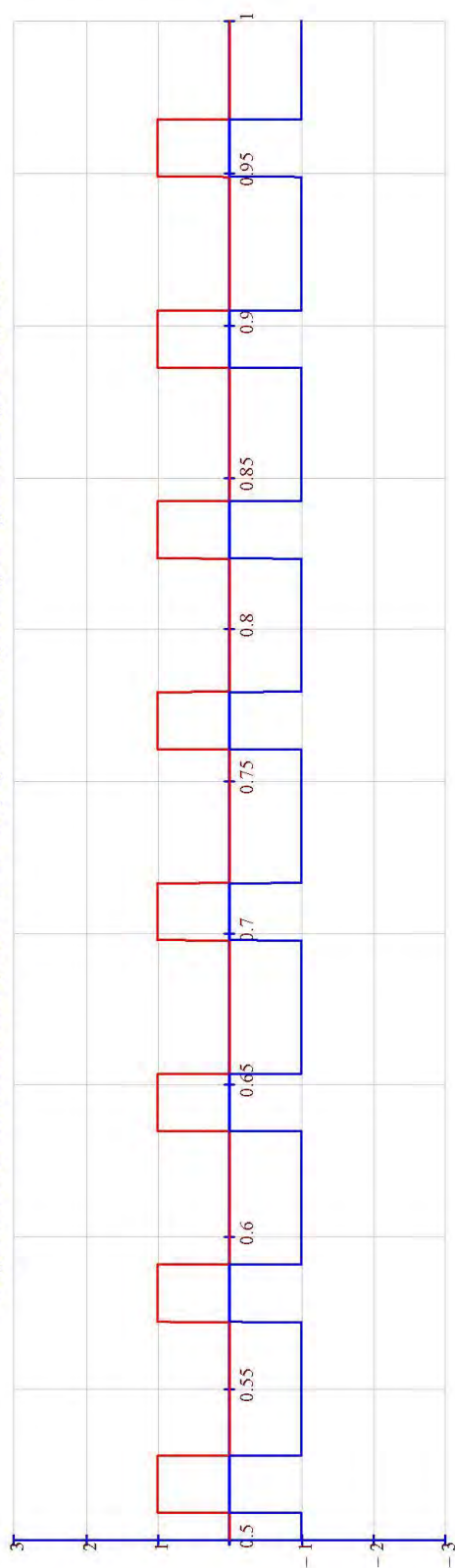
Рассеиваемая мощность на нижних транзисторах и диодах ключа ТК2



Переключение ключа ТК1, ток - Идеализированные транзисторы и диоды



Переключение ключа ТК2, ток - Учёт внутренних параметров транзисторов и диодов



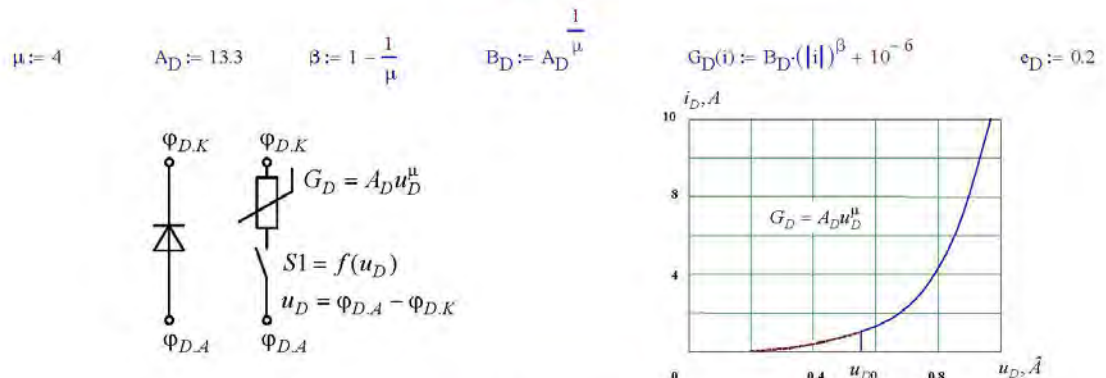
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Рабочие листы MathCAD.

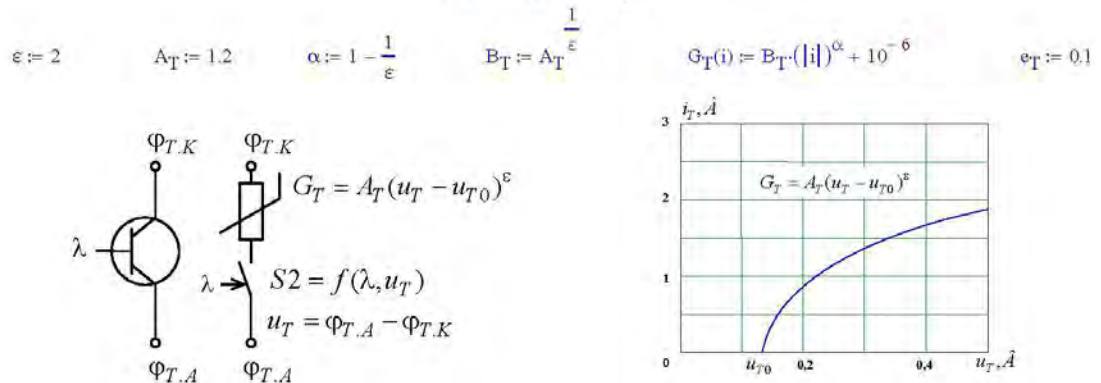
Библиотека. Модель транзисторно-диодного ключа

СЭП. Библиотека. Транзисторно-диодный ключ

Модель диода

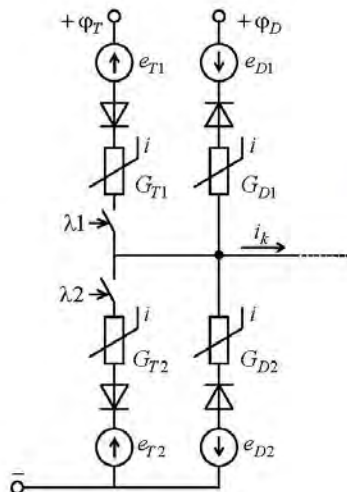


Модель транзистора



Модель транзисторно-диодного ключа

Таблица параметров ключа в зависимости от управляющих сигналов и направления тока



$$FKLM(\Phi_D, \Phi_T, i) := \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{G_D(i)} & \frac{1}{G_T(i)} & \frac{1}{G_D(i)} & 0 & 0 & \frac{1}{G_T(i)} & \frac{1}{G_T(i)} \\ 0 & e_D & e_T & e_D & 0 & 0 & e_T & e_T \\ \frac{1}{G_D(i)} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_D(i)} & \frac{1}{G_T(i)} & \frac{1}{G_T(i)} & \frac{1}{G_T(i)} \\ e_D & 0 & 0 & 0 & e_D & e_T & e_T & e_T \\ 0 & \Phi_D & \Phi_T & \Phi_D & 0 & 0 & \Phi_T & \Phi_T \end{pmatrix}$$

Библиотека вспомогательных функций

$$\text{AND}(z_1, z_2) := z_1 \cdot z_2$$

$$\text{EQ}(z_1, z_2) := \begin{cases} 1 & \text{if } z_1 = z_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Znak}(z) := \begin{cases} 0 & \text{if } z < 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Выбор варианта состояния ключа от 1 до 8 в соответствии с таблицей

$$\text{Logik2}(a_1, b_1, a_2, b_2) := \text{EQ}(\text{EQ}(a_1, b_1), \text{EQ}(a_2, b_2))$$

Выбор варианта состояния ключа от 1 до 8 в соответствии с таблицей

$$\text{Logik3}(a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3) := \text{AND}[\text{EQ}(a_1, b_1), (\text{AND}(\text{EQ}(a_2, b_2), \text{EQ}(a_3, b_3)))]$$

Модель транзисторно-диодного ключа

$$\begin{aligned} \text{KL}(\lambda_1, \lambda_2, \phi_D, \phi_T, i) := & \text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 0, \lambda_2, 0, \text{Znak}(i), 1) = 1 \\ & \begin{cases} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{(1)} \\ q_6 \leftarrow 1 \end{cases} \\ & \text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 0, \lambda_2, 0, \text{Znak}(i), 0) = 1 \\ & \begin{cases} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{(2)} \\ q_6 \leftarrow 2 \end{cases} \\ & \text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 1, \lambda_2, 0, \text{Znak}(i), 1) = 1 \\ & \begin{cases} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{(3)} \\ q_6 \leftarrow 3 \end{cases} \\ & \text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 1, \lambda_2, 0, \text{Znak}(i), 0) = 1 \\ & \begin{cases} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{(4)} \\ q_6 \leftarrow 4 \end{cases} \\ & \text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 0, \lambda_2, 1, \text{Znak}(i), 1) = 1 \\ & \begin{cases} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{(5)} \\ q_6 \leftarrow 5 \end{cases} \\ & \text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 0, \lambda_2, 1, \text{Znak}(i), 0) = 1 \\ & \begin{cases} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{(6)} \\ q_6 \leftarrow 6 \end{cases} \\ & \text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 1, \lambda_2, 1, \text{Znak}(i), 1) = 1 \\ & \begin{cases} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{(7)} \\ q_6 \leftarrow 7 \end{cases} \\ & \text{if } \text{Logik3}(\lambda_1, 1, \lambda_2, 1, \text{Znak}(i), 0) = 1 \\ & \begin{cases} q \leftarrow \text{FKLM}(\phi_D, \phi_T, i)^{(8)} \\ q_6 \leftarrow 8 \end{cases} \\ & q \end{aligned}$$

Формирователь указания на включенность диода или транзистора

$$\begin{aligned} \text{VDVT}(k, vD, vT) := & \text{if } k = 1 \\ & \begin{cases} z_1 \leftarrow 0 \\ z_2 \leftarrow -vD \end{cases} \\ & \text{if } k = 2 \\ & \begin{cases} z_1 \leftarrow vD \\ z_2 \leftarrow 0 \end{cases} \\ & \text{if } k = 3 \\ & \begin{cases} z_1 \leftarrow vT \\ z_2 \leftarrow 0 \end{cases} \\ & \text{if } k = 4 \\ & \begin{cases} z_1 \leftarrow vD \\ z_2 \leftarrow 0 \end{cases} \\ & \text{if } k = 5 \\ & \begin{cases} z_1 \leftarrow 0 \\ z_2 \leftarrow -vD \end{cases} \\ & \text{if } k = 6 \\ & \begin{cases} z_1 \leftarrow 0 \\ z_2 \leftarrow -vT \end{cases} \\ & \text{if } k = 7 \\ & \begin{cases} z_1 \leftarrow vT \\ z_2 \leftarrow -vT \end{cases} \\ & \text{if } k = 8 \\ & \begin{cases} z_1 \leftarrow vT \\ z_2 \leftarrow -vT \end{cases} \\ & z \end{aligned}$$

Формирователь потенциала на выходе ключа

$$\text{FiTK}(\text{KL}, i) := \text{KL}_5 - \text{KL}_4 - \text{KL}_2 - (\text{KL}_1 \cdot i) - (\text{KL}_3 \cdot i)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Рабочие листы MathCAD.

Библиотека. Модель широтно-импульсного модулятора

ORIGIN ≡ 1

СЭП. ШИП. ШИМ.

Компаратор

$FKompar(x1, x2) := \text{if}(x1 \geq x2, 1, -1)$

Треугольное напряжение

$FTriAngul(Atri, x) := Atri \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \text{asin}(\sin(x))$

Широтно-импульсный преобразователь (ШИП) для ДПТ

$Fship(\gamma, Atri, FiTri) := FKompar(\gamma, FTriAngul(Atri, FiTri))$

Широтно-импульсный модулятор (ШИМ) для цепей переменного тока

$Fshim(Asin, FiSin, Atri, FiTri) := FKompar(Asin \cdot \sin(FiSin), FTriAngul(Atri, FiTri))$

Универсальный идеализированный m-фазный источник напряжения для цепей переменного тока

$FUpit(t, m, Um, \beta, \delta, f_0, n, KU) := \begin{cases} \text{for } k \in 1..m \\ \left| \begin{array}{l} U_k \leftarrow Um_k \cdot \cos\left[2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t - \frac{\pi}{180} \cdot (\beta_k + \delta)\right] \text{ if } KU = 1 \\ U_k \leftarrow Um_k \cdot \text{sign}\left[\cos\left[2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t - \frac{\pi}{180} \cdot (\beta_k + \delta)\right]\right] \text{ if } KU = 2 \\ U_k \leftarrow Um_k \cdot \left[Fshim\left[1, 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t - \frac{\pi}{180} \cdot (\beta_k + \delta), 1, 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t \cdot n\right]\right] \text{ if } KU = 3 \end{array} \right. \\ U \end{cases}$

Транзисторный 2-фазный коммутатор из двух ключей

$FTK2(t, I, \lambda, \Phi_D, \Phi_T, vD, vT) := \begin{cases} KL1 \leftarrow KI(\lambda, 1 - \lambda, \Phi_D, \Phi_T, I) \\ KL2 \leftarrow KI(1 - \lambda, \lambda, \Phi_D, \Phi_T, I) \\ \phi_1 \leftarrow FITK(KL1, I) \\ \phi_2 \leftarrow FITK(KL2, I) \\ S_{1,1} \leftarrow VDV\left(KL1_6, vD, vT\right)_1 \\ S_{2,1} \leftarrow VDV\left(KL1_6, vD, vT\right)_2 \\ S_{1,2} \leftarrow VDV\left(KL2_6, vD, vT\right)_1 \\ S_{2,2} \leftarrow VDV\left(KL2_6, vD, vT\right)_2 \\ \left(\begin{array}{c} \phi \\ S \end{array} \right) \end{cases}$

Транзисторный m-фазный коммутатор

$FTKm(t, I, \lambda, \Phi_D, \Phi_T, vD, vT) := \begin{cases} m \leftarrow \text{rows}(I) \\ \text{for } k \in 1..m \\ \left| \begin{array}{l} KL \leftarrow KI(\lambda_{k,1}, \lambda_{k,2}, \Phi_D, \Phi_T, I_k) \\ \phi_k \leftarrow FITK(KL, I_k) \\ S_{1,k} \leftarrow VDV\left(KL_6, vD, vT\right)_1 \\ S_{2,k} \leftarrow VDV\left(KL_6, vD, vT\right)_2 \end{array} \right. \\ \left(\begin{array}{c} \phi \\ S \end{array} \right) \end{cases}$

Транзисторный 3-фазный коммутатор для схемы "звезда"

$$\text{FTK}_3(t, I, \lambda, \Phi_D, \Phi_T, vD, vT) := \begin{array}{l} \text{KL1} \leftarrow \text{KL}(\lambda_{1,1}, \lambda_{1,2}, \Phi_D, \Phi_T, I_1) \\ \text{KL2} \leftarrow \text{KL}(\lambda_{2,1}, \lambda_{2,2}, \Phi_D, \Phi_T, I_2) \\ \text{KL3} \leftarrow \text{KL}(\lambda_{3,1}, \lambda_{3,2}, \Phi_D, \Phi_T, I_3) \\ \phi_1 \leftarrow \text{FiTK}(\text{KL1}, I_1) \\ \phi_2 \leftarrow \text{FiTK}(\text{KL2}, I_2) \\ \phi_3 \leftarrow \text{FiTK}(\text{KL3}, I_3) \\ S_{1,1} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL1}_6, vD, vT)_1 \\ S_{2,1} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL1}_6, vD, vT)_2 \\ S_{1,2} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL2}_6, vD, vT)_1 \\ S_{2,2} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL2}_6, vD, vT)_2 \\ S_{1,3} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL3}_6, vD, vT)_1 \\ S_{2,3} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL3}_6, vD, vT)_2 \\ \left(\begin{array}{c} \phi \\ S \end{array} \right) \end{array}$$

Транзисторный 2-фазный коммутатор из двух ключей

$$\text{FTK}_2(t, I, \lambda, \Phi_D, \Phi_T, vD, vT, \text{indU}, \text{indR}) := \begin{array}{l} \text{KL1} \leftarrow \text{KL}(\lambda, 1 - \lambda, \Phi_D, \Phi_T, I) \\ \text{KL2} \leftarrow \text{KL}(1 - \lambda, \lambda, \Phi_D, \Phi_T, I) \\ \text{if } \text{indR} = 1 \\ \quad \begin{array}{l} \text{KL1}_1 \leftarrow 0 \\ \text{KL2}_1 \leftarrow 0 \\ \text{KL1}_3 \leftarrow 0 \\ \text{KL2}_3 \leftarrow 0 \end{array} \\ R_{1,1} \leftarrow \text{KL1}_1 \\ R_{1,2} \leftarrow \text{KL1}_3 \\ R_{2,1} \leftarrow \text{KL2}_1 \\ R_{2,2} \leftarrow \text{KL2}_3 \\ \text{if } \text{indU} = 1 \\ \quad \begin{array}{l} \text{KL1}_2 \leftarrow 0 \\ \text{KL2}_2 \leftarrow 0 \\ \text{KL1}_4 \leftarrow 0 \\ \text{KL2}_4 \leftarrow 0 \end{array} \\ \phi_1 \leftarrow \text{FiTK}(\text{KL1}, I) \\ \phi_2 \leftarrow \text{FiTK}(\text{KL2}, I) \\ S_{1,1} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL1}_6, vD, vT)_1 \\ S_{2,1} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL1}_6, vD, vT)_2 \\ S_{1,2} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL2}_6, vD, vT)_1 \\ S_{2,2} \leftarrow \text{VDVT}(\text{KL2}_6, vD, vT)_2 \end{array}$$

$$S_{1,3} \leftarrow R_{1,1} \cdot I^2$$

$$S_{2,3} \leftarrow R_{1,2} \cdot I^2$$

$$S_{1,4} \leftarrow R_{2,1} \cdot I^2$$

$$S_{2,4} \leftarrow R_{2,2} \cdot I^2$$

$$\begin{pmatrix} \phi \\ S \end{pmatrix}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Рабочие листы MathCAD.

Библиотека. Модель двигателя постоянного тока и механической нагрузки

СЭП. Двигатель постоянного тока. Нагрузка

Двигатель постоянного тока

Паспортные данные

Напряжение питания номинальное, В:	$U_{nom} := 29$	Сопротивление якорной обмотки, Ом:	$R_a := 81$
Ток якоря номинальный, А:	$I_{nom} := 0.075$	Индуктивность якорной обмотки, Гн:	$L_a := 0.045$
Угловая скорость номинальная, рад/с:	$\omega_{nom} := 942$	Момент инерции ротора, кг·м ² :	$J_r := 0.0037 \cdot 0.0001$
Вращающий момент номинальный, Н·м:	$M_{nom} := 0.0005$		

Расчётные параметры двигателя

Конструктивные постоянные двигателя:	$C_e := \frac{U_{nom} - R_a \cdot I_{nom}}{\omega_{nom}} = 0.024$	$C_M := \frac{M_{nom}}{I_{nom}} = 6.667 \times 10^{-3}$
Дифференциальное уравнение ДПТ без механической нагрузки:	$FDPT(U, i, \omega, C_e, R_a, L_a) := \frac{(U - R_a \cdot i) - C_e \cdot \omega}{L_a}$	

Механическая нагрузка

Дифференциальное уравнение	$F_{mech}(M, M_s, J_{\Sigma}) := \frac{M + M_s}{J_{\Sigma}}$	где: M - электромагнитный момент двигателя, M_s - статический момент нагрузки, J_{Σ} - момент инерции двигателя и нагрузки.
Момент инерции	$F_{mom}(J_r, J_{load}, k_{red}) := J_r + \frac{J_{load}}{k_{red}^2}$	где: J_r - момент инерции двигателя, J_{load} - момент инерции нагрузки, k_{red} - передаточное число редуктора.
Момент статический	$FM_s(M_{s0}, k_{vt}, k_{st}, \omega_r) := M_{s0} + k_{vt} \cdot \omega_r + k_{st} \cdot \text{if}(\omega_r \geq 0, -1, 1)$	где: M_{s0} - момент статический постоянный, k_{vt} - коэффициент вязкого трения, k_{st} - коэффициент сухого трения, k_{vt} - угловая скорость вала двигателя.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Рабочие листы MathCAD.

Модель системы «Широтно-импульсный преобразователь – двигатель постоянного тока»

ORIGIN = 1

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

"Двигатель постоянного тока – широтно-импульсный преобразователь."

СЭП: трансформаторно-диодный блок:

➤ Reference: D:\0-Dokument\0-Дипломирование-Еронов\0-СФУ\Бакалавры\2022\Дипломники\Войченко-КИ18-07Б-СЭП\Программы\СЭП-Библиотека-ТДК.xmcd(R)

СЭП: трансформаторный коммутатор:

➤ Reference: D:\0-Dokument\0-Дипломирование-Еронов\0-СФУ\Бакалавры\2022\Дипломники\Войченко-КИ18-07Б-СЭП\Программы\СЭП-Библиотека-ШИМ.xmcd(R)

СЭП: численное интегрирование:

➤ Reference: D:\0-Dokument\0-Дипломирование-Еронов\0-СФУ\Бакалавры\2022\Дипломники\Войченко-КИ18-07Б-СЭП\Программы\СЭП-Библиотека-RKF45.xmcd(R)

СЭП: двигатель постоянного тока и механическая нагрузка:

➤ Reference: D:\0-Dokument\0-Дипломирование-Еронов\0-СФУ\Бакалавры\2022\Дипломники\Войченко-КИ18-07Б-СЭП\Программы\СЭП-Библиотека-ДПТ.xmcd(R)

Параметры моделей

Параметры механической нагрузки

Коэффициент вязкого трения, Н.м.с/рад:	$k_{vt} := -0.0000002$	Момент инерции нагрузки, кг.м ² :	$J_{load} := 0.0037 \cdot 0.0001 \cdot 1$
Коэффициент сухого трения, Н.м:	$k_{st} := 0$	Передающее число редуктора:	$k_{red} := 1$
Момент статический, Н.м:	$M_{s0} := -1 \cdot 0 \cdot M_{nom}$	Приведённый момент инерции:	$J_{\Sigma} := Fmomint(J_r, J_{load}, k_{red})$

Параметры источника питания

Потенциал источника питания, В:	$\phi_T := 12$	Уровень указания на открытый транзистор:	$vT := 1$
Частота импульсов ШИП, Гц:	$f_0 := 1000$	Уровень указания на открытый диод:	$vD := 1$
Функция изменения напряжения:	$FUpit(t) := 0.5$		

Выбор формирователи напряжения питания и упрощения модели транзисторно-диодного ключа

Формирователи напряжения питания:

- KU=1 - постоянное;
- KU=2 - идеальный ПИИП без учёта наличия диодов;
- KU=3 - идеальный ПИИП с учётом наличия диодов;
- KU=4 - ПИИП с учётом внутренних сопротивлений диодов и транзисторов

Вариант 1: KU1 := 4 indU1 := 0 indR1 := 0

```

D1(t,x) :=
  L ← Fship(FUpit(t),1,f0·t)
  λ ← if(L ≥ 0,1,0)
  KL1 ← KL(λ,1 - λ,φT,φT,x1)
  KL2 ← KL(1 - λ,λ,φT,φT,x1)
  if KU1 = 1
    φ1 ← 0.5·FUpit(t)·φT
    φ2 ← -0.5·FUpit(t)·φT
  if KU1 = 2
    φ1 ← λ·φT
    φ2 ← (1 - λ)·φT
  if KU1 = 3
    φ1 ← KL1
    φ2 ← KL2
  (φ) ← FTK_2(t,x1,λ,φT,φT,vD,vT,indU1,indR1) if KU1 = 4
  u ← φ1 - φ2
  z1 ← FDPT(u,x1,x2,Ce,Re,La)
  z2 ← Fmech(CM,x1,FM_s(Ms0,kvt,kst,x2),JΣ)
  z3 ← φ1
  z4 ← φ2
  z5 ← S1,1
  z6 ← S2,1
  r ← s

```

Формирователи напряжения питания:

- indU=1 - постоянные падения напряжения транзистора и диода =0;
- indR=1 - внутренние сопротивления транзистора и диода =0;

Вариант 2: KU2 := 4 indU2 := 1 indR2 := 1

```

D2(t,x) :=
  L ← Fship(FUpit(t),1,f0·t)
  λ ← if(L ≥ 0,1,0)
  KL1 ← KL(λ,1 - λ,φT,φT,x1)
  KL2 ← KL(1 - λ,λ,φT,φT,x1)
  if KU2 = 1
    φ1 ← 0.5·FUpit(t)·φT
    φ2 ← -0.5·FUpit(t)·φT
  if KU2 = 2
    φ1 ← λ·φT
    φ2 ← (1 - λ)·φT
  if KU2 = 3
    φ1 ← KL1
    φ2 ← KL2
  (φ) ← FTK_2(t,x1,λ,φT,φT,vD,vT,indU2,indR2) if KU2 = 4
  u ← φ1 - φ2
  z1 ← FDPT(u,x1,x2,Ce,Re,La)
  z2 ← Fmech(CM,x1,FM_s(Ms0,kvt,kst,x2),JΣ)
  z3 ← φ1
  z4 ← φ2
  z5 ← S1,1
  z6 ← S2,1
  r ← s

```

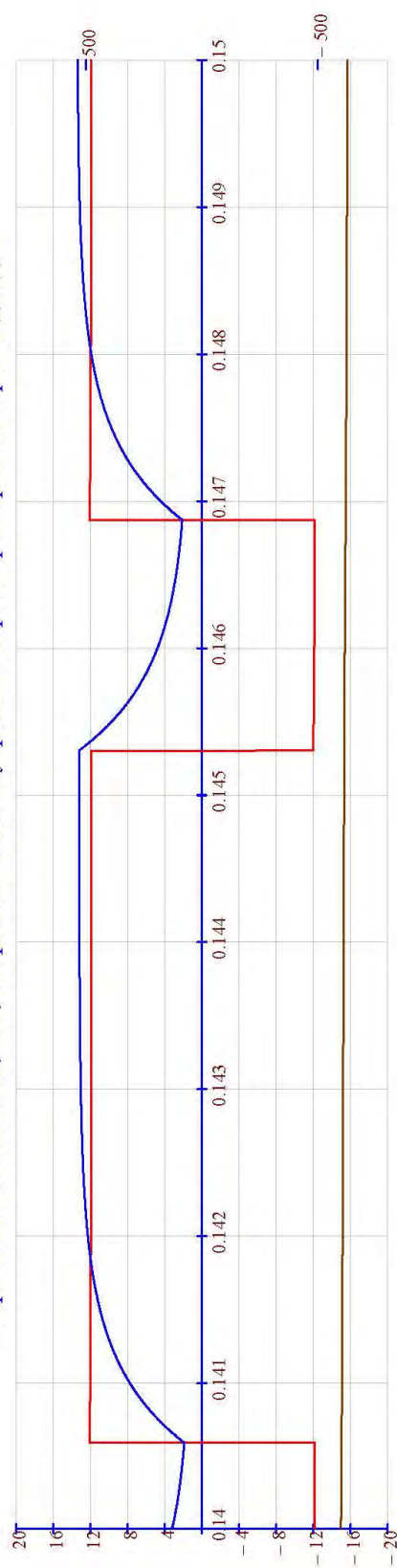
$\begin{aligned} z_7 &\leftarrow \omega_{1,2} \\ z_8 &\leftarrow S_{2,2} \\ z_9 &\leftarrow S_{1,3} \\ z_{10} &\leftarrow S_{2,3} \\ z_{11} &\leftarrow S_{1,4} \\ z_{12} &\leftarrow S_{2,4} \\ z \end{aligned}$	$\begin{aligned} z_7 &\leftarrow \omega_{1,2} \\ z_8 &\leftarrow S_{2,2} \\ z_9 &\leftarrow S_{1,3} \\ z_{10} &\leftarrow S_{2,3} \\ z_{11} &\leftarrow S_{1,4} \\ z_{12} &\leftarrow S_{2,4} \\ z \end{aligned}$
Начало интегрирования, с:	Начало интегрирования, с:
Окончание интегрирования, с:	Окончание интегрирования, с:
Число дифференциальных уравнений:	Число дифференциальных уравнений:
$t_{start} := 0$ $t_{stop} := 0.15$ $n_{sys} := 2$	$t_{start} := 0$ $t_{stop} := 0.15$ $n_{sys} := 2$
Численное интегрирование. Вариант 1:	Численное интегрирование. Вариант 1:
Вариант 2:	Вариант 2:
$Z1 := \text{RKf45fx}(x, t_{start}, t_{stop}, N_{point}, D1, t_{step}, n_{sys})$ $Z2 := \text{RKf45fx}(x, t_{start}, t_{stop}, N_{point}, D2, t_{step}, n_{sys})$	$Z1 := \text{RKf45fx}(x, t_{start}, t_{stop}, N_{point}, D1, t_{step}, n_{sys})$ $Z2 := \text{RKf45fx}(x, t_{start}, t_{stop}, N_{point}, D2, t_{step}, n_{sys})$
Счетчик выводимых точек:	Счетчик выводимых точек:
Время начала вывода, с:	Время начала вывода, с:
Время окончания вывода, с:	Время окончания вывода, с:
$t := Z1^{(1)}$ Ток, вариант 1, А: Скорость, вариант 1, рад/с: Напряжение, вариант 1, В:	$t := Z1^{(1)}$ Ток, вариант 2, А: Скорость, вариант 2, рад/с: Напряжение, вариант 2, В:
$\Delta I := I - I2$ $\Delta \omega := \omega1 - \omega2$	$\Delta I := I - I2$ $\Delta \omega := \omega1 - \omega2$

Моделирование

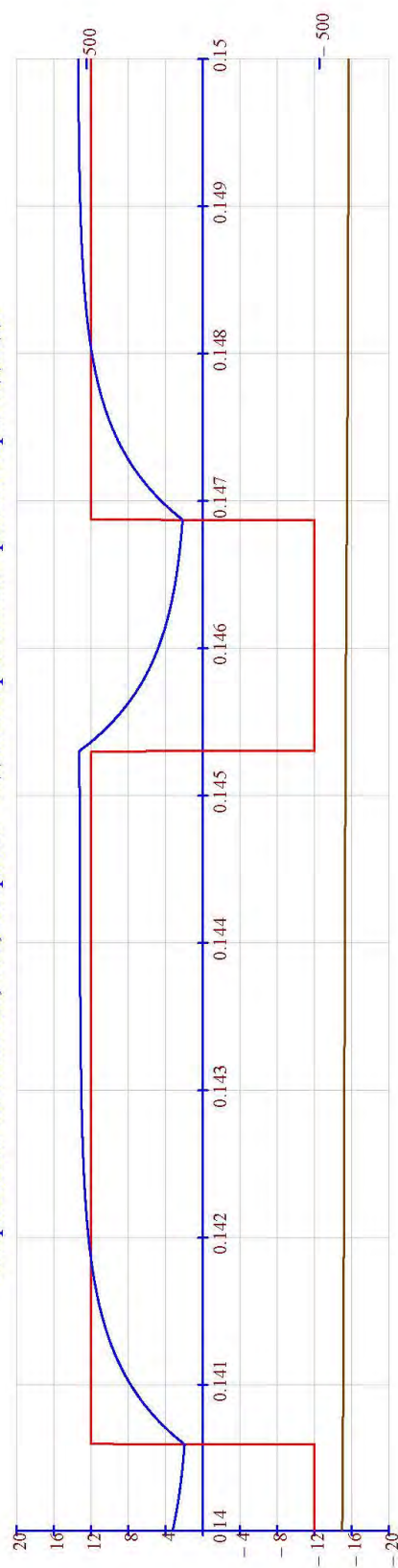
Вывод результатов

Потери в транзисторах и диодах ключей			
Потери в верхнем транзисторе, вариант 1, Вт:	$p_{1T1} := Z_1^{(10)}$	Потери в верхнем транзисторе, вариант 2, Вт:	$p_{2T1} := Z_2^{(10)}$
Потери в верхнем диоде, вариант 1, Вт:	$p_{1D1} := Z_1^{(11)}$	Потери в верхнем диоде, вариант 2, Вт:	$p_{2D1} := Z_2^{(11)}$
Потери в нижнем транзисторе, вариант 1, Вт:	$p_{1T2} := Z_1^{(12)}$	Потери в нижнем транзисторе, вариант 2, Вт:	$p_{2T2} := Z_2^{(12)}$
Потери в нижнем диоде, вариант 1, Вт:	$p_{1D2} := Z_1^{(13)}$	Потери в нижнем диоде, вариант 2, Вт:	$p_{2D2} := Z_2^{(13)}$
Состояние транзисторов и диодов ключей			
Состояние верхнего транзистора, вариант 1:	$VT_{11} := Z_1^{(6)}$	Состояние верхнего транзистора, вариант 2:	$VT_{21} := Z_2^{(6)}$
Состояние верхнего диода, вариант 1:	$VD_{11} := Z_1^{(7)}$	Состояние верхнего диода, вариант 2:	$VD_{21} := Z_2^{(7)}$
Состояние нижнего транзистора, вариант 1:	$VT_{12} := Z_1^{(8)}$	Состояние нижнего транзистора, вариант 2:	$VT_{22} := Z_2^{(8)}$
Состояние нижнего диода, вариант 1:	$VD_{12} := Z_1^{(9)}$	Состояние нижнего диода, вариант 2:	$VD_{22} := Z_2^{(9)}$

Напряжение на обмотке, ток, скорость - Учёт внутренних параметров транзисторов и диодов



Напряжение на обмотке, ток, скорость - Идеализированные транзисторы и диоды

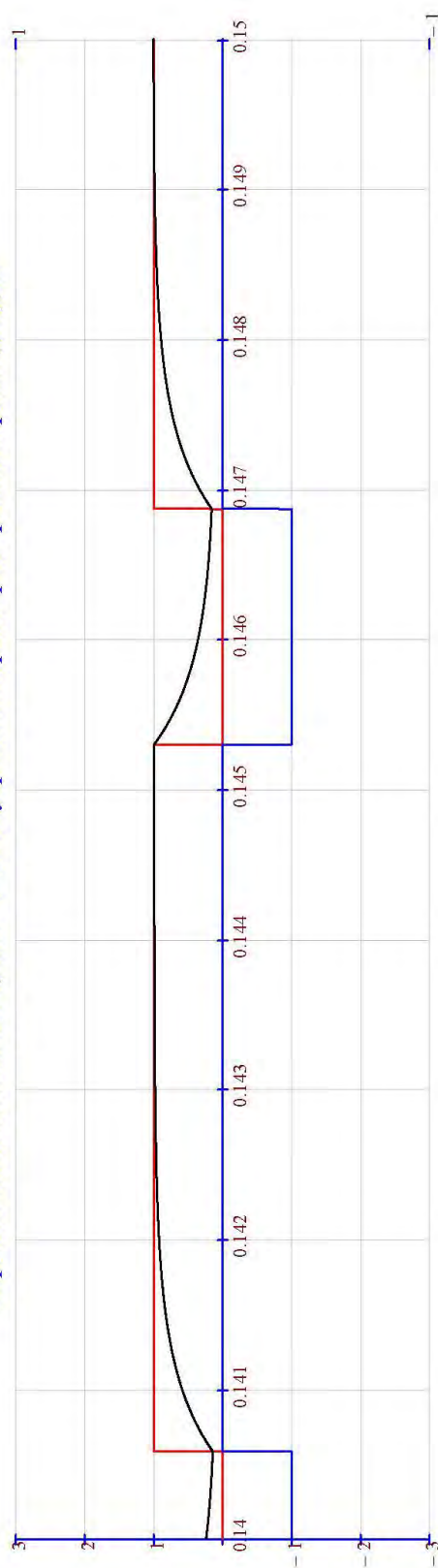


Переключение ключей ТК1 и ТК2, ток - Учёт внутренних параметров транзисторов и диодов



t, s

Переключение ключа ТК1, ток - Учёт внутренних параметров транзисторов и диодов



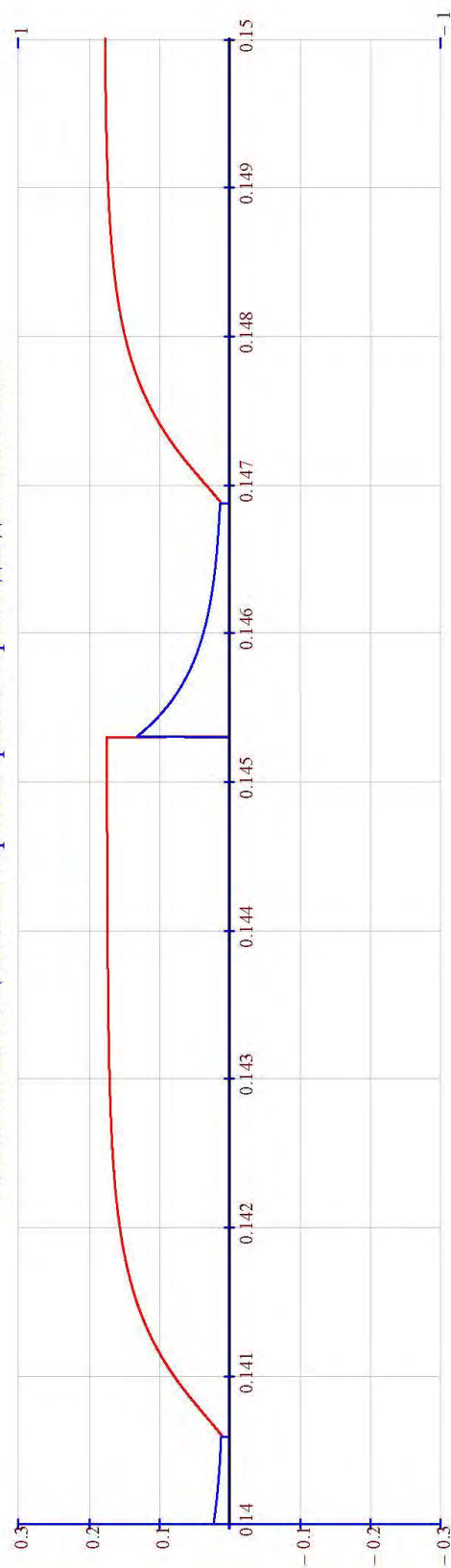
Переключение ключа ТК 1 - разность токов по вариантам 1 и 2



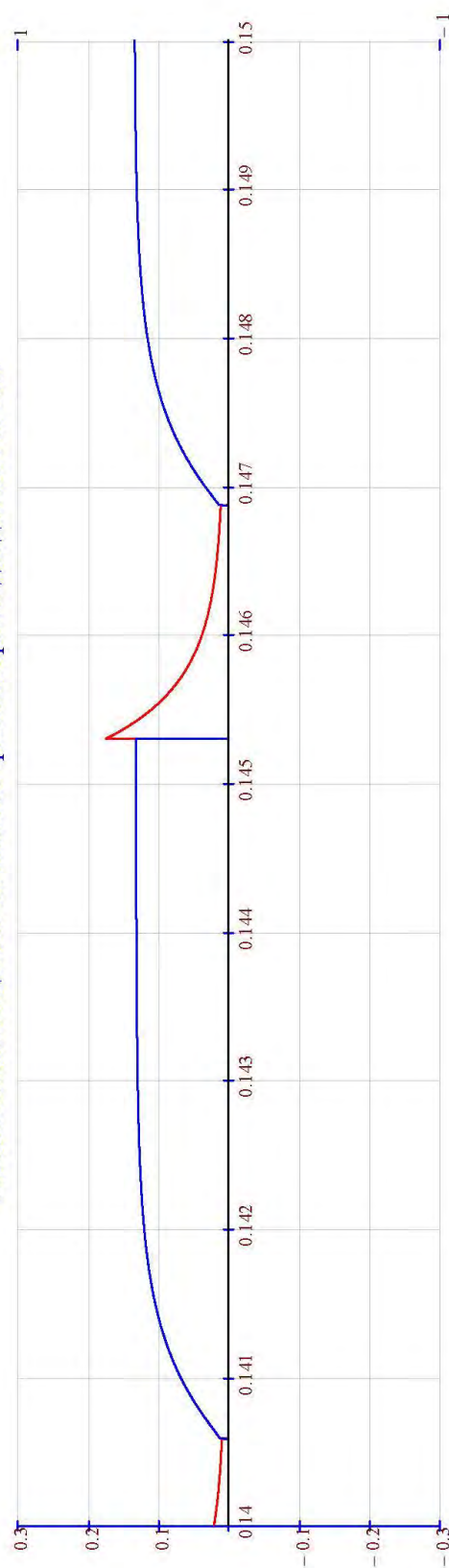
Переключение ключа ТК 1 - разность скоростей



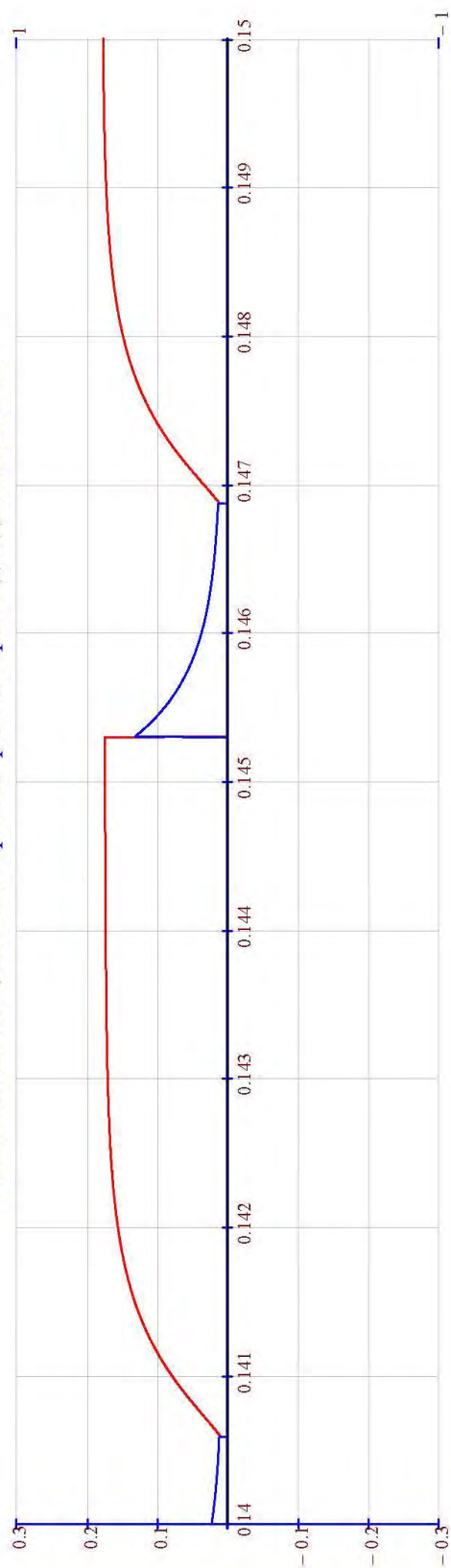
Рассеиваемая мощность на верхних транзисторах и диодах ключа ТК1



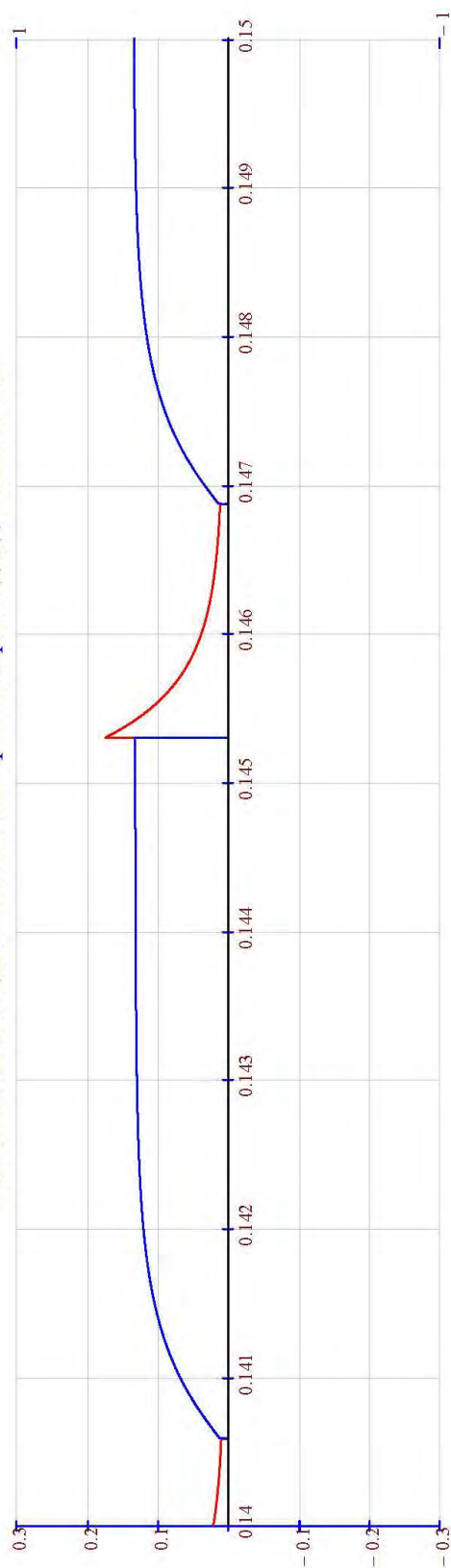
Рассеиваемая мощность на нижних транзисторах и диодах ключа ТК1



Рассеиваемая мощность на верхних транзисторах и диодах ключа ТК2



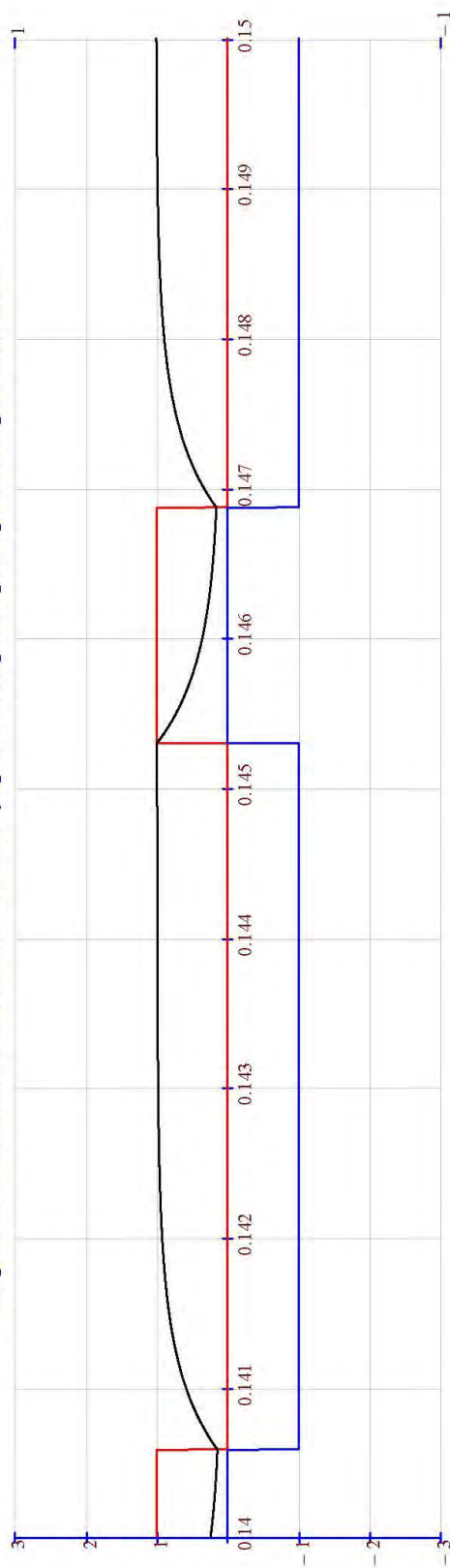
Рассеиваемая мощность на нижних транзисторах и диодах ключа ТК2



Переключение ключа ТК 1, ток - Идеализация параметров транзисторов и диодов



Переключение ключа ТК 2, ток - Учёт внутренних параметров транзисторов и диодов



ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Рабочие листы MathCAD.

Модель «Синусоидальная широтно-импульсная модуляция с m-фазной активно-индуктивной-нагрузкой»

ORIGIN = 1

1.1 Логическая функция РАВНО:

1.2 Логическая функция

1.3 Треугольный сигнал

1.4 Компаратор

1.5 Широтно-импульсный преобразователь (ШИП) напряжения постоянного тока:

1.6 Широтно-импульсный модулятор (ШИМ) напряжения переменного тока:

Моделирование системы электропитания для m-фазной RL-нагрузки

1 Библиотека процедур для ШИМ

Logik2(a₁, b₁, a₂, b₂) := EQ(EQ(a₁, b₁), EQ(a₂, b₂))

TriAngul(Atri, x) := Atri · $\frac{2}{\pi}$ · asin(sin(x))

Fship(gamma, Atri, FiTri) := FKompar(gamma, TriAngul(Atri, FiTri))

Fshim(Asin, FiSin, Atri, FiTri) := FKompar(Asin · sin(FiSin), TriAngul(Atri, FiTri))

2 Процедуры для оформления токов и напряжений при выводе на график в зависимости от заданного числа фаз

2.1 Токи для вывода на график

2.2 Напряжения для вывода на график:

if m = 1

z₁ ← Z

z₂ ← Nul

z₃ ← Nul

if m = 2

z₁ ← Z

z₂ ← Z

z₃ ← Nul

if m = 3

z₁ ← Z

z₂ ← Z

z₃ ← Z

z

FI(Z, m, Nul) :=

if m = 1

z₁ ← Z

z₂ ← Nul

z₃ ← Nul

if m = 2

z₁ ← Z

z₂ ← Z

z₃ ← Nul

if m = 3

z₁ ← Z

z₂ ← Z

z₃ ← Z

z

FU(Z, m, Nul) :=

if m = 1

z₁ ← Z

z₂ ← Nul

z₃ ← Nul

if m = 2

z₁ ← Z

z₂ ← Z

z₃ ← Nul

if m = 3

z₁ ← Z

z₂ ← Z

z₃ ← Z

z

3 Типы источников питания переменного тока

3.1 Число фаз:

$$m := 3$$

3.2 Частота питающих напряжений:

$$f_u := 4$$

$$N_T := 24$$

3.4 Осциллограммы питающих напряжений:

$$\delta := 90$$

$k := 1 \dots m$

3.5 Нулевой массив для вывода на график пустых значений при m фазах:

$$Nul_k := 0$$

$$Atri := 1$$

3.6 Амплитуды питающих напряжений:

$$Um_k := 1 \quad Um = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

3.7 Фазовый сдвиг m -фазных напряжений питания:

$$\beta := \begin{cases} b_1 \leftarrow 0 & \text{if } m = 1 \\ \text{if } m = 2 \\ \quad \left| \begin{array}{l} b_1 \leftarrow 0 \\ b_2 \leftarrow 90 \end{array} \right| & \\ \text{for } k \in 1 \dots m & \text{if } m \geq 3 \\ \quad b_k \leftarrow \frac{360}{m} \cdot (k - 1) \end{cases}$$

$$\beta = \begin{pmatrix} 0 \\ 120 \\ 240 \end{pmatrix}$$

3.7 Связность:

$$\gamma := 0.9$$

3.8 Сигнал управления:

$$h := (2 \cdot \gamma - 1) = 0.8$$

3.9 Частота импульсов:

$$Nship := 1$$

$$g := 0.5 \quad \gamma_1 := \frac{g + 1}{2} = 0.75$$

Универсальный m -фазный источник напряжения для цепей переменного тока

$$FU_{pit}(t, m, Um, \beta, \delta, f_u, n, KU) := \begin{cases} \text{for } k \in 1 \dots m \\ \quad \text{if } KU = 1 \\ \quad \quad U_0 \leftarrow \text{TriAngul}(Atri, 2 \cdot \pi \cdot t \cdot Nship) \\ \quad \quad Imp \leftarrow \text{FKompar}(h, U_0) \\ \quad \quad U_k \leftarrow Um_k \cdot Fship(h, 1, 2 \cdot \pi \cdot t \cdot Nship) \\ \quad U_k \leftarrow Um_k \cdot \left[Fshim \left[h, 2 \cdot \pi \cdot f_u \cdot t - \frac{\pi}{180} \cdot (\beta_k + \delta), 1, 2 \cdot \pi \cdot f_u \cdot t \cdot n \right] \right] \text{ if } KU = 2 \end{cases}$$

4 Модель m-фазной активно-индуктивной нагрузки

$$r_k := 1 \quad r = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad L_k := 1 \quad L = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

4.1 Сопротивления обмоток трёх фаз, Ом:

4.2 Индуктивности обмоток трёх фаз, Гн:

4.3 Выбор питающего напряжения. Менять KU=1 (синус), 2 (импульсы), 3 (ШИМ) и наблюдать графики

KU := 2

4.4 Модель обмоток трёх фаз:

$$D(t, x) := \begin{cases} U \leftarrow \text{FUpit}(t, m, U_m, \beta, \delta, f_u, N_T, KU) \\ \text{for } k \in 1..m \\ y_k \leftarrow \frac{1}{L_k} \cdot (-r_k \cdot x_k + U_k) \\ y_{m+k} \leftarrow U_k \end{cases} y$$

5 Моделирование широтно-модулированного импульсного m-фазного питающего напряжения

5.1 Начало времени счёта, с:

$$t_{\text{start}} := 0$$

5.2 Окончание времени счёта, с:

$$t_{\text{stop}} := 16 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N_T}$$

5.3 Число дифференциальных уравнений в модели:

$$\text{neq} := m$$

5.4 Нулевые начальные значения переменных:

$$x_{\text{neq}} := 0$$

5.5 Число рассчитываемых точек:

$$n_{\text{point}} := 10000$$

5.6 Величина шага интегрирования, с:

$$t_{\text{step}} := \frac{t_{\text{stop}} - t_{\text{start}}}{n_{\text{point}}}$$

5.7 Численное интегрирование:

$$Z := \text{RK45fix}(x, t_{\text{start}}, t_{\text{stop}}, n_{\text{point}}, D, t_{\text{step}}, \text{neq})$$

$$t := Z^{(1)}$$

$$I := \text{FI}(Z, m, \text{Nul})$$

$$I_1 := I_1$$

$$I_2 := I_2$$

$$I_3 := I_3$$

$$U := \text{FU}(Z, m, \text{Nul})$$

$$U_1 := U_1$$

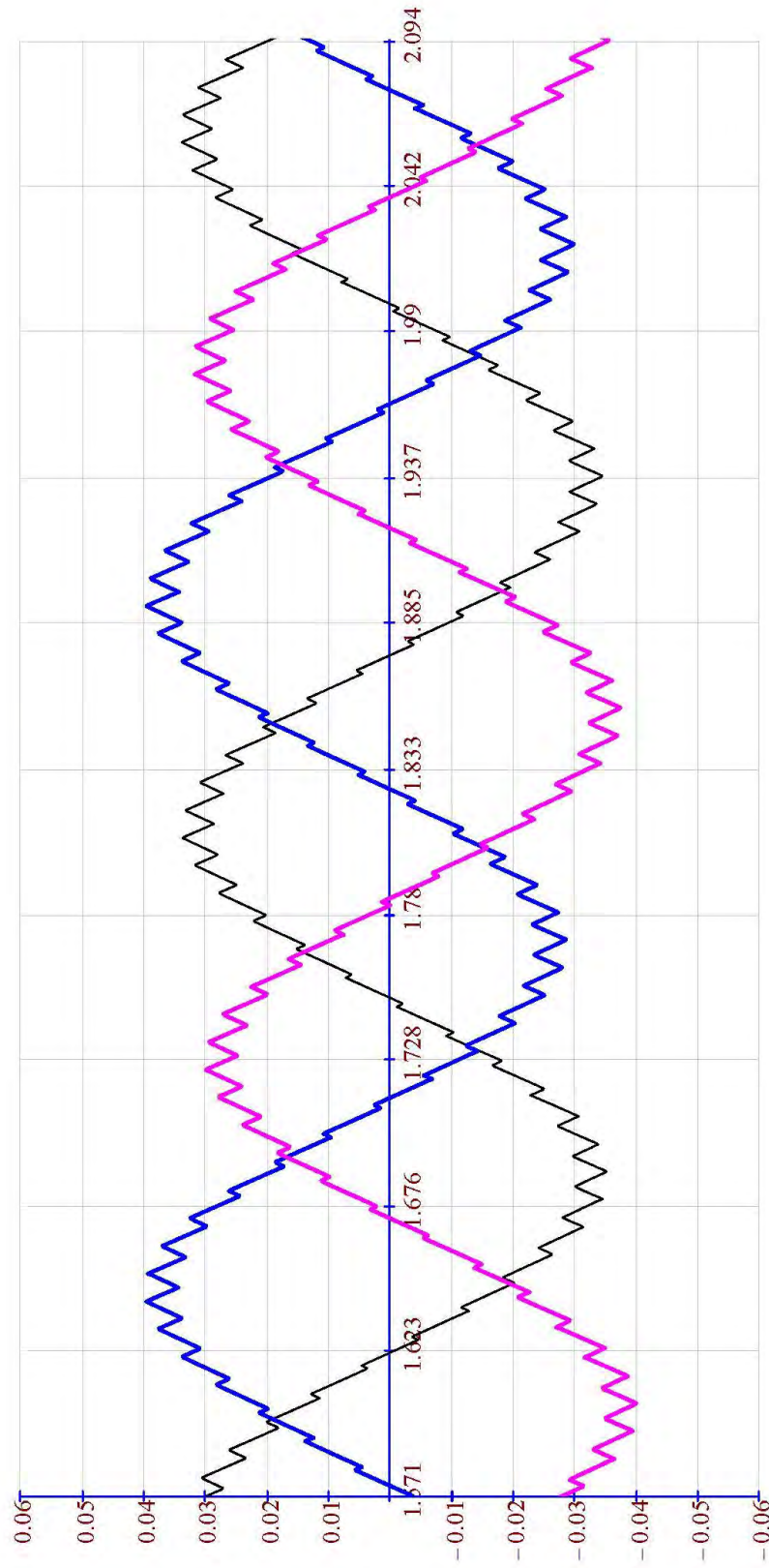
$$U_2 := U_2$$

$$U_3 := U_3$$

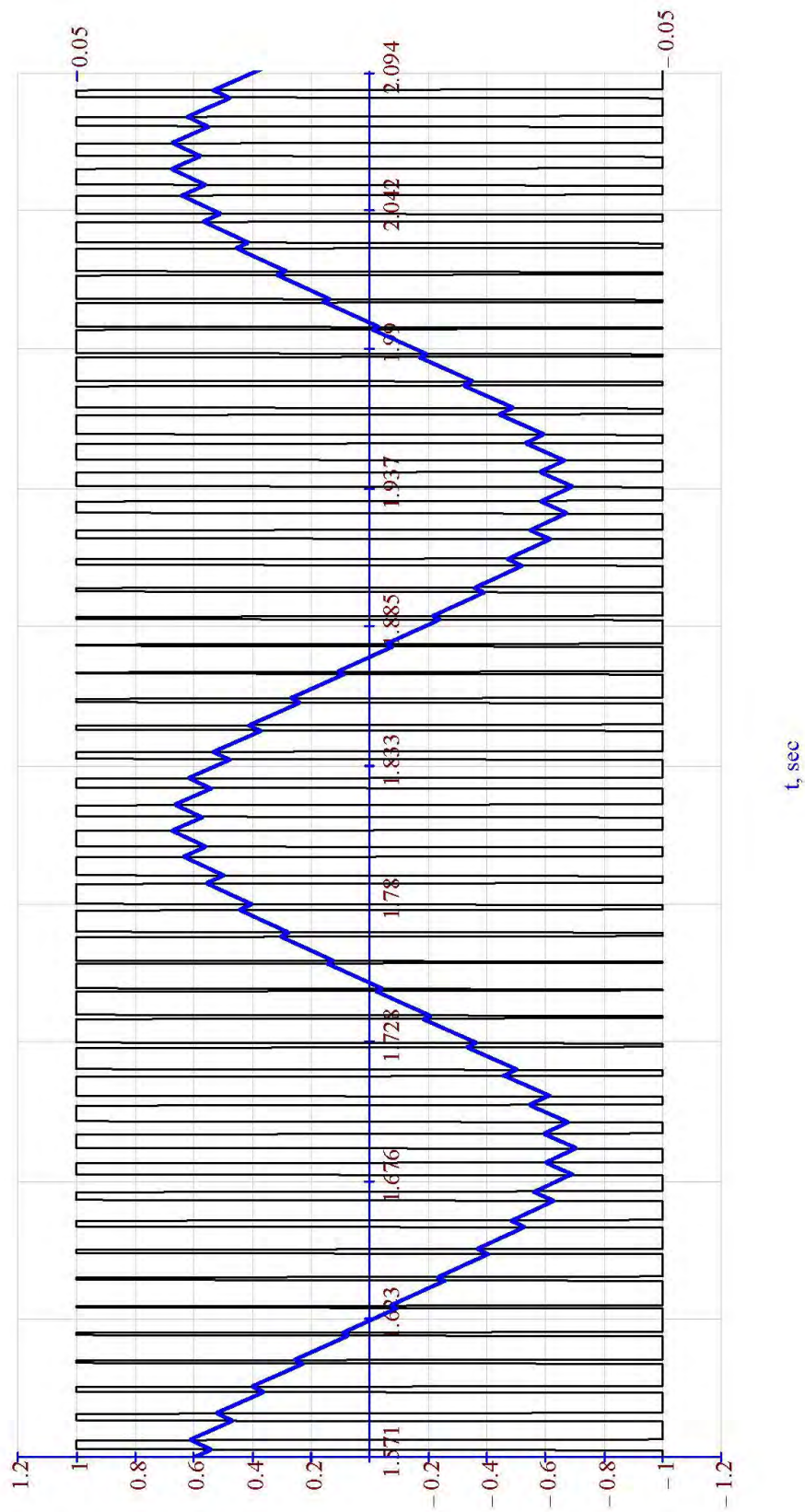
$k := 1 \dots n_{\text{point}}$

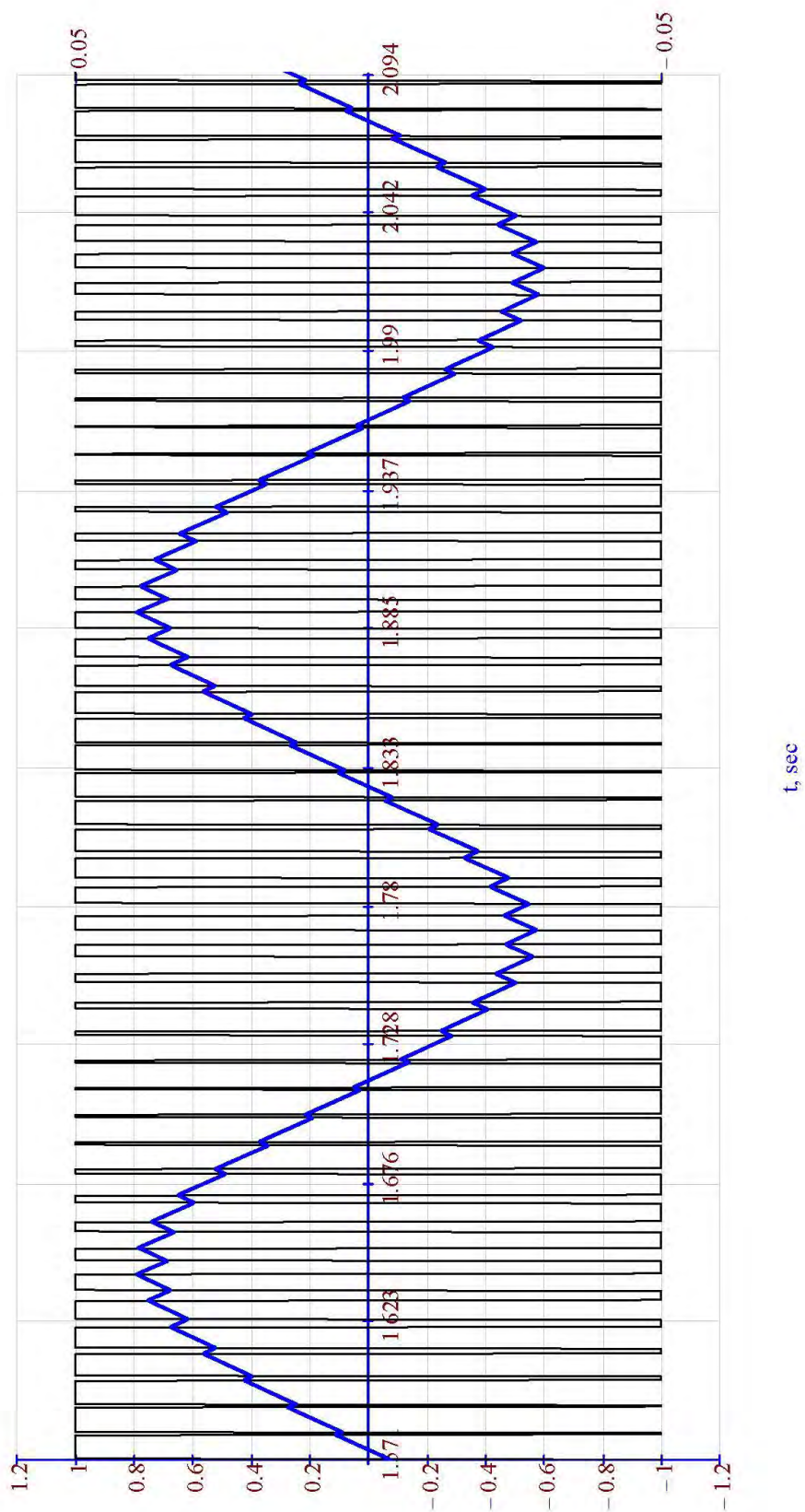
$$t_1 := 6 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N_T}$$

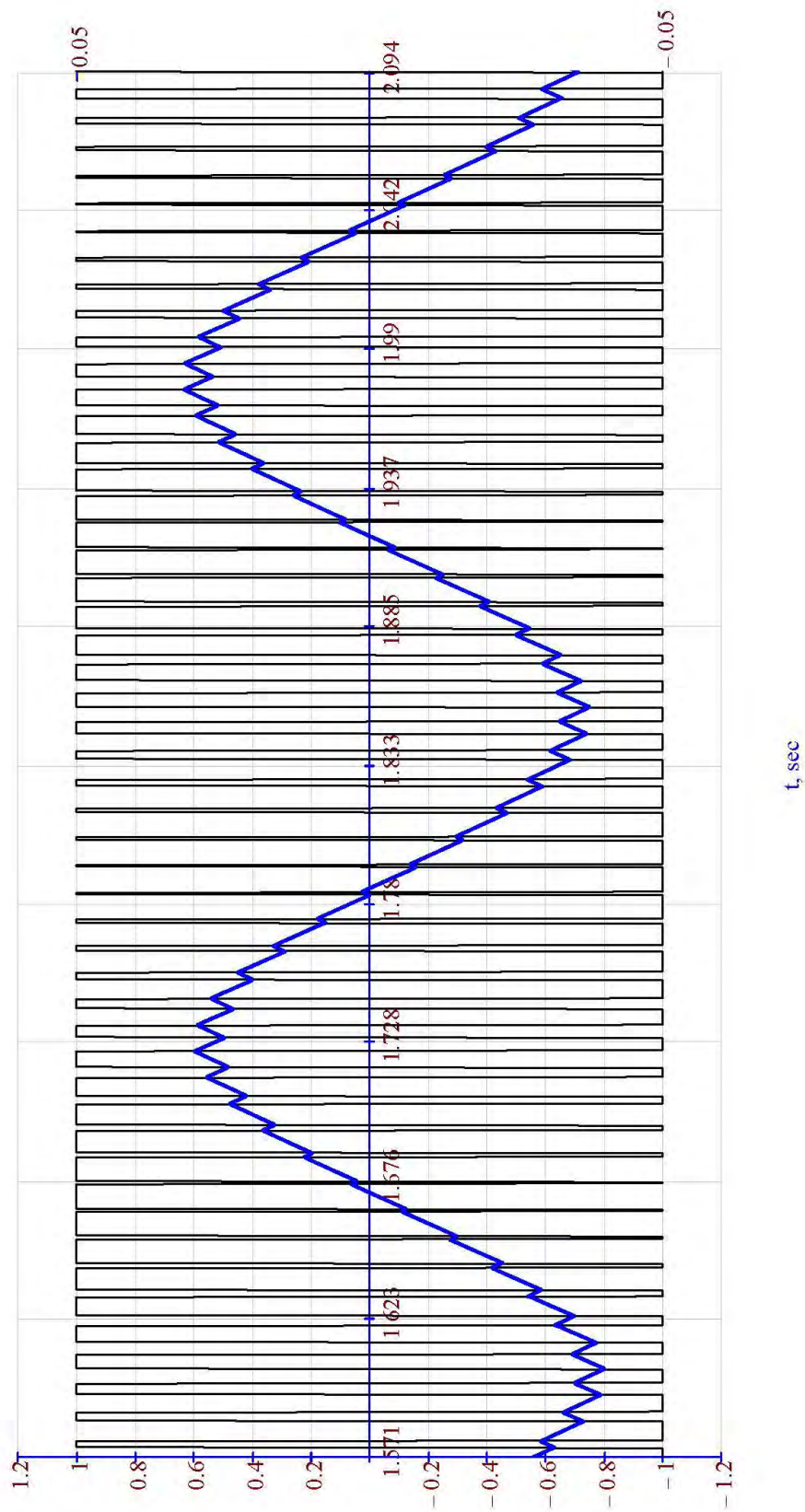
$$t_2 := 8 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N_T}$$



t, sec



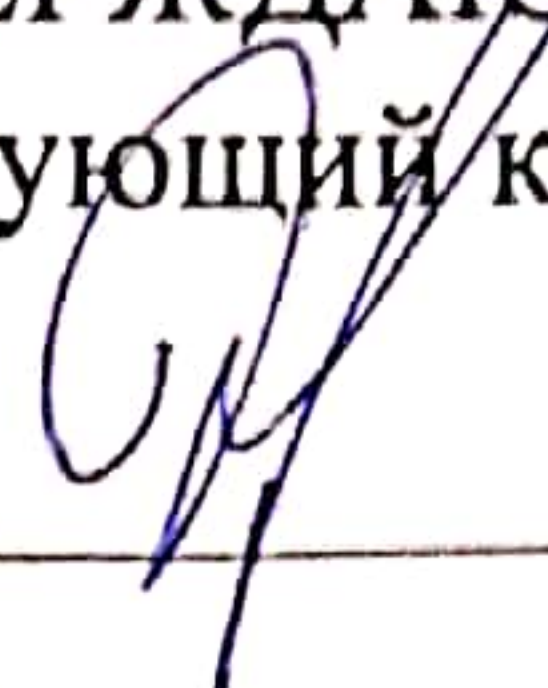




Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 О.В.Непомнящий

« 20 » 06 2022 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

**Комплекс программ для исследования
систем электропитания**

Руководитель


подпись

дата

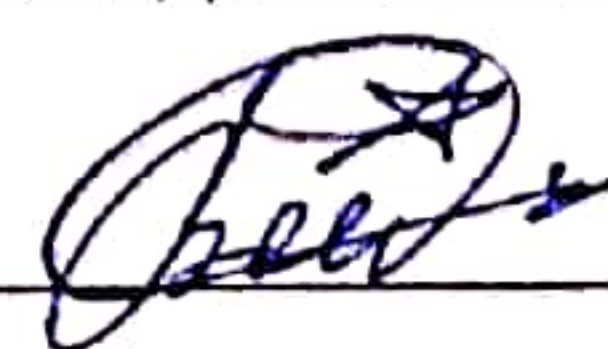
проф., д-р техн. наук С. А. Бронов
должность, ученая степень

Выпускник

КИ18-07Б

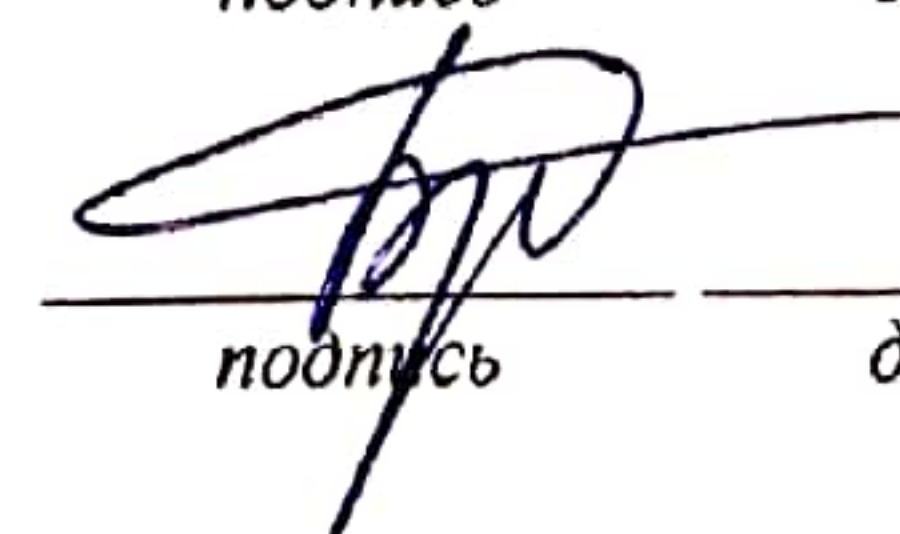
подпись

дата



В. В. Войченко

Нормоконтролер


подпись

дата

проф., д-р техн. наук С. А. Бронов
должность, ученая степень

Красноярск 2022