

На правах рукописи



ДОВУДОВ Сарфароз Умедович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ**

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Дунаев Михаил Павлович

Официальные оппоненты:

Аносов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, профессор;

Пахомов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент; федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра электротехники, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».

Защита состоится 15 мая 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.12, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, ул. Киренского, 26, корпус №14 ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «____»____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Автоматизированные электроприводы (АЭП) постоянного и переменного тока составляют важную часть современного промышленного оборудования производственных и транспортных систем.

При этом качество управления и энергетические показатели электроприводов существенно зависят от применяемых алгоритмов управления.

В настоящее время самым востребованным способом управления АЭП постоянного и переменного тока по праву можно считать способ управления с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ), который может обеспечить необходимые параметры управления угловой скоростью электродвигателей. Хорошо зарекомендовали себя в техническом плане такие виды ШИМ, как однократная модуляция, синусоидальная ШИМ, ШИМ с введением третьей гармоники и т.п.

Значительный вклад в развитие теории импульсных систем управления ЭП постоянного и переменного тока внесли научные труды Г.А. Белова, О.Г. Булатова, А.И. Царенко, Б.Ю. Васильева, Б.И. Фираго, К. Hasse, F. Blaschke, S.R. Bowes, D. Holliday, S. Grewal и иных исследователей.

Методические основы исследований в области управления электродвигателями заложены в работах А.Г. Иванова, А.С. Сандлера, Р.Т. Шрейнера, С.Г. Германа-Галкина, Ю.А. Сабинина, М.П. Костенко, I. Takahashi, T. Noguchi и других учёных.

Тем не менее, у способа управления с ШИМ можно отметить ряд недостатков, касающихся его энергоэффективности: значительные динамические потери мощности, обусловленные процессами включения и выключения полупроводниковых ключей управляемого силового преобразователя, и сравнительно низкий коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя с ШИМ-управлением.

Повышению энергетической эффективности силовых импульсных полупроводниковых преобразователей (ИПП) для систем автоматизированного электропривода промышленных производственных комплексов может способствовать применение частотно-импульсной модуляции (ЧИМ). Однако следует отметить, что этот способ управления в составе АЭП до сих пор полностью не изучен.

Данная работа посвящена повышению эффективности работы АЭП промышленных производственных комплексов на основе использования ЧИМ.

Целью исследования является применение частотно-импульсной модуляции питающего напряжения для повышения энергетической эффективности автоматизированных электроприводов с импульсными полупроводниковыми преобразователями.

Для реализации поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Проанализировать современные способы повышения энергетической эффективности автоматизированных электроприводов постоянного и переменного тока с импульсными полупроводниковыми преобразователями.
2. Разработать структурные модели автоматизированных электроприводов постоянного и переменного тока с частотно-импульсной модуляцией.
3. Создать методику расчета потерь мощности в силовых импульсных полупроводниковых преобразователях, учитывающей особенности вольтамперных характеристик, зависимости энергии включения, энергии выключения и энергии восстановления обратного диода от коммутированного тока.

4. Разработать компьютерные имитационные модели, подтверждающие реализацию поставленной цели повышения энергетической эффективности импульсных полупроводниковых преобразователей.

Объектом исследования являются автоматизированные электроприводы постоянного и переменного тока с импульсными полупроводниковыми преобразователями.

Предметом исследования являются энергетические характеристики автоматизированных электроприводов постоянного и переменного тока с импульсными полупроводниковыми преобразователями.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые разработаны структурные и имитационные модели АЭП с частотно-импульсным управлением, позволяющие моделировать динамические потери мощности в ИПП и нелинейность энергетических характеристик транзисторов и диодов.

2. Создана новая методика расчета потерь мощности в ИПП АЭП, отличающаяся от известных учетом динамических потерь мощности и нелинейности энергетических характеристик транзисторов и диодов.

3. Впервые на основании полиномиальной аппроксимации энергетических зависимостей силовых IGBT-модулей разработан алгоритм (модель) расчета статических и динамических потерь мощности в силовых полупроводниковых преобразователях, учитывающей особенности вольтамперных характеристик; зависимости энергии включения, энергии выключения и энергии восстановления обратного диода от коммутированного тока. Преимуществом предложенного алгоритма расчета потерь мощности заключается в возможном определении потерь мощности для любой топологии схем силовых преобразователей с учетом особенностей применяемого алгоритма управления, а также его универсальность.

Теоретическая значимость проведенных исследований состоит в развитии общей теории АЭП постоянного и переменного тока с ЧИМ питающего напряжения, заключающейся в разработке их структурных и имитационных моделей, позволяющих моделировать динамические потери мощности в ИПП и нелинейность энергетических характеристик транзисторов и диодов, а также в создании методики расчета потерь в силовых ИПП.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в том, что применение ЧИМ позволяет снизить динамические потери в ИПП и повысить коэффициент полезного действия ИПП, тем самым повышая энергетическую эффективность АЭП.

Соответствие паспорту специальности. Тематика работы соответствует пунктам направления исследования паспорта специальности 2.4.2: п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования»; п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления»; п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов».

Методы исследований. Исследования проводились с помощью методов теории автоматического регулирования, методов структурного и имитационного моделирования, специализированных программ для определения потерь мощности в силовых полупроводниковых приборах, а также методов экспериментальных исследований.

Степень достоверности результатов работы подтверждается результатами моделирования и экспериментальных исследований АЭП.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Разработанные структурные и имитационные модели АЭП постоянного и переменного тока с ЧИМ позволяют моделировать динамические потери мощности в ИПП и нелинейность вольтамперных характеристик транзисторов и диодов.

2. Созданная новая методика расчета потерь мощности в ИПП АЭП отличается от известных учетом динамических потерь мощности и нелинейности вольтамперных характеристик транзисторов и диодов.

3. На основании полиномиальной аппроксимации энергетических зависимостей силовых IGBT-транзисторов и диодов разработан алгоритм расчета статических и динамических потерь мощности в силовых полупроводниковых преобразователях, который учитывает особенности вольтамперных характеристик; зависимости энергии включения, энергии выключения и энергии восстановления обратного диода от коммутированного тока.

Реализация результатов работы подтверждена Актом об использовании результатов диссертационного исследования в ООО "ПО Нассочии Точик" (Республика Таджикистан); Актом об использовании результатов диссертационного исследования в учебном процессе ФГБОУ ВО ИРНИТУ.

Апробация результатов. Основные результаты работы, полученные автором диссертации в ходе исследования, докладывались и обсуждались на: 2nd International Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems "AICTS" (Irkutsk, 2021), International Scientific Conference "FarEastCon" (Vladivostok, 2020), IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering "RTUCON" (Riga, 2020), Ural Smart Energy Conference "USEC" (Ekaterinburg, 2020); Всероссийских научно-практических конференциях с международным участием "Повышение эффективности производства и использования энергоресурсов в условиях Сибири" (г. Иркутск, 2019-2023 гг.), Байкальских Всероссийских конференциях "Информационные и математические технологии в науке и управлении" (г. Иркутск, 2019-2020, 2023 гг.), научных семинарах кафедры Электропривода и электрического транспорта ИРНИТУ.

Личный вклад автора. Результаты исследований, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены лично автором. В совместных публикациях результатов исследований автору принадлежат: разработка структурных и имитационных моделей АЭП с ЧИМ; создание методики расчета потерь мощности в силовых ИПП; разработка алгоритма расчета энергетической эффективности ИПП.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы, из них 5 статей - в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 5 статей, индексированных в базе SCOPUS; 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. В работах с соавторами соискателю в среднем принадлежит 50 % результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, имеющего 142

наименования, и 5 приложений. Общий объём диссертационной работы составляет 188 страниц, включая 138 рисунков и 35 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, выделены объект и предмет исследования, приведены научные положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проанализировано современное состояние разработок в области АЭП постоянного и переменного тока и силовых ИПП, а также способов повышения их энергетической эффективности. Исследованы основные существующие в настоящее время алгоритмы модуляции в ИПП АЭП переменного тока и определены причины потерь мощности в ИПП при различных способах модуляции выходного напряжения. Дано сравнение их энергетических показателей в зависимости от известных способов ШИМ, а также спектрального состава выходного напряжения и тока преобразователей частоты с автономными инверторами напряжения (АИН).

В главе показано, что энергетическая эффективность АЭП как постоянного, так и переменного тока, определяется не только выбранной элементной базой IGBT-транзисторов, но и во многом зависит от выбранного алгоритма модуляции ключей ИПП, входящих в состав систем АЭП.

Во второй главе была разработана функциональная схема замкнутой системы ЭП постоянного тока с ЧИМ, схема которого приведена на рисунке 1, где обозначено: СЗЧ – сигнал задания частоты; ГСС – генератор синусоидальных сигналов; СЗДИ – сигнал задания длительности импульсов; К – компаратор; Р – регулятор; ИПП – импульсный полупроводниковый преобразователь; ДПТ – двигатель постоянного тока; ДОС – датчик обратной связи по угловой скорости; U_n – напряжение питания ИПП; M_n – момент нагрузки ДПТ; ω_z – сигнал задания; ω – угловая скорость ДПТ.

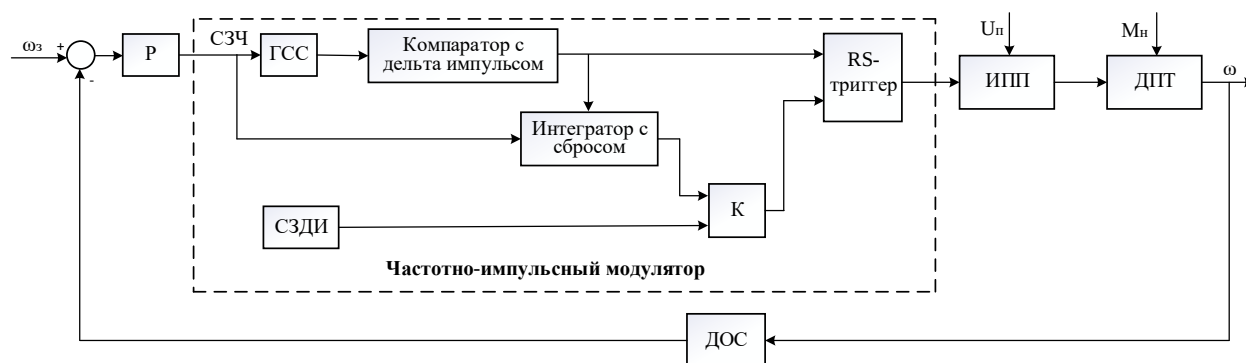


Рисунок 1 – Функциональная схема системы ЭП постоянного тока с ЧИМ

В соответствии с функциональной схемой ЧИМ (рисунок 1) была разработана модель ЧИМ, реализованная в среде Matlab/Simulink (рисунок 2). С помощью модели были получены диаграммы работы ЧИМ (рисунок 3, а). Для сравнения на рисунке 3,б приведены диаграммы работы ШИМ.

Диаграммы изменения скважности и частоты импульсов в ЧИМ при пуске электропривода показаны на рисунке 7. Как видно, частота импульсов при пуске электропривода начинается от 300 Гц и увеличивается по мере увеличения угловой скорости, достигая максимальной частоты 800 Гц при установившемся режиме работы.

В случае ШИМ частота коммутации при пуске постоянна и равняется максимальной частоте при установившемся режиме работы.

Разработанные модели показали, что использование в системе управления ЭП ЧИМ вместо ШИМ позволяет уменьшить динамические потери в полупроводниковом преобразователе. Уменьшение частоты коммутации приводит к уменьшению динамических потерь и, соответственно, к увеличению КПД ИПП.

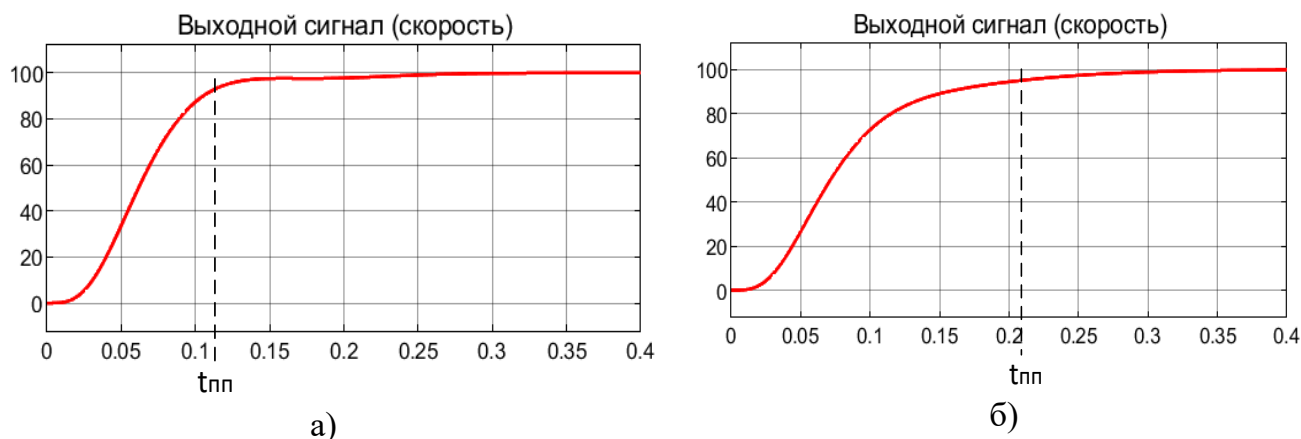


Рисунок 5 – Переходные процессы в замкнутой системе электропривода постоянного тока с ЧИМ (а) и ШИМ (б)

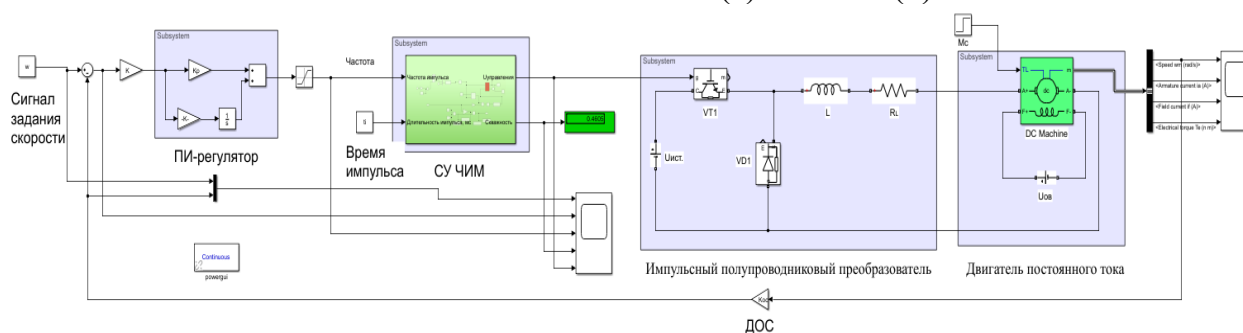


Рисунок 6 – Имитационная модель замкнутой системы ЭП с ЧИМ

Третья глава посвящена разработке математической и имитационной моделям синусоидальной ЧИМ, а также модели ЭП переменного тока с ЧИМ.

Модулируемый сигнал в ЧИМ является синусоидальным, и определяется уравнением (1):

$$y(t) = k_p \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{\sin} \cdot t), \quad (1)$$

где k_p – регулировочный коэффициент паузы; $f_{\sin}$ – частота модулируемого сигнала.

Максимальная длительность паузы в ЧИМ наблюдается на краях полупериода и её можно определить соотношением (2):

$$t_{\text{пауз. max}} = \frac{T_{\sin}}{u \cdot f_{\sin}}, \quad (2)$$

где $T_{\sin}$ – период ЧИМ-сигнала; u – регулировочный коэффициент по напряжению.

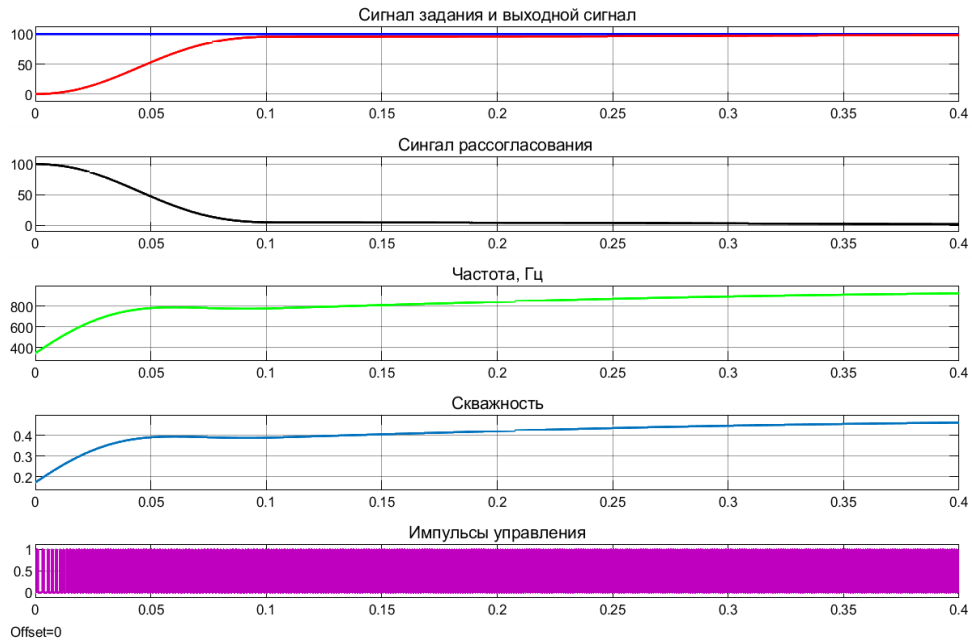


Рисунок 7 – Результаты имитационного моделирования
АЭП постоянного тока с ЧИМ

Число импульсов ЧИМ, приходящихся на четверть периода модулируемого сигнала, можно задать соотношением (3):

$$n = m + 1, \quad (3)$$

где $m = 0 \dots 9$.

Длительность пауз для каждого периода определяется выражением (4):

$$t_{\text{пауза}.i} = t_{\text{пауз.макс}} - k_p \cdot \sin\left(\frac{i \cdot n}{360} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot \pi}\right) \cdot t_{\text{пауз.макс}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{пауз.макс}}$ – максимальная длительность паузы в ЧИМ, i – номер периода в ЧИМ.

Длительность импульса для получения кратного периода определяется следующим выражением:

$$t_{\text{импульса}} = \frac{1}{4 \cdot f_{\text{син}}} - \frac{\sum_{i=0}^n t_{\text{пауза}.i}}{n}. \quad (5)$$

Длительность импульса в ЧИМ остается постоянной, а длительность паузы и периодов изменяется по синусоидальному закону (рисунок 8).

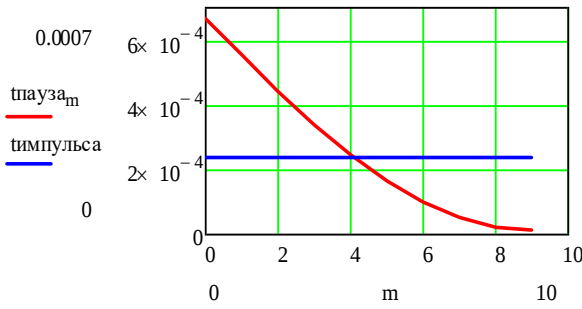
Длительности i -тых периодов можно рассчитать по выражению (6):

$$T_{\text{период}.i} = t_{\text{импульса}} + t_{\text{пауза}.i}. \quad (6)$$

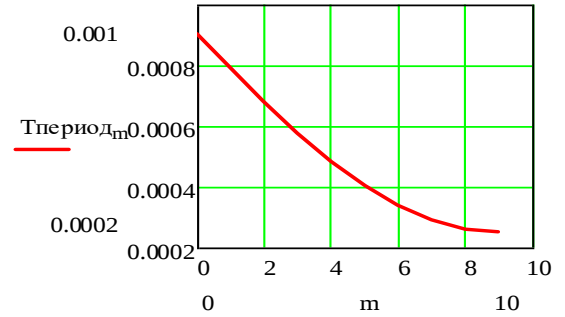
Расчетные точки для четверти периода определяются формулами (7, 8):

$$T_1 = \sum_{i=0}^m (T_{\text{период}.i}) + (t_{\text{импульса}}), \quad (7)$$

$$T_2 = \sum_{i=0}^m (T_{\text{период}.i}). \quad (8)$$



а)



б)

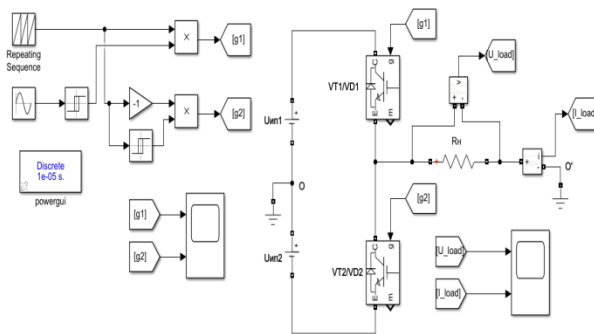
Рисунок 8 – Длительность импульса, паузы (а) и периода в ЧИМ (б)

Используя формулы (7) и (8), можно описать цикл для формирования импульсов в ЧИМ (9). На основе разработанной математической описания синусоидальной частотно-импульсной модуляции описан программный код для полного периода синусоидальной ЧИМ в Script/Matlab.

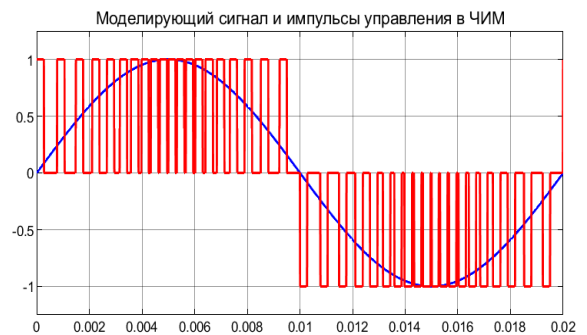
Выходные переменные t (время) и u (амплитуда) вводим в блок Repeating Sequence Matlab/Simulink для дальнейшей подачи полученных импульсов на IGBT-транзисторы однофазного АИН (рисунок 9, а).

$$U(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq \theta \leq t_{\text{импульса}} \\ 0 & \text{if } t_{\text{импульса}} \leq \theta \leq T2_0 \\ 1 & \text{if } T2_0 \leq \theta \leq T1_0 \\ 0 & \text{if } T1_0 \leq \theta \leq T2_1 \\ 1 & \text{if } T2_1 \leq \theta \leq T1_1 \\ 0 & \text{if } T1_1 \leq \theta \leq T2_2 \\ 1 & \text{if } T2_2 \leq \theta \leq T1_2 \\ 0 & \text{if } T1_2 \leq \theta \leq T2_3 \\ 1 & \text{if } T2_3 \leq \theta \leq T1_3 \\ 0 & \text{if } T1_3 \leq \theta \leq T2_4 \\ 1 & \text{if } T2_4 \leq \theta \leq T1_4 \\ 0 & \text{if } T1_4 \leq \theta \leq T2_5 \\ 1 & \text{if } T2_5 \leq \theta \leq T1_5 \\ 0 & \text{if } T1_5 \leq \theta \leq T2_6 \\ 1 & \text{if } T2_6 \leq \theta \leq T1_6 \\ 0 & \text{if } T1_6 \leq \theta \leq T2_7 \\ 1 & \text{if } T2_7 \leq \theta \leq T1_7 \\ 0 & \text{if } T1_7 \leq \theta \leq T2_8 \\ 1 & \text{if } T2_8 \leq \theta \leq T1_8 \\ 0 & \text{if } T1_8 \leq \theta \leq T2_9 \end{cases} \quad (9)$$

В полученной диаграмме ЧИМ (рисунок 9, б) частота по краям полупериода выходных импульсов управления в 2,2 раза меньше, чем в середине полупериода: по краям частота равна 1,76 кГц, а в середине – 3,957 кГц. Вследствие этого динамические потери в IGBT-модулях автономного инвертора напряжения с ЧИМ будут значительно ниже, чем в аналогичной схеме с ШИМ.



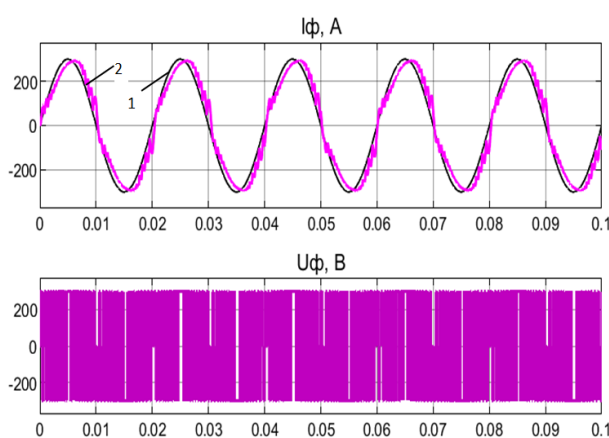
а)



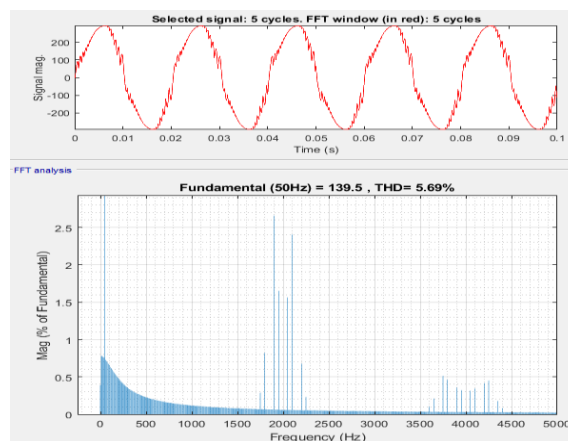
б)

Рисунок 9 – Модель однофазного двухуровневого АИН с ЧИМ (а) и результат математического моделирования импульсов управления ЧИМ при $k_p = 0,98$ и частоте модуляции $f = 50$ Гц (б)

Изменяя регулировочный коэффициент паузы k_p , можно регулировать среднее значение выходного напряжения АИН. Диаграммы выходного тока и напряжения при активно-индуктивной нагрузке, а также спектральный анализ по результатам моделирования АИН с ЧИМ приведены на рисунке 10.



а)



б)

Рисунок 10 – Результаты моделирования АИН с ЧИМ: (а) - диаграммы выходного тока и напряжения: идеальная (1) и реальная (2) форма выходного тока в АИН при ЧИМ; (б) - спектральный анализ выходного тока АИН при ЧИМ

Использование ЧИМ в АИН (как и ШИМ) также обеспечивает приближенную к синусоидальной форму тока. Гармонические искажения выходного тока при ЧИМ составляют 5,69%, что сопоставимо с ШИМ.

Разработанная имитационная модель системы управления с синусоидальной ЧИМ для трехфазного АИН показана на рисунке 11. Входными данными для формирования синусоидальной ЧИМ являются период повторяемости выходного напряжения и длительность импульса в ЧИМ. Длительность импульса в ЧИМ в ходе модуляции не меняется и является константой. Минимальная длительность нулевого состояния при ЧИМ принимается нулевой. Минимальное значение периода следования импульсов может быть равно длительности импульса. Максимальное значение периода следования импульсов задается произвольно.

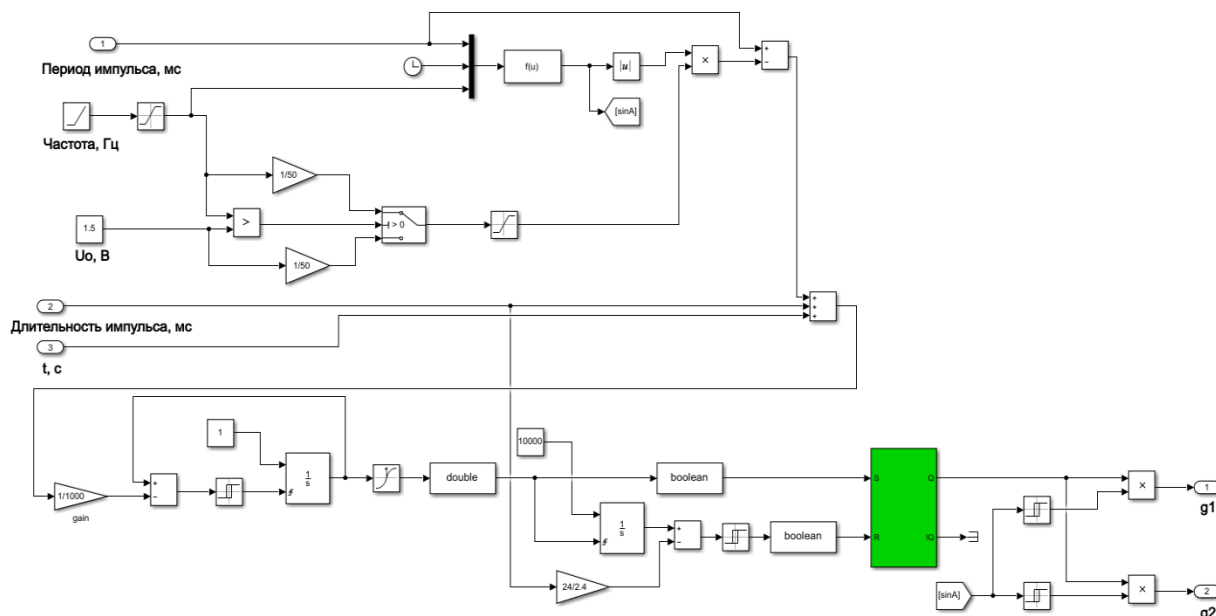


Рисунок 11 – Matlab-модель системы управления с синусоидальной ЧИМ

Синусоидальная ЧИМ задается аналого-цифровым образом. Формирование синусоидальной ЧИМ состоит из следующих этапов.

Первый этап. Этап формирования синуса с интервалом следования, равному максимальной длительности нуля в ЧИМ. После этого функция синуса берется по модулю, инвертируется и увеличивается на величину длительности импульса.

Второй этап. Этап формирования дельта-импульсов с единичной амплитудой и переменным значением периода между импульсами. Минимальный период следования импульсов в ЧИМ должен быть равен длительности импульса (длительности единицы), а максимальный период следования импульсов должен быть равен максимальному периоду в ЧИМ (сумма времени импульса и максимального времени нуля).

Третий этап. Этап формирования синусоидальной ЧИМ (рисунок 12). Синусоидальная ЧИМ формируется с помощью использования RS-триггера. Входными сигналами модуля являются дельта-сигнал и сигнал длительность импульса. Выходным сигналом является синусоидальная ЧИМ.

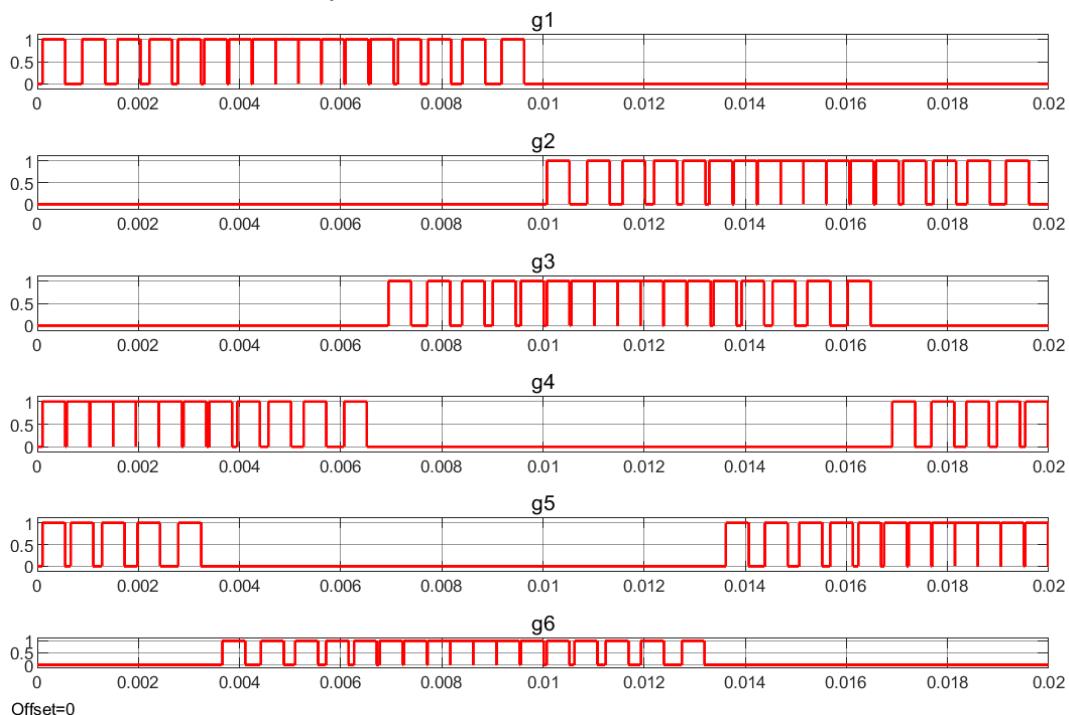


Рисунок 12 – Диаграммы импульсов управления ключами инвертора

Формы выходных фазных токов АИН при максимальной частоте 2 кГц и 8 кГц приведены на рисунке 13. Полученные выходные диаграммы АИН с ЧИМ показали, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения в 2,2 раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения. Снижение частоты коммутации приводит к снижению динамических потерь в транзисторах АИН с ЧИМ по сравнению с АИН с ШИМ на 20-40%, т.к. мощность динамических потерь прямо пропорциональна частоте коммутации.

На рисунке 14 показана модель ЭП переменного тока (типа 4A100L4У3) с ЧИМ при U/f-управлении, а на рисунке 15 приведены результаты моделирования. При U/f-управлении пуск ЭП производится на холостом ходу и завершается за 0,25 с. При этом максимальный пусковой ток ограничивается 30 А. После того, как угловая скорость ЭП достигает установившегося значения, происходит наброс нагрузки и скорость уменьшается на 3,2 %, оставаясь при этом стабильной.

Исследования, проведенные с помощью данной модели, показали динамическую устойчивость системы при пуске и набросе нагрузки, а также обеспечение

требуемого токоограничения в пусковом режиме.

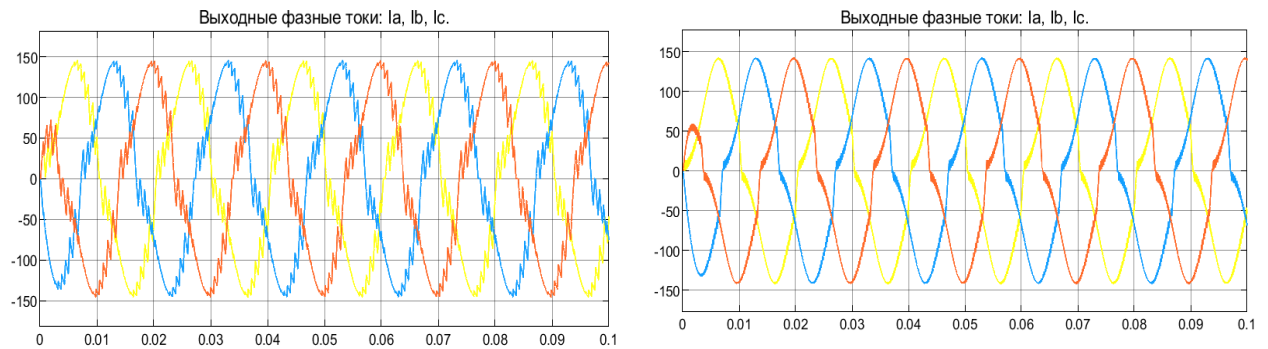


Рисунок 13 – Результат моделирования выходных токов АИН с ЧИМ

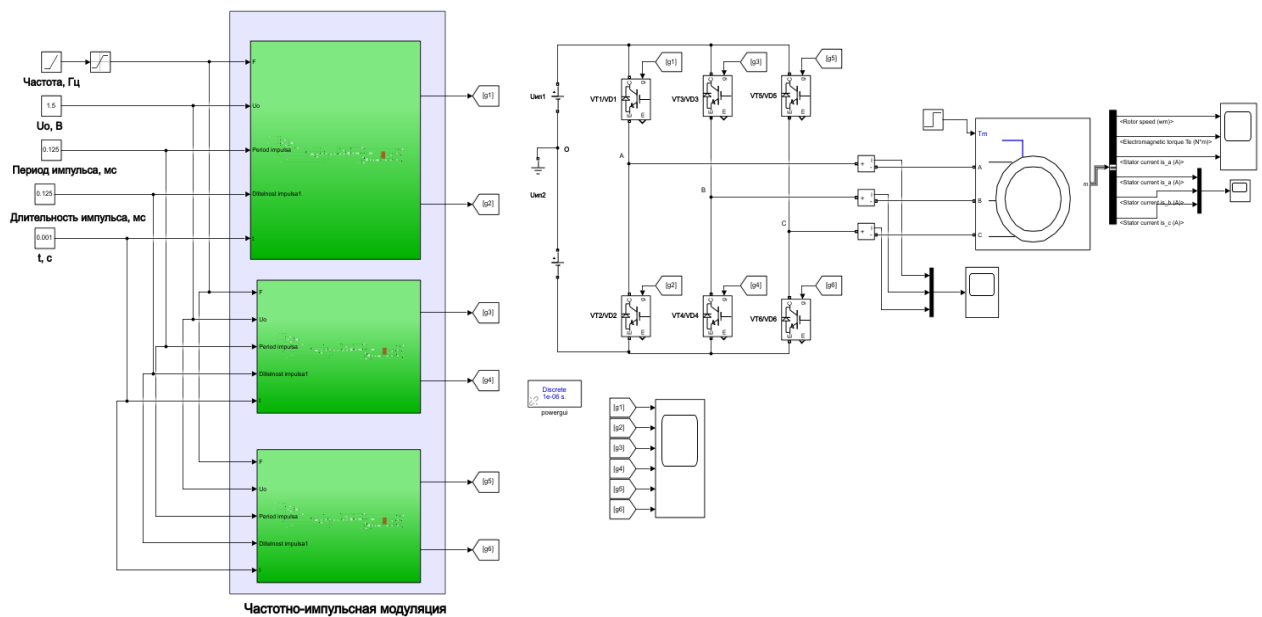


Рисунок 14 – Модель ЭП переменного тока с ЧИМ при U/f-управлении

Четвертая глава посвящена разработке методики расчета потерь мощности в полупроводниковых ключах с разными типами модуляции, а также разработке алгоритма расчета энергетической эффективности ИПП.

Программный пакет Matlab является одной из наиболее популярных программ для исследования ИПП, который позволяет моделировать любую топологию ИПП с любой системой управления. При этом недостатками данной программы являются отсутствие учета динамических потерь мощности в IGBT-транзисторах, а также представление вольтамперной характеристики IGBT-транзистора в виде линейной функции.

Разработана методика расчета потерь мощности в силовых полупроводниковых ключах путем полиномиальной аппроксимации базовых энергетических характеристик. Полиномиальная аппроксимация позволяет достаточно точно описать энергетические зависимости силовых транзисторов в заданном диапазоне.

В результате аппроксимации энергетических характеристик силового IGBT-транзистора производства компании Mitsubishi типа CM600DX-24T1 получены соответствующие уравнения (10) – (14):

$$U_{CE}(I_C [\text{kA}], 125^\circ\text{C}) = -37,01 \cdot I_C^6 + 137,54 \cdot I_C^5 - 196,31 \cdot I_C^4 + 135,55 \cdot I_C^3 - 46,899 \cdot I_C^2 + 9,4687 \cdot I_C + 0,367 \quad (10)$$

$$U_{EC}(I_E [\text{kA}], 125^\circ\text{C}) = -10,768 \cdot I_E^6 + 41,741 \cdot I_E^5 - 63,054 \cdot I_E^4 + 47,453 \cdot I_E^3 - 19,275 \cdot I_E^2 + 5,7015 \cdot I_E + 0,5024 \quad (11)$$

$$E_{ON}(I_C [\text{kA}], 125^\circ\text{C}) = -82,239 \cdot I_C^4 + 238,33 \cdot I_C^3 - 112,33 \cdot I_C^2 + 66,065 \cdot I_C + 1,78 \quad (12)$$

$$E_{OFF}(I_C [\text{kA}], 125^\circ\text{C}) = -90,379 \cdot I_C^4 + 224,27 \cdot I_C^3 - 180,35 \cdot I_C^2 + 128,11 \cdot I_C + 3,1464 \quad (13)$$

$$E_{RR}(I_F [\text{kA}], 125^\circ\text{C}) = 195,65 \cdot I_F^6 - 791,5 \cdot I_F^5 + 1194,2 \cdot I_F^4 - 774,55 \cdot I_F^3 + 127,98 \cdot I_F^2 + 73,032 \cdot I_F + 9,8231 \quad (14)$$

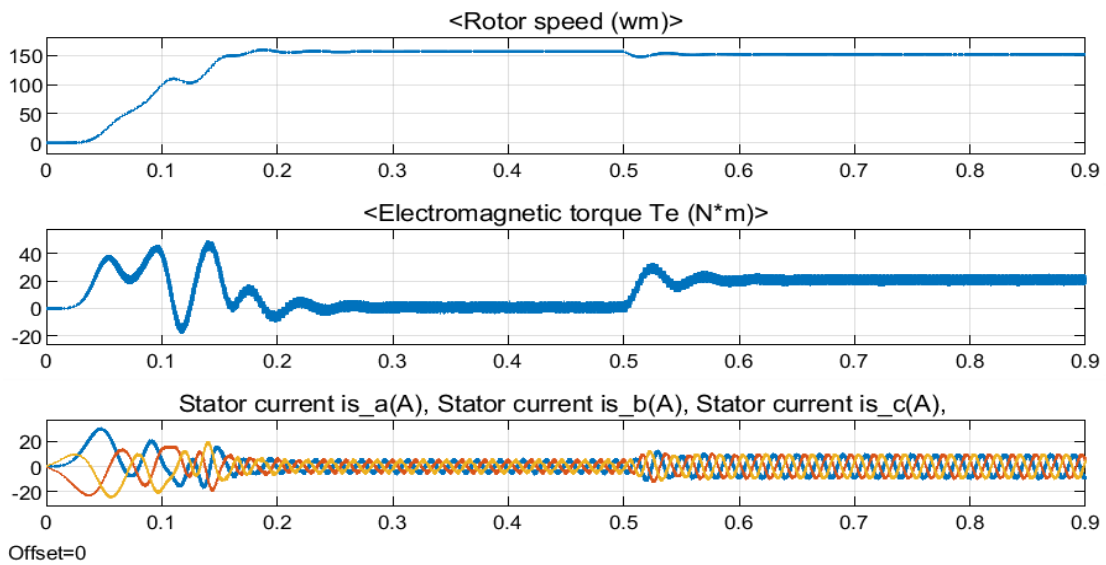
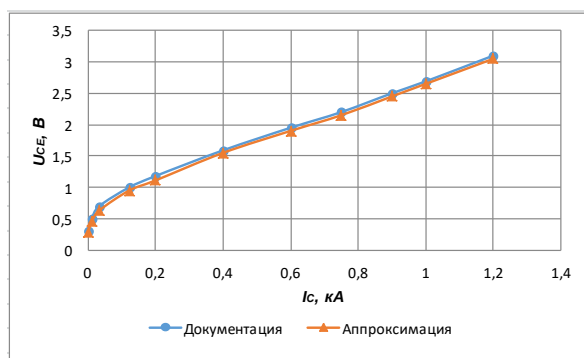


Рисунок 15 – Диаграммы ЭП переменного тока с ЧИМ при U/f-управлении при пуске на холостом ходу и дальнейшим набросом нагрузки

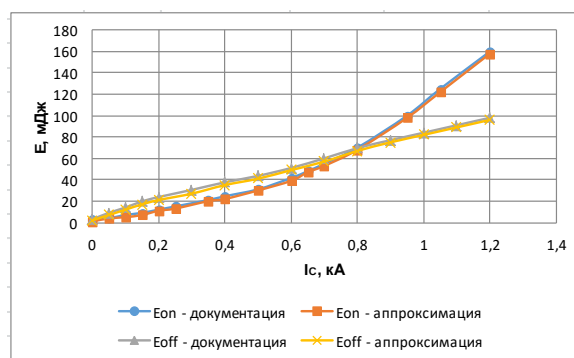
Как видно из рисунка 16, полученные математические зависимости достаточно точно описывают исходные зависимости, приведенные в документации.

Пример создания имитационной модели расчета потерь в IGBT-транзисторе типа CM600DX-24T1 приведен на рисунке 17. Зависимость $U_{CE}(I_C)$ вводится в блок "Fcp", что позволяет задать полученную аппроксимированную кривую. Результаты моделирования потерь мощности в IGBT-транзисторе приведены на рисунках 18 и 19. Таким образом, предложенная методика позволяет в среде Matlab/Simulink с высокой точностью рассчитать потери мощности в силовых полупроводниковых ключах для любого типа полупроводникового преобразователя с любым алгоритмом управления.

Проведена верификация методики расчета потерь мощности, выполненных в Matlab с помощью описанной методики для трехфазного автономного инвертора, с расчетами потерь мощности, выполненных с помощью программы MelcoSim. Ряд проведенных исследований показал, что расхождение расчета потерь мощности в разработанной модели Matlab и расчета, выполненного специализированной программой MelcoSim, не превышает 0,572 %, что доказывает адекватность разработанной методики.

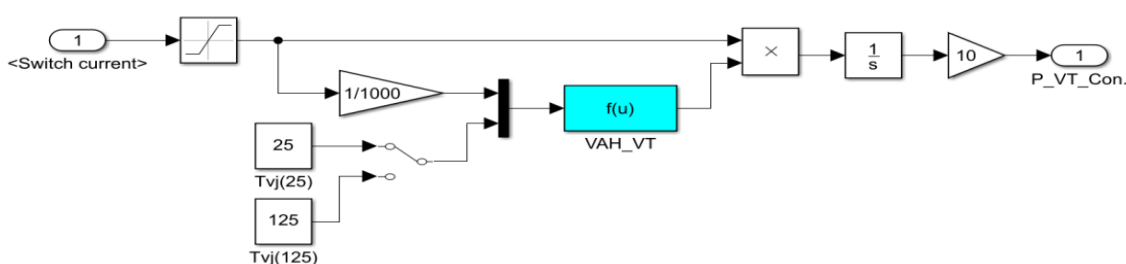


а)

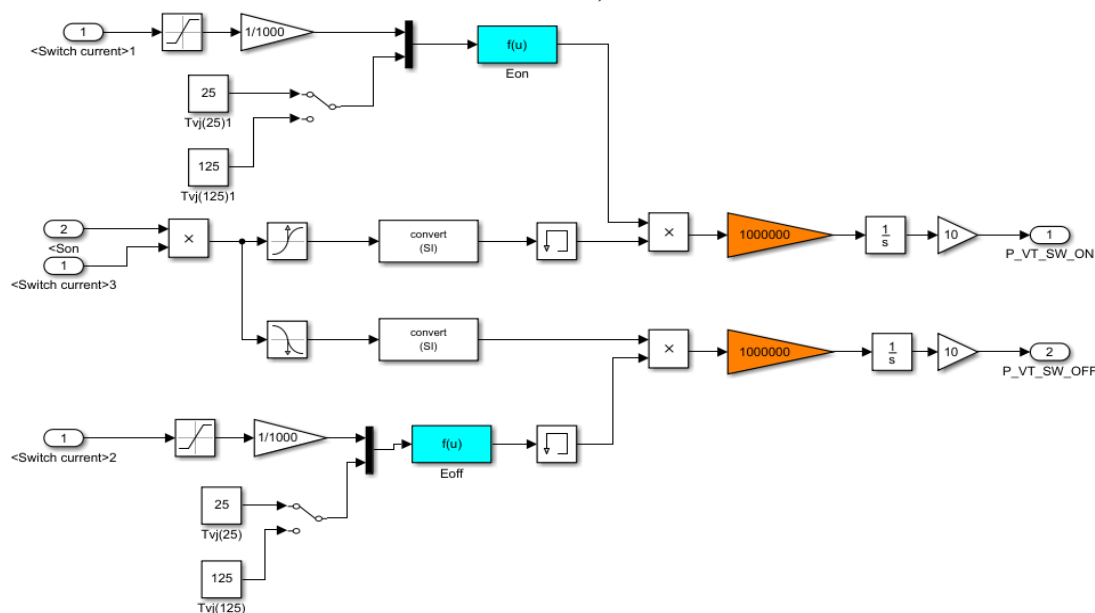


б)

Рисунок 16 – Характеристики транзистора SM600DX-24T1: а) напряжения коллектор-эмиттер от тока коллектора $U_{CE}(I_C)$; в) зависимости энергии включения $E_{ON}(I_C)$ и выключения $E_{OFF}(I_C)$



а)



б)

Рисунок 17 – Имитационные модели расчета: статических потерь мощности в IGBT-транзисторе (а); динамических потерь мощности в IGBT-транзисторе (б)

На основе данной методики разработан алгоритм расчета энергетической эффективности ИПП, который показан на рисунке 20. Разработанный алгоритм расчета энергетической эффективности ИПП обеспечивает необходимую точность определения потерь в ИПП, задаваемую значением $\varepsilon\%$, путем уточнения аппроксимации графиков $U_{ce}(I_C)$, $U_f(I_f)$, $E_{on}(I_C)$, $E_{off}(I_C)$, $E_{rec}(I_f)$.

Используя данный алгоритм, была разработана программа расчета энергетической эффективности ИПП на языке Delphi.

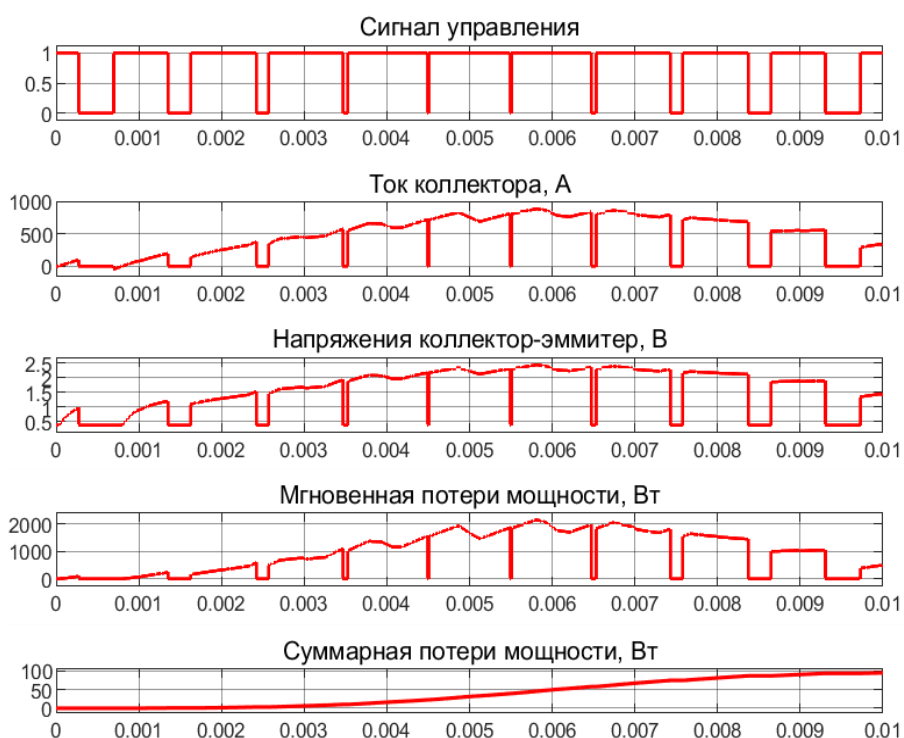


Рисунок 18 – Результаты моделирования статических потерь мощности

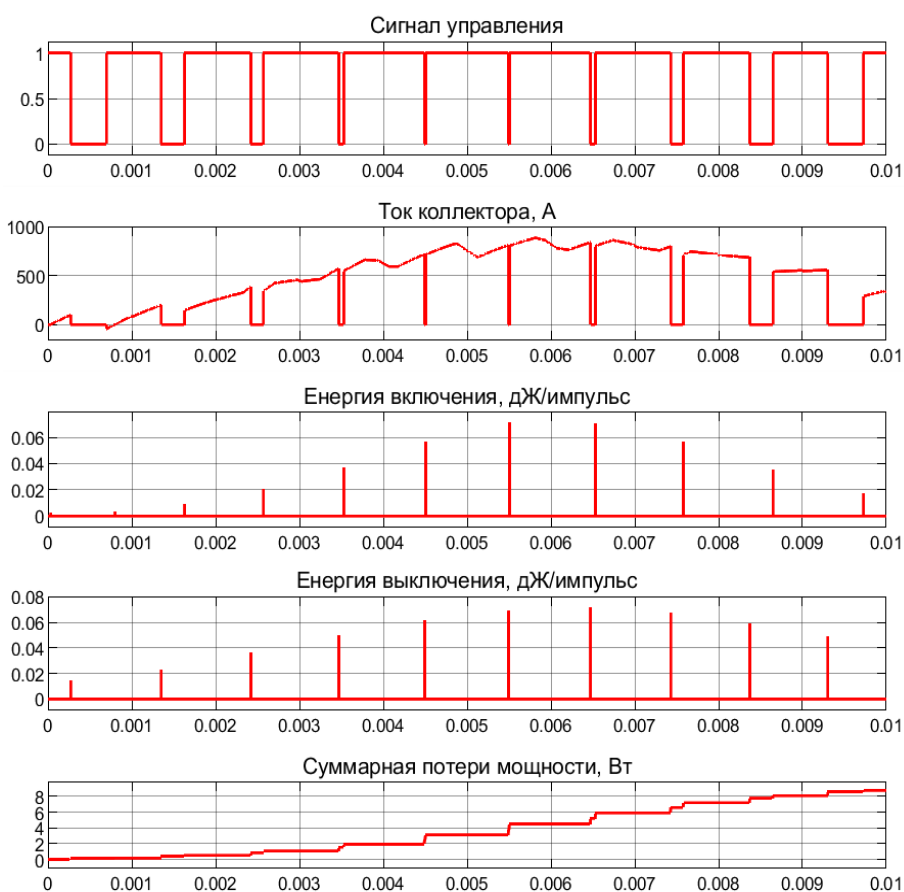


Рисунок 19 – Результаты моделирования динамических потерь мощности

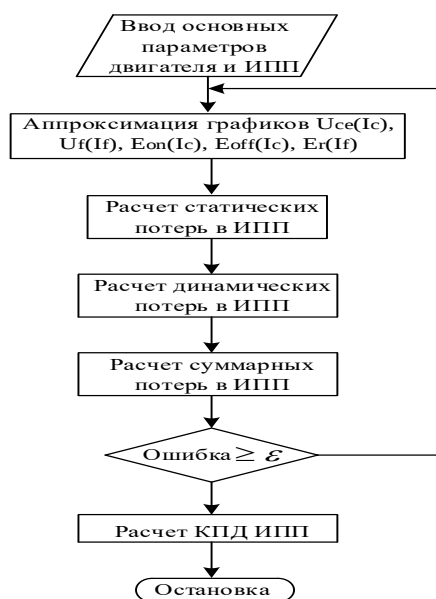
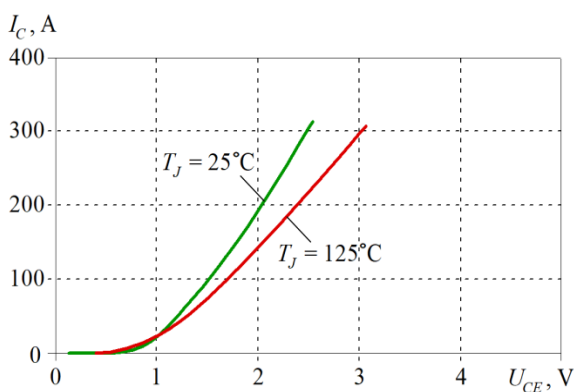


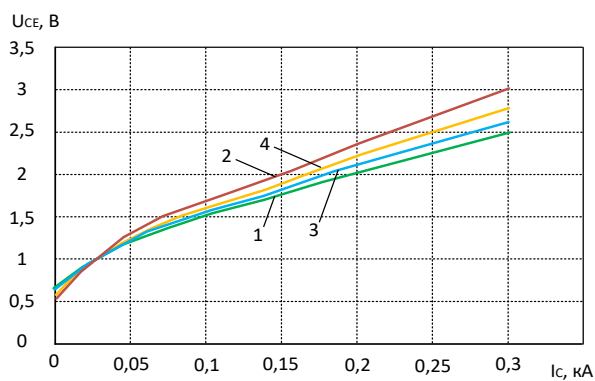
Рисунок 20 – Алгоритм расчета энергоэффективности ИПП

$$\begin{aligned}
 U_{CE} (I_C, t^{\circ}C) = & -1005.9 \cdot I_C^4 \cdot (0.002496471 \cdot t + 0.687941147) + \\
 & + 677.07 \cdot I_C^3 \cdot (0.002685099 \cdot t + 0.664362621) - \\
 & - 156.39 \cdot I_C^2 \cdot (0.002802609 \cdot t + 0.649673892) + \\
 & + 21.408 \cdot I_C \cdot (0.002679372 \cdot t + 0.665078475) + \\
 & + 0.5288 \cdot (-0.0022882 \cdot t + 1.286024962)
 \end{aligned} \quad (15)$$

Результаты расчета полученной полиномиальной зависимости $U_{CE}(I_C)$ по формуле (15) при температурах 25°C (1), 50°C (3), 80°C (4) и 125°C (2) представлены на рисунке 21б.



а)



б)

Рисунок 21 – Характеристики модуля транзистора 2MBI150U2A-060 при разных температурах

На рисунке 22 показаны графики потерь мощности (а) и КПД (б) в силовых транзисторах в зависимости от частоты коммутации при температуре: 25°C (1); 125°C (2). Проведенное исследование показывает, что в зависимости от температурного режима потери мощности в ключах изменяются довольно существенно – от 14 до 22 %, а КПД в инверторе снижается в пределах от 0,23 до 0,58 %.

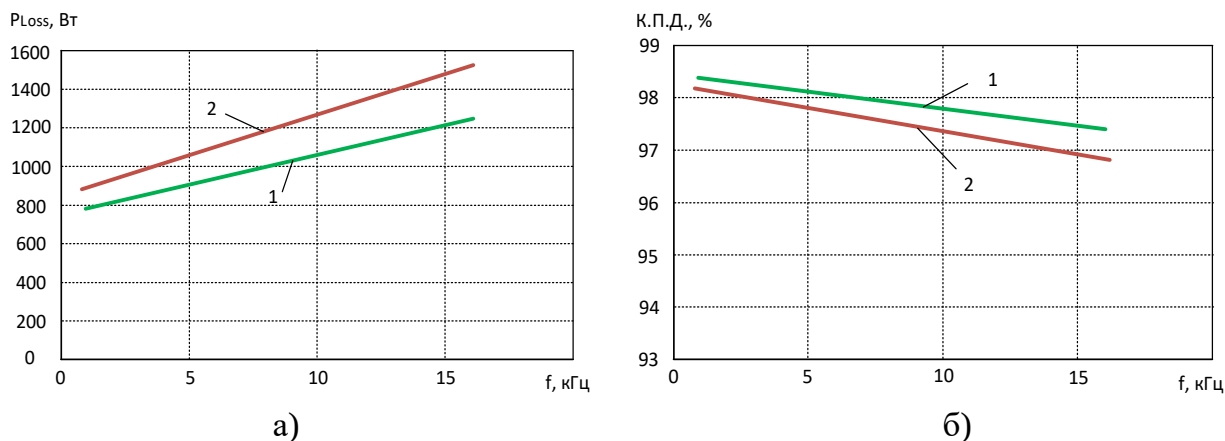


Рисунок 22 – Зависимость потерь мощности (а) и КПД (б) от частоты коммутации

Таким образом, разработанная методика позволяет с высокой точностью рассчитать потери мощности в полупроводниковых ключах для любого типа ИПП с любым алгоритмом управления. Разработанная методика расчета потерь мощности позволяет также учесть влияние температуры модуля на потери мощности.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования схем ИПП постоянного и переменного тока. В ходе экспериментальных исследований на стенде «Преобразователь постоянного напряжения» установлено, что выходное напряжение снижается при изменении частоты коммутации.

При скважности 0,92 и частоте коммутации 2 кГц выходное напряжение при максимальном токе нагрузки составило 19,2 В. При увеличении частоты коммутации до 10 кГц выходное напряжение снизилось на 0,35 В. При этом динамические потери в IGBT-транзисторе увеличились на 0,4375 Вт. Уменьшение напряжения объясняется тем, что при увеличении частоты коммутации увеличиваются динамические потери в IGBT-транзисторе.

С помощью смоделированной в среде Matlab схемы ИПП постоянного тока были рассчитаны потери мощности в ИПП. Выходные характеристики ИПП, полученные при эксперименте и с помощью модели, достаточно близки, что свидетельствует о высокой адекватности разработанной методики расчета потери мощности в полупроводниковых ключах.

Исследования показали, что при использовании ЧИМ в схемах ИПП постоянного тока можно уменьшить динамические потери до 40% относительно схемы с ШИМ и увеличить КПД преобразователя до 1,5%. Этот положительный эффект сильнее проявлялся при большей частоте коммутации и большей мощности силовых ключей ИПП.

Достоверность предлагаемой методики расчета потерь мощности оценивалась путем сравнения результатов экспериментов, проведенных на стенде с ПЧ SIEMENS SINAMICS G110, с результатами имитационного компьютерного моделирования в среде MATLAB (рисунок 24).

Исследования показали, что расхождение между расчетом потерь мощности с помощью разработанной модели в Matlab и экспериментом составляет около 4%, (при $f = 8$ кГц), что является показателем достаточной адекватности работы разработанной модели ПЧ и методики расчета потерь мощности.

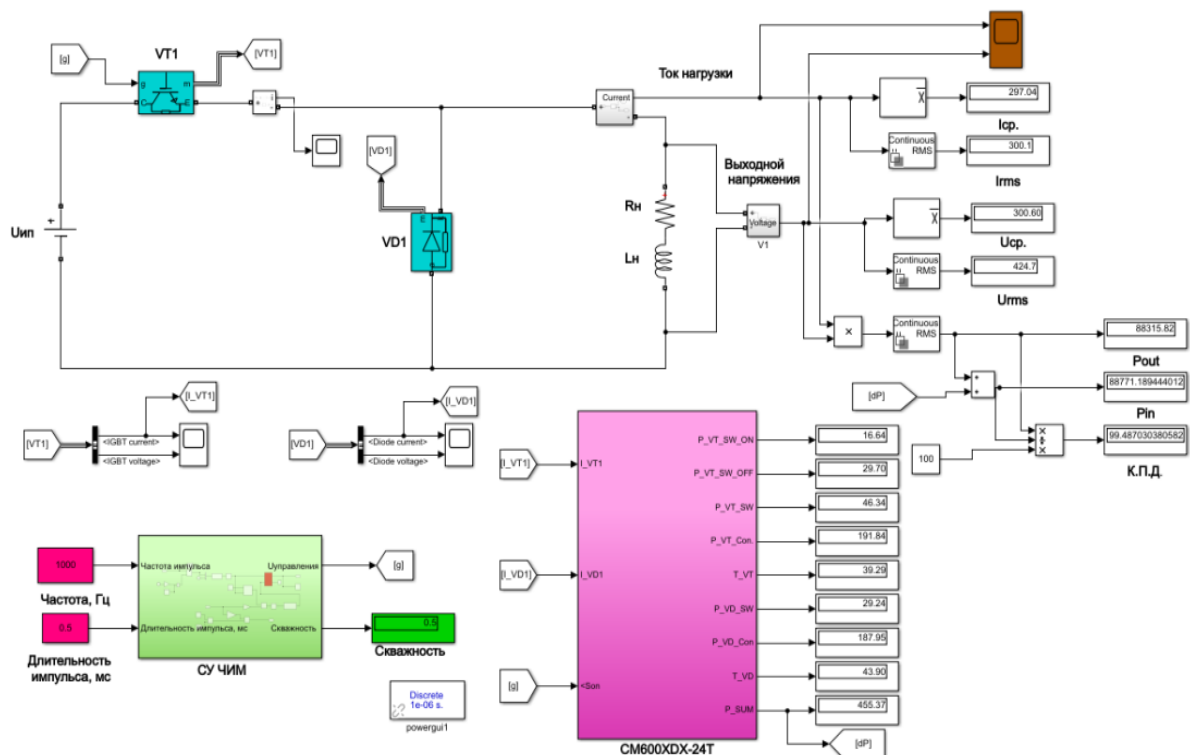


Рисунок 23 – Имитационная модель ИПП постоянного тока с ЧИМ

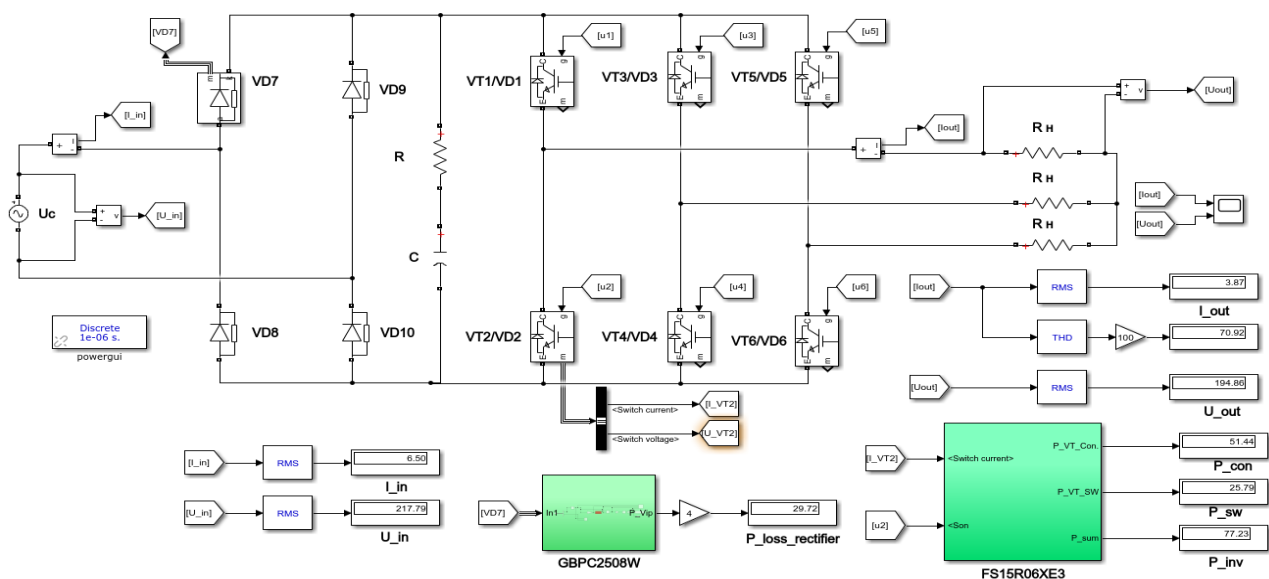


Рисунок 24 – Модель ПЧ SIEMENS SINAMICS G110

Полученные диаграммы выходного импульсного напряжения в АИН с ЧИМ показали, что снижение частоты модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения приводит к снижению динамических потерь в транзисторах АИН с ЧИМ по сравнению с АИН с ШИМ на 21,9% при максимальной частоте 2 кГц и на 20,67 % при максимальной частоте 16 кГц. Уменьшение динамических потерь также привело к повышению КПД преобразователя на 0,8%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертации получены следующие основные результаты:

1. На основании проведенных исследований основных алгоритмов модуляции в ИПП АЭП постоянного и переменного тока, таких как однократная модуляция, синусоидальная широтно-импульсная модуляция (СШИМ), односторонняя и двухсторонняя СШИМ, однополярная и двухполярная СШИМ, СШИМ в режиме перемодуляции и СШИМ с добавлением третьей гармоники, установлено, что энергетическая эффективность электроприводов постоянного и переменного тока зависит не только от элементной базы IGBT-транзисторов, но во многом определяется выбранным алгоритмом модуляции ключей полупроводниковых преобразователей, входящих в состав систем АЭП.

2. Впервые разработана функциональная схема частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) постоянного тока и на ее основе созданы структурные и имитационные модели АЭП с частотно-импульсным управлением, позволяющие моделировать динамические потери мощности в ИПП и нелинейность вольт-амперных характеристик транзисторов и диодов. Результаты имитационного моделирования автоматизированных ЭП постоянного тока с ЧИМ и ШИМ показали, что частота коммутации транзисторов в ИПП с ЧИМ снижается по сравнению с ИПП с ШИМ, что приводит к уменьшению динамических потерь и, соответственно, к увеличению КПД ИПП.

3. Разработаны математическая и имитационная модели синусоидальной частотно-импульсной модуляции (СЧИМ) переменного тока, и на её основе получен программный код для полного периода синусоидальной ЧИМ в Script/Matlab. Входными данными для СЧИМ являются период повторяемости выходного напряжения и длительность импульса. Полученные диаграммы СЧИМ показали, что частота импульсов по краям полупериода в 2,2 раза меньше, чем в середине полупериода. Вследствие этого динамические потери в IGBT-модулях автономного инвертора напряжения с СЧИМ будут значительно ниже, чем в аналогичной схеме с ШИМ.

4. Впервые на основании полиномиальной аппроксимации энергетических зависимостей силовых IGBT-транзисторов разработана методика расчета статических и динамических потерь мощности в силовых полупроводниковых преобразователях, учитывающая нелинейности вольтамперных характеристик, зависимости энергии включения, энергии выключения и энергии восстановления обратного диода от коммутированного тока. Преимущество предложенного алгоритма расчета потерь мощности заключается в возможности определения потерь мощности для любой топологии силовых преобразователей с учетом особенностей примененного алгоритма управления, а также его универсальность.

5. Проведена верификация разработанной методики расчета потерь мощности и на основе данной методики предложен алгоритм и разработана программа расчета энергетической эффективности ИПП, которые обеспечивает необходимую точность определения потерь в преобразователе путем уточнения аппроксимации энергетических характеристик.

6. Проведена аппроксимация энергетических характеристик IGBT-транзисторов, описывающих потери мощности в транзисторах с учетом их температуры и тока. Исследования показали, что в зависимости от температурного режима потери мощности в транзисторах увеличиваются в пределах от 14 до 22 %, а КПД инвертора снижается в пределах от 0,23 до 0,58 %.

7. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили повышение энергетической эффективности ИПП с ЧИМ. Установлено, что использование ЧИМ в схемах ИПП постоянного и переменного тока, позволяет снизить на 20 - 40 % динамические потери в полупроводниковых ключах и повысить на 0,8 - 1,5 % КПД силовых ИПП. Этот положительный эффект сильнее проявлялся при большей частоте коммутации и большей мощности силовых ключей ИПП.

Дальнейшее развитие исследований по теме работы может быть направлено на разработку более сложных видов ЧИМ.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, из Перечня ВАК:

1. Дунаев, М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Вестник ИрГТУ. 2020. № 2. С. 345-355.

2. Дунаев, М.П. Сравнение энергетических показателей импульсных преобразователей постоянного тока по результатам имитационного компьютерного моделирования / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С.35-41.

3. Дунаев, М.П. Моделирование потерь мощности в преобразователе частоты / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 45-51.

4. Дунаев, М.П. Сравнение энергоэффективности схем автономных инверторов напряжения с синусоидальной широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 50-55.

5. Дунаев, М. П. Моделирование системы управления электроприводом шагающего экскаватора / М. П. Дунаев, **С. У. Довудов** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. № 3(31). С. 117-123.

В изданиях, индексируемых по базе данных Scopus:

6. Dunaev, M.P. Pulse-Frequency Converter Development and Modeling within MATLAB/SIMULINK Environment / M. Dunaev, **S. Dovudov**, R. Yunusov, M. Safaraliev, K. Gulyamov // 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2020.

7. K. Gulyamov. Increase in power of DC/DC converters with increased number of conversion channels / K. Gulyamov, B. Sharifov, **S. Dovudov** [et al.] // Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference, USEC 2020, Ekaterinburg, 13–15 ноября 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 59-62.

8. K. Gulyamov. Study of the DC/DC Boost Converter Physical Model / K. Gulyamov, R. Yunusov, **S. Dovudov** [et al.] // Proceedings of the 2021 Ural-Siberian

Smart Energy Conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13–15 ноября 2021 года. Novosibirsk, 2021. P. 77-80.

9. B. Sharifov. The Mathematical Model of Pulse Width Modulation Frequency Converter / B. Sharifov, K. Gulyamov, R. Yunusov, **S. Dovudov** [et al.] // Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13–15 ноября 2021 года. Novosibirsk, 2021. P. 81-84.

10. **S. U. Dovudov**. Analysis and comparison of energy indices of dc-dc pulse converters / **S. U. Dovudov**, M. P. Dunaev, A. Zhiravetska [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. 2022. Vol. 98. No 6. P. 99-103.

Свидетельства о государственной регистрации программ:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665863 Российская Федерация. Программа для расчета потерь в преобразователе частоты: № 2021665177: заявл. 01.10.2021: опубл. 04.10.2021/А. М. Дунаев, **С. У. Довудов**; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683620 Российская Федерация. Программа для моделирования частотно-импульсной модуляции: № 2022682785: заявл. 29.11.2022: опубл. 06.12.2022 / **С. У. Довудов**, М. П. Дунаев; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

В других изданиях:

13. Дунаев, М.П. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. 2019. № 1. С. 3-6.

14. Дунаев, М.П. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3. С. 144-152.

15. Дунаев, М.П. Моделирование электропривода постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Энергетика региона: состояние и перспективы развития/ Мат. междунар. науч.-практ. конф., 20 – 21 декабря 2019. Душанбе: ТТУ, 2019. С.101-106.

16. Дунаев, М.П. Моделирование электропривода постоянного тока с частотно-импульсным преобразователем / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Электроэнергетика Таджикистана: актуальные проблемы и пути их решения/ Мат. междунар. науч.-практ. конф., 19 декабря 2019. Душанбе: ФГБОУ ВО НИУ МЭИ филиал в г. Душанбе, 2019. С.82-86.

17. Дунаев, М.П. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2020. Т. 1. №7. С. 197-198.

18. Дунаев, М.П. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. 2020. Т. 2. С. 31-34.

19. Дунаев, М.П. Моделирование потерь в преобразователе частоты с широтно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. 2020. № 1. С.18-23.

20. Дунаев, М.П. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. Т. 2. С.134-143.

21. Дунаев, М.П. Моделирование замкнутой системы электропривода постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем / М.П. Дунаев, **С.У. Довудов** // Вестник Ангарского гос. техн. ун-та. Ангарск: Изд-во АНГТУ, 2021. С.42-47.

22. Дунаев, М. П. Моделирование замкнутой системы электропривода постоянного тока / М. П. Дунаев, **С.У.Довудов**, Д. А. Яковлев // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. 2022. Т. 2. С. 29-33.