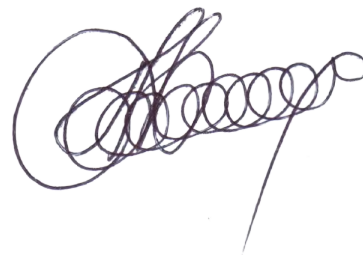


На правах рукописи



**Гулямов Камол Хикматович**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С СИСТЕМОЙ  
МНОГОКАНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОСТОЯННОГО  
НАПРЯЖЕНИЯ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2018



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Вопросы экономии топлива транспортными средствами (ТС) и улучшения экологического состояния окружающей среды становятся все более актуальными, что в свою очередь способствует появлению новых видов альтернативного топлива. Одним из способов решения указанных проблем является применение перспективных видов ТС, в том числе электромобилей (ЭМ), использующих электрическую энергию.

В последние годы развитие автотранспортной отрасли отличается стремительностью, и при условии дальнейших разработок и улучшения технических характеристик ЭМ могут стать альтернативой автомобилям традиционной конструкции. Несмотря на большие достижения в области электромобилестроения, на пути массового производства электротранспорта (ЭТ) стоят серьезные технические и экономические препятствия, а именно – большая стоимость и неудовлетворительные массогабаритные показатели аккумуляторных батареи (АБ), длительное время заряда и низкий ресурс этих накопителей энергии.

Известно, что за счет увеличения питающего напряжения трехфазного инвертора и соответственно тягового электродвигателя (ТЭД), при условии постоянства мощности, во-первых, повышаются тяговые характеристики электропривода (ЭП), во-вторых, снижаются токовые нагрузки на силовые цепи и обмотки электрической машины.

Необходимость снижения токовых нагрузок может появиться при использовании ТЭД большой мощности - от 50-70 кВт и выше. При таких значениях мощности в пиковые моменты нагрузки по обмоткам двигателя и силовым цепям, в том числе по ключевым транзисторам инвертора, будут протекать значительные токи. Повышение токовых нагрузок связано с дополнительными потерями энергии, увеличением сечения проводников, организацией более интенсивного теплоотвода системой охлаждения и, как следствие, ухудшением массогабаритных показателей компонентов тягового электрооборудования.

Одним из возможных вариантов повышения питающего напряжения инвертора и электрической машины при использовании тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) с более низким напряжением и без существенного усложнения силовой установки ЭМ является применение промежуточного обратимого преобразователя постоянного напряжения (ОППН). Преобразователь включается во входную силовую цепь постоянного тока тягового инвертора и может быть интегрирован в конструкцию последнего. Основная задача данного преобразователя является повышение постоянного напряжения тяговой аккумуляторной батареи.

Положительный эффект от реализации подобной системы нивелирует недостатки, которые могут быть при изменении конструкции тяговой аккумуляторной батареи, и поэтому можно говорить о целесообразности и

эффективности данного решения. Таким образом, разработка методики расчета ОПН транспортного назначения является актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы.**

Большой вклад в развитии импульсных преобразователей постоянного напряжения внесли известные ученые М.А. Слепцов, А.В. Шабанов, А.В. Лукашенко, Г.С. Зиновьев, А.А. Мартынов, Г. Белов, В.А. Скворцов, В.С. Моин, Wensong Yu, Shahab H.A. Moghaddam, Liqin Ni, Haiwen Liu, S. Mazumder, J. Zhang, R.R. Gajjar.

В последние годы большой интерес вызывает применение импульсных преобразователей постоянного напряжения в бортовой системе электроснабжения электромобилей, а также в электроприводах транспортного назначения. Вопросам применения статических преобразователей в тяговых электроприводах занимались ученые В.М. Кобозев, О.А. Ставров, Ю. Чижиков, J. Vadillo, S. Han, H. Gualous, M. Kamiya, R.P. Thomas, Shaowu Li, M. Hedlund.

Вместе с тем анализ публикации в этом направлении показал недостаточность исследования и требует дальнейшего изучения.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности электропривода и улучшение массогабаритных показателей электрического транспортного средства.

Достижение поставленной цели осуществляется решением следующих **основных задач**:

1. Анализ существующих преобразователей постоянного напряжения, их преимуществ и недостатков, выбор оптимальной структуры и схемы преобразователя для электроприводов большой мощности транспортного назначения.

2. Разработка методики определения и расчета параметров основных компонентов обратимого преобразователя постоянного напряжения для системы тягового электрооборудования электрического транспортного средства.

3. Разработка комплексной математической модели преобразователя постоянного напряжения в составе системы тягового электрооборудования электрического транспортного средства.

4. Исследовать повышение эффективности электропривода и улучшение массогабаритных показателей электрического транспортного средства с применением преобразователя постоянного напряжения.

5. Техническая реализация исследуемого преобразователя постоянного напряжения и проведение экспериментальных исследований при различных условиях и режимах работы.

### **Научная новизна:**

1. Определена рациональная структура и схема ОПН для электроприводов транспортного назначения.

2. Разработана методика определения и расчета параметров основных компонентов ОППН для системы тягового электрооборудования электрического транспортного средства.

3. Разработана математическая модель ОППН в составе системы тягового электрооборудования электрического транспортного средства.

4. Определена эффективность применения высоковольтного электропривода с применением ОППН в силовой установке электрического транспортного средства с использованием расчетных и экспериментальных исследований.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Предложенная методика расчета может быть использована при проектировании повышающего преобразователя постоянного напряжения для применения в состав силовой установки электрического транспортного средства (СУ ЭТС).

2. Разработанная математическая модель ОППН в составе СУ ЭТС может быть использована для анализа и оценки тяговых и энергетических характеристик транспортных средств на электрической тяге.

3. Результаты компьютерного моделирования разработанной имитационной модели электромобиля с применением ОППН во входной цепи постоянного тока, позволяют осуществлять подробный анализ характеристик ЭТС с целью дальнейшей технической реализации.

**Реализация результатов работы.** Результаты выполненных исследований нашли отражение в учебном процессе кафедры «Электротехника и электрооборудование» МАДИ:

1. При формировании лекционных материалов по курсу «Автотранспортные средства с комбинированными установками» для студентов старших курсов и магистрантов.

2. При выполнении курсовых и дипломных работ студентов старших курсов и в научно-исследовательских работах магистрантов и аспирантов.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими на кафедре «Автоматизированный электропривод и электрические машины» в рамках дисциплины «Электрооборудование автомобилей».

Разработанный в рамках диссертационной работы экспериментальный образец внедрен в предприятие ОАО «Авторем» и используются специалистами при работе с электрооборудованием транспортных средств. Результаты внедрения подтверждается соответствующими актами.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы, основанные на теории импульсного преобразования энергии, методы электромеханического преобразования энергии и методы математического моделирования.

Проверка разработанной математической модели осуществлялась методами компьютерного и физического моделирования.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика определения и расчета параметров основных компонентов обратимого преобразователя постоянного напряжения в составе системы тягового электрооборудования ЭТС.
2. Результаты расчетных и экспериментальных исследований технических характеристик тягового электрооборудования ЭТС с применением ОППН, полученные в результате математического моделирования.
3. Комплекс технических решений по реализации системы тягового электрооборудования электромобиля, в том числе ОППН, интегрированного в силовую установку ЭТС.
4. Результаты экспериментальных исследований движения ЭМ с применением ОППН в силовой установке в условиях городского и загородного движения с использованием средств имитационного моделирования.

**Степень достоверности.** Достоверность полученных результатов и выводов в диссертационной работе подтверждена сопоставлением результатов цифрового моделирования и результатов эксперимента на физической модели.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе современных информационно-коммуникационных и энергосберегающих технологий», Воронеж, 2016 г.;
2. Республиканской научно – практической конференции: «Электроэнергетика, гидроэнергетика, надёжность и безопасность», Душанбе, 2016 г.;
3. III Международной научно – практической конференции «Наука России: цели и задачи», Екатеринбург, 2017 г.;
4. Международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки, технологий, инновационной деятельности», Белгород, 2017 г.
5. с 74-й по 76-ю научно-методических и научно-исследовательских конференциях МАДИ, 2016 - 2018 гг.

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационного исследования отражены в 9 научных трудах, в том числе 5 статей опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка принятых сокращений, списка литературы и приложений. Основная часть работы изложена на 151 страницах машинописного текста, содержит 90 рисунков, 7 таблиц и 5 страниц приложений.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определены цели и задачи, описана структура и состав диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы приводится обзор существующих схем ППН с учетом назначения и области применения, а также осуществлён анализ их преимуществ и недостатков. В работе приводятся результаты теоретических исследований, в том числе выявленного преимущества применения ОППН в

тяговой системе ЭТС. Приводятся описание основных компонентов силовой установки электромобиля и их недостатки, в том числе высокая стоимость и сложность, большой вес и низкий ресурс АБ, существующих на сегодняшний день. Кроме этого, осуществлён выбор оптимальной структуры и схемы преобразователя постоянного напряжения для применения в состав электроприводов транспортного назначения, а также выбор системы управления ключевыми элементами обратимого преобразователя. Проанализированы режимы работы и принцип действия выбранного преобразователя.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена методике определения и расчета параметров основных компонентов ОППН для системы тягового электрооборудования (СТЭО) электрического транспортного средства.

Предлагаемая методика включает в себя тяговый расчет электромобиля с целью определения требуемых характеристик основных компонентов тяговой системы, определение требований к входным и выходным параметрам ОППН, расчет основных компонентов преобразователя в составе СТЭО ЭТС и выбор системы управления ключевыми элементами обратимого преобразователя. Для расчетных исследований были использованы параметры электромобиля полной массой 1748 кг. По результатам проведенных теоретических исследований было выявлено, что для СТЭО с двигателем мощностью более 50 кВт и номинальным напряжением АБ 400 В оптимальной структурой преобразователя является схема с трехканальным преобразованием. Данная схема показана на рисунке 2.1.

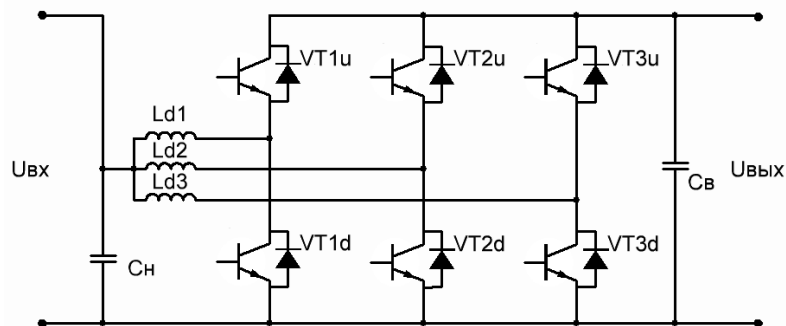


Рисунок 2.1 – Трехканальный ОППН

Данный вид преобразователя по своим техническим характеристикам имеет преимущества по сравнению с двухтактным мостовым и полумостовым преобразователями одноканальной структуры. Преобразователь данной топологии по структуре состоит из трех параллельных преобразователей, работающих по принципу чередования каналов. Для определения основных параметров повышающего преобразователя в качестве исходных данных были использованы параметры реального транспортного средства, а также результаты тягового расчета, проведенного во 2-й главе диссертационной работы.

Мощность ОППН определяется исходя из мощности силового электропривода с учетом потерь энергии:

$$P_{\text{оппн}} = \frac{P_{\text{тти}}}{\eta_{\text{тти}}}, \quad (2.1)$$

$$P_{\text{ТТИ}} = \frac{P_{\text{ТЭД}}}{\eta_{\text{ТЭД}}}, \quad (2.2)$$

$$P_{\text{ТЭД}} = M_{\text{ТЭД}} \cdot \omega_{\text{ТЭД}}, \quad (2.3)$$

где  $P_{\text{ОППН}}$ ,  $P_{\text{ТТИ}}$ ,  $P_{\text{ТЭД}}$ , – мощность ОППН, трехфазного тягового инвертора и тягового электродвигателя соответственно,  $\eta_{\text{ТТИ}}$  – КПД трехфазного инвертора,  $\eta_{\text{ТТИ}}$ ,  $M_{\text{ТЭД}}$ ,  $\omega_{\text{ТЭД}}$ , – КПД, крутящий момент и частота вращения тягового электродвигателя соответственно.

На рисунке 2.2 представлена функциональная схема СТЭО ЭТС с использованием ОППН.

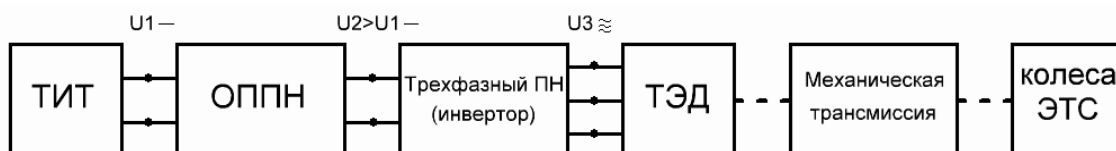


Рисунок 2.2 – Функциональная схема СТЭО ЭТС с применением ОППН: ТИТ – тяговый источник тока; ОППН – обратимый преобразователь постоянного напряжения; ТЭД – тяговый электродвигатель

Теоретический анализ работ, посвященных высоковольтным электроприводам транспортного назначения, показывает, что увеличение питающего напряжения инвертора  $U_d$  в системе Инвертор-ТЭД благоприятно сказывается на тяговых характеристиках электропривода транспортного средства. Увеличение напряжения источника дает возможность использовать электродвигатели с более высоким номинальным напряжением и с более низкими габаритами и меньшим весом. Последний факт обусловлен, главным образом, зависимостью сечения проводов обмотки от величины протекающего тока. Учитывая все вышеперечисленные факторы, выбор выходного напряжения производится исходя из максимально возможных характеристик высоковольтного ТЭД и инвертора, с учетом обеспечения надежной изоляции высоковольтных шин от корпуса автомобиля для обеспечения безопасной эксплуатации ТС. С учетом всех технических характеристик и ограничений в СТЭО ЭТС выходное напряжение ОППН принято равным  $U_d=650$  В. Предложенная методика справедлива для многоканального ППН. При других схемах преобразования необходимо учитывать параметры дополнительных элементов, а также структуру самого преобразователя. Следует отметить, что определение входных и выходных характеристик ОППН по предложенной методике дают идеализированную оценку показателям работы ОППН в составе СТЭО ЭТС. Уточнение расчетов будет проводиться с использованием средств математического (компьютерного) моделирования трехканального обратимого преобразователя постоянного напряжения в составе СТЭО ЭТС.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена описанию математической модели энергетической СУ ЭТС. Для описания математической модели СУ ЭТС были исследованы математические модели АБ, ТЭД, трехфазного инвертора и трехканального ОППН.

*Математическая модель АБ.* Для описания математической модели зарядно-разрядных характеристик АБ использованы уравнения Шеферда, Зиммермана и



Петерсона. Базовая эквивалентная электрическая схема замещения аккумуляторной батареи представлена на рисунке 3.1.

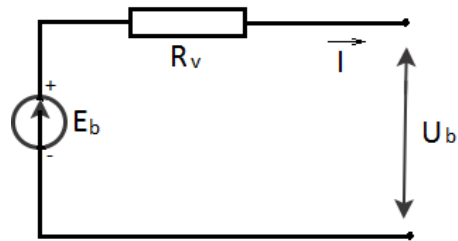


Рисунок 3.1 – Базовая эквивалентная электрическая схема АБ

Для построения эквивалентной схемы и получения уравнений были сделаны следующие допущения:

- внутреннее сопротивление АБ считается постоянным;
- емкость батареи считается неизменной при изменении тока;
- не учитывается влияние температуры;
- саморазряд батареи отсутствует;
- считается, что батарея не имеет эффекта памяти.

Уравнение для определения напряжения  $U_b$  для литий-ионных АБ, которое наиболее часто используется в тяговых электроприводах в режиме заряда, имеет вид:

$$U_b = E_0 - I_z R - K \frac{C}{I_z t + 0,1C} \cdot I_z^* - K \frac{C}{C - I_z t} \cdot I_z t + A \cdot e^{-B I_z t}. \quad (3.1)$$

Для режима разряда:

$$U_b = E_0 - I_r R - K \frac{C}{C - I_r t} \cdot (I_r t + I_r) + A \cdot e^{-B I_r t}, \quad (3.2)$$

*Математическая модель СДПМ.* Для упрощения составления уравнений, описывающих динамические режимы работы синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), была использована модель обобщенной двухфазной машины (ОДМ).

Функциональная схема системы векторного управления (ВУ) СДПМ показана на рисунке 3.2.

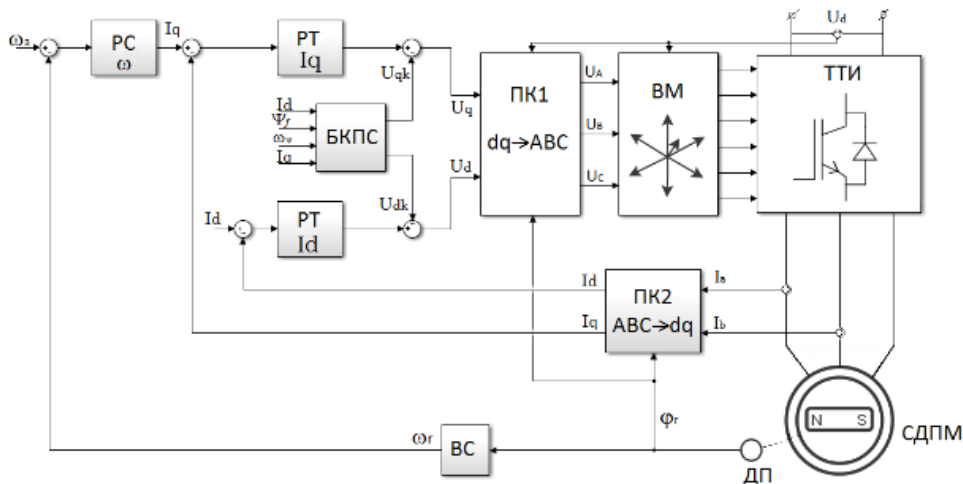


Рисунок 3.2 – Функциональная схема системы ВУ СДПМ

Метод ОДМ позволяет переходить от сложных уравнений реального трехфазного двигателя к векторному описанию переменных этого двигателя.

В этом случае уравнения, описывающие СДПМ в синхронной системе координат (d,q), примут вид:

$$\begin{cases} U_d = R_s I_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \omega_{\Delta}; \\ U_q = R_s I_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd} \omega_{\Delta}; \\ \psi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \psi_f; \\ \psi_{sq} = L_{sq} I_{sq}; \\ M_{\Delta} = \frac{3}{2} Z_p (\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd}); \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = \left( M_{\Delta} - M_c - \beta \frac{\omega_{\Delta}}{Z_p} \right), \end{cases} \quad (3.3)$$

Следует отметить, что математическое описание СДПМ значительно проще по сравнению с асинхронным двигателем или синхронным двигателем с обмоткой возбуждения, благодаря меньшему количеству перекрестных связей и постоянству магнитного потока, создаваемого постоянными магнитами на роторе.

*Математическая модель ОПНН.* В отличие от одноканального преобразователя, у которого имеется два состояния схемы, во всем периоде коммутации многоканальные ППН могут иметь несколько состояний. Количество состояний схемы МППН зависит от количества каналов и режима подачи импульсов (алгоритма управления ключом) в параллельно работающих преобразователях. Так как схема ППН имеет трехканальную структуру и чередование подачи импульсов на транзисторные ключи каждого параллельно работающего преобразователя осуществляется с задержкой на  $120^\circ$ , то для описания математической модели анализированы состояния схемы преобразователя на трех этапах его работы. На рисунке 3.3 показана схема ППН в режиме повышения и вместо транзисторов условно изображены ключи K1d-K3d, а в верхних плечах показаны только обратные диоды D1u-D3u.

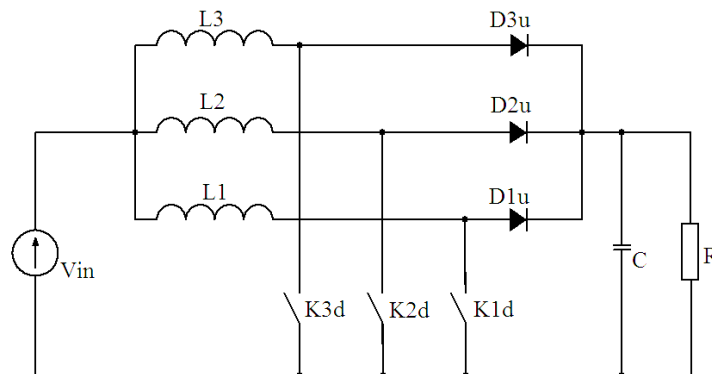


Рисунок 3.3 – Трехканальный ППН в режиме повышения

На рисунке 3.4 показано чередование импульсов управления транзисторами трехканального преобразователя постоянного напряжения.

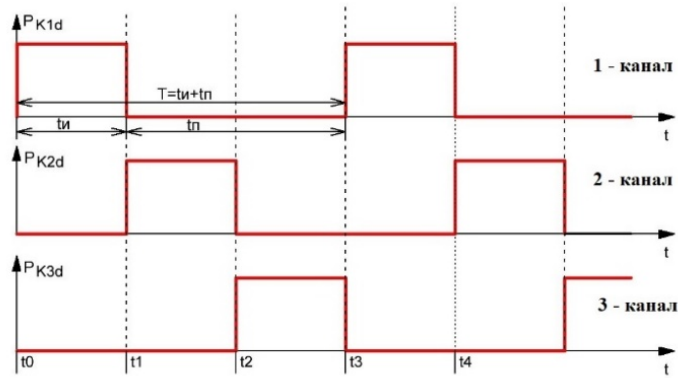


Рисунок 3.4 – Чередование импульсов управления ключами K1d-K3d

Таблица 3.1 – Состояние ключей на каждом этапе работы

Этапы	K1d	K2d	K3d	D1u	D2u	D3u
I	1	0	0	0	0	0
II	0	1	0	1	0	0
III	0	0	1	1	1	0

Примечание. 1 – открыт; 0 – закрыт.

*Этап I, продолжительность от  $t_0$  –  $t_1$ , ключ K1d открыт*

В данном интервале в базисе переменных состояний схема преобразователя описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{1}{L1} V_{in}, \\ \frac{dV_C(t)}{dt} = -\frac{1}{RC} V_C. \end{cases} \quad t \in [t_0, t_1], \quad (3.4)$$

где  $i_{L1}(t)$  – ток индуктивности  $L_1$ ;  $V_C(t)$  – напряжение емкости;  $V_{in}(t)$  – входное напряжение.

*Этап II, продолжительность от  $t_1$  –  $t_2$ , ключ K2d и диод D1u открыты*

На данном этапе схема преобразователя в пространстве состояний описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{cases} \frac{di_{L1}(t)}{dt} = -\frac{1}{L1} V_C(t) + \frac{1}{L1} V_{in}(t), \\ \frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{1}{L2} V_{in}, \\ \frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1}(t) - \frac{1}{RC} V_C(t). \end{cases} \quad t \in [t_1, t_2], \quad (3.5)$$

*Этап III, продолжительность от  $t_2$  –  $t_3$ , ключ K3d и диоды D1u, D2u открыты*

В данном интервале с учетом преобразований схема преобразователя в пространстве состояний описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{cases} \frac{di_{L12}(t)}{dt} = -\frac{1}{L12} V_C(t) + \frac{1}{L12} V_{in}(t), \\ \frac{di_{L3}(t)}{dt} = \frac{1}{L3} V_{in}, \\ \frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{1}{C} i_{L12}(t) - \frac{1}{RC} V_C(t). \end{cases} \quad t \in [t_2, t_3], \quad (3.6)$$

где  $L12$  – эквивалент параллельно соединенных индуктивностей  $L1$  и  $L2$ .

$$L12 = \frac{L1 \cdot L2}{L1 + L2}. \quad (3.7)$$

Таким образом, для создания комплексной математической модели СТЭО ЭТС используется математическое описание отдельных элементов представленной выше системы. Комплексная математическая модель дает возможность проведения экспериментальных исследований СТЭО ЭТС с помощью компьютерного моделирования, подробное описание которых представлено в четвертой главе.

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена разработке и исследованию имитационной модели энергетической СУ ЭТС с применением ОППН, используя современные методы компьютерного моделирования в среде Matlab/Simulink. В данной главе для построения имитационной модели СУ ЭТС за основу были взяты математические модели всех силовых узлов, описания которых отражены в третьей главе диссертационной работы.

На рисунке 4.1 приведена схема имитационной модели ОППН в составе СУ ЭТС.

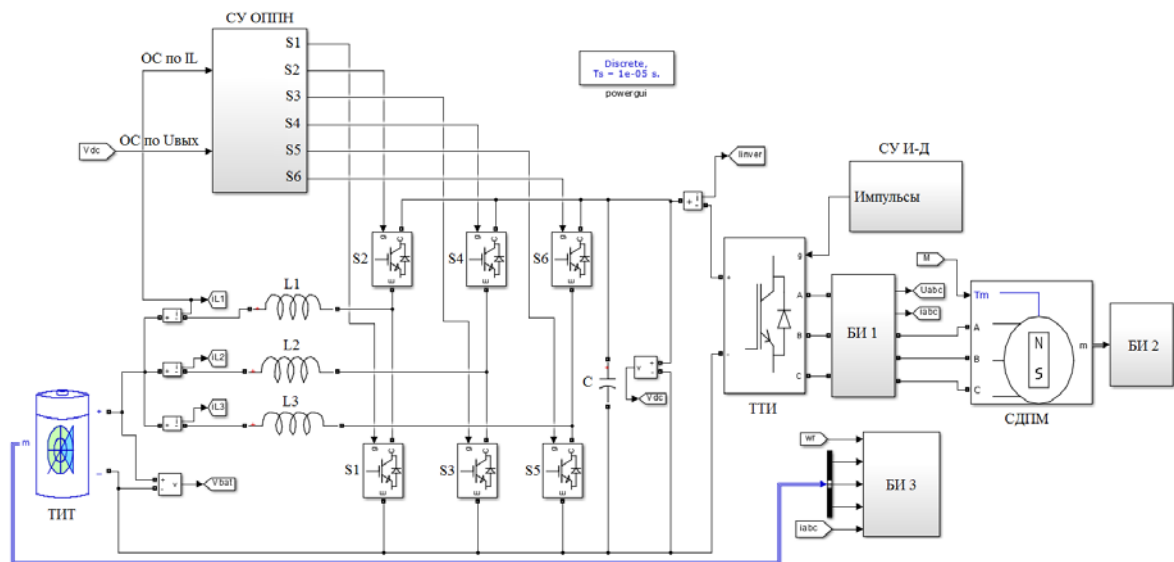


Рисунок 4.1 – Общий вид имитационной модели ОППН в составе СУ ЭТС

ОППН с системой управления, собранная в Simulink, показана на рисунке 4.2 (а,б). Импульсы управления силовыми ключами  $S1...S6$  обеспечиваются системой управления ОППН. Имитационная модель системы управления, построенная с использованием идеального релейного элемента и дискретного пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятор), генерирует на выходе прямоугольные импульсы управления с изменяющейся скважностью, в зависимости от разности напряжения задания и выходного напряжения преобразователя.

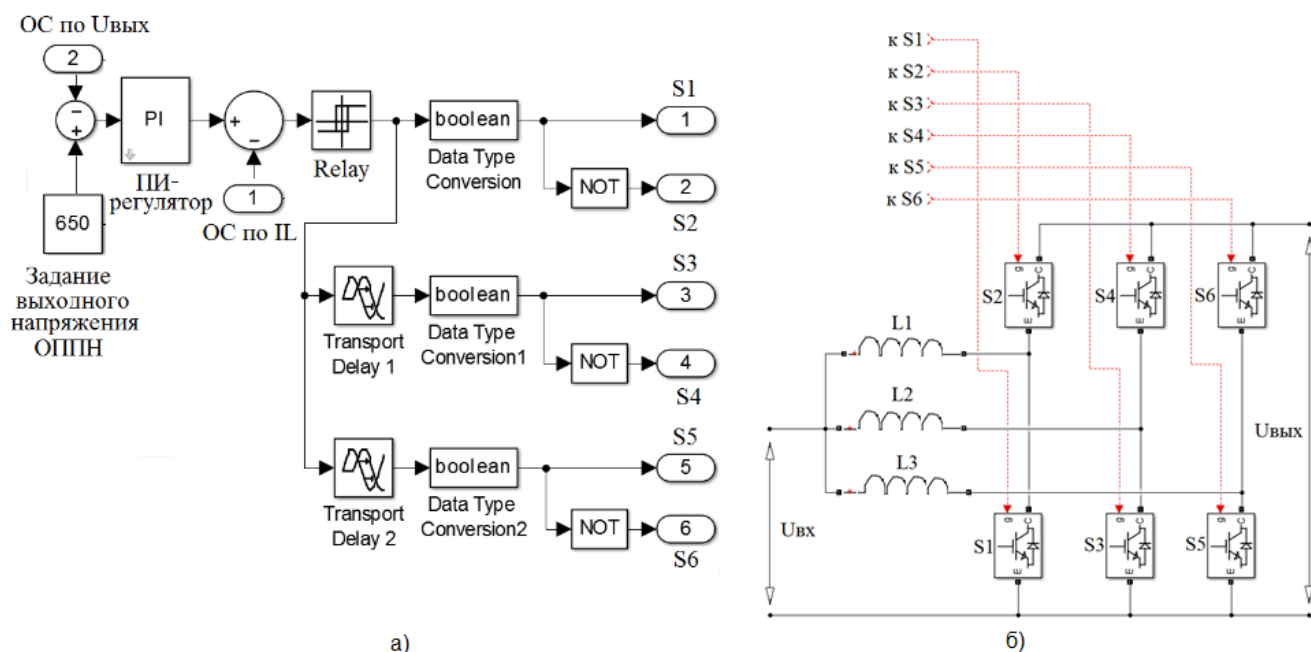


Рисунок 4.2 – Силовая схема с системой управления ОППН: а) система управления, б) силовая схема

Дискретный ПИ-регулятор, на входе которого подводится ошибка напряжения задания и текущего значения выходного напряжения, обеспечивает стремление выходного напряжения преобразователя приблизиться к заданному. Изменение выходного напряжения обеспечивается корректировкой текущего значения коэффициента заполнения импульсов управления  $D$ .

С целью подтверждения повышения эффективности электропривода и улучшения массогабаритных показателей электромотоцикла, а также возможности применения АБ более легкой конструкции и обоснования целесообразности повышения напряжения применением обратимого преобразователя постоянного напряжения, были проведены три различных эксперимента:

- 1) электропривод питается от АБ номинальным напряжением 400 В;
- 2) электропривод питается от АБ номинальным напряжением 650 В. Цель этого эксперимента – показать преимущество применения высоковольтного электропривода;
- 3) электропривод питается от АБ номинальным напряжением 400 В и с применением ОППН оно повышается до значения 650 В. Цель данного эксперимента показать преимущество повышения напряжения применением ППН без существенного усложнения, увеличения веса и удорожания АБ.

Следует отметить, что емкость аккумуляторных батарей во всех трех экспериментах одинаковая и составляет 120 А·ч. С целью максимального приближения экспериментальных характеристик имитационной модели к реальным, испытания проведены в стандартизированном ездовом цикле движения HFEDS (англ. Highway Fuel Economy Driving Schedule). Данный цикл движения продолжительностью 765 с, показанный на рисунке 4.3 характеризует загородное движение.

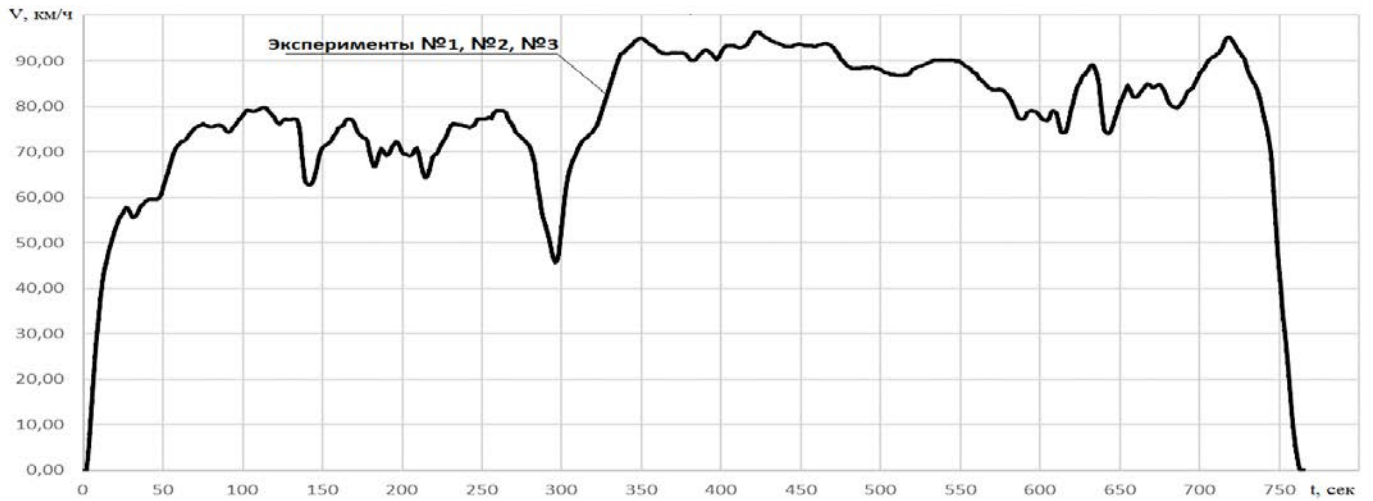


Рисунок 4.3 – Скорость движения электромобиля в цикле

Как видно на представленном рисунке 4.3 при проведении трех различных экспериментов, с питанием от источников с разными напряжениями скоростные характеристики не меняются и соответствуют стандарту HFEDS.

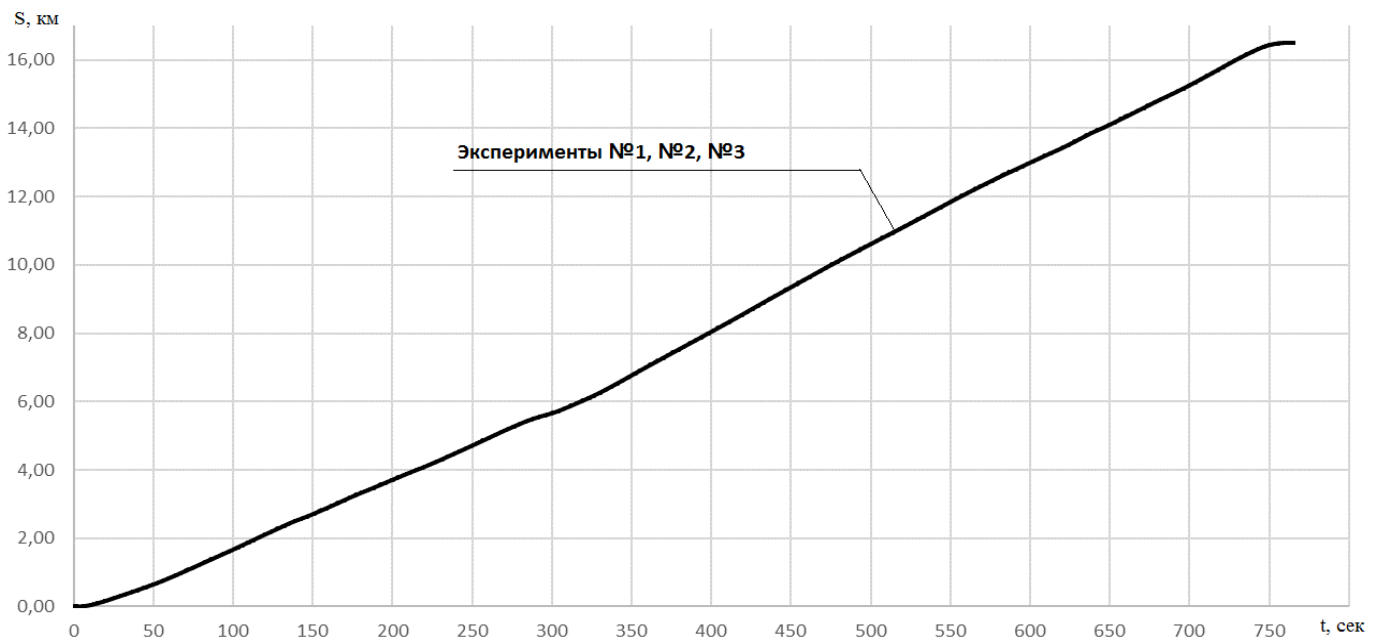


Рисунок 4.4 – Пройденный путь электромобиля в трех различных экспериментах

Как видно на рисунке 4.4 за время цикла пробег электромобиля составляет 16,5 км.

На рисунке 4.5 показаны напряжения в цепи постоянного тока при трех экспериментах для сравнения.

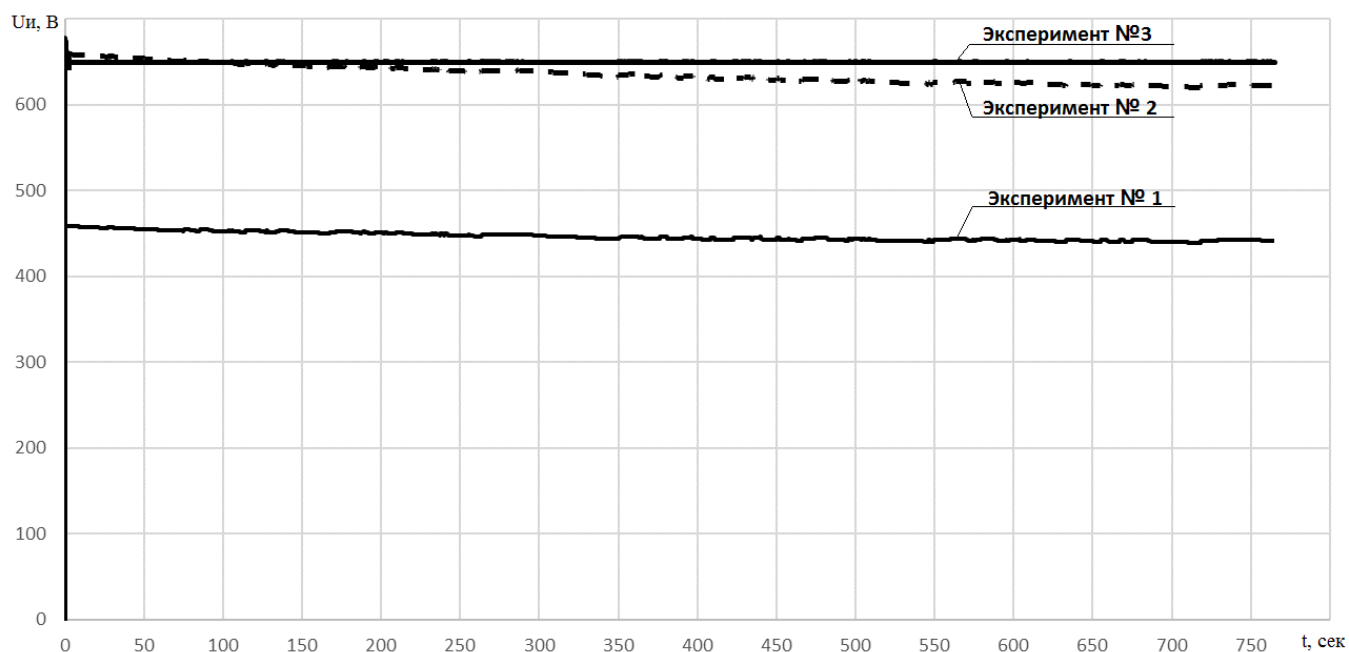


Рисунок 4.5 – Напряжение в цепи постоянного тока при трех различных экспериментах

Как видно на рисунке 4.5, на третьем эксперименте, когда применяется ОПН, независимо от снижения уровня заряда АБ, напряжение, подаваемое на вход инвертора, остается стабильным. Это является одним из важных преимуществ применения ОПН в составе СТЭО ЭТС. Другие характеристики показывают постепенное снижение напряжения, что несомненно окажет отрицательное влияние на тяговые характеристики при снижении уровня заряда до 50% и ниже.

На рисунке 4.6 показан КПД системы при трех экспериментах для сравнения.

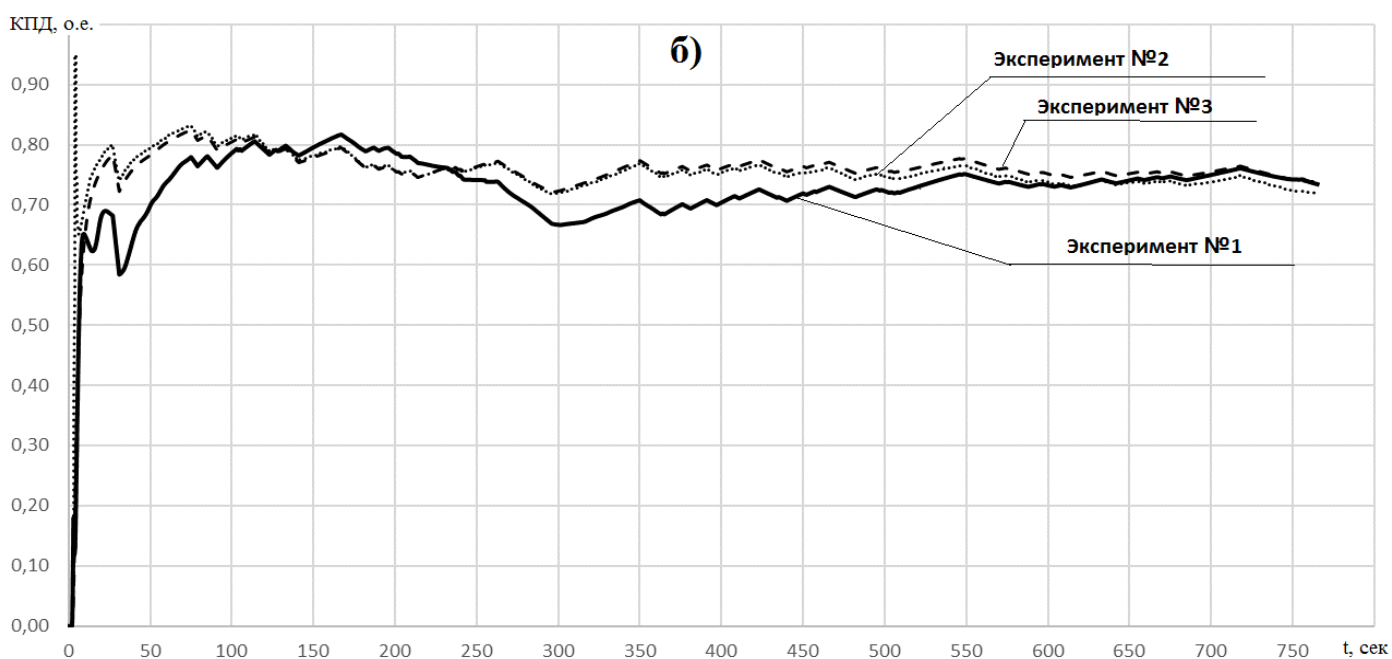


Рисунок 4.6 – КПД электропривода в трех различных экспериментах

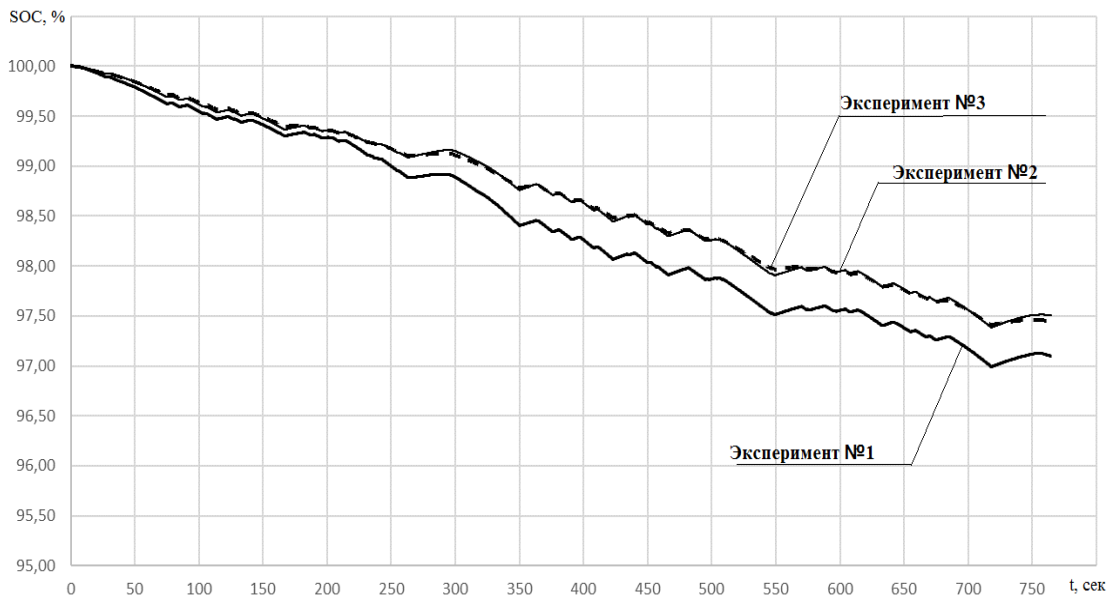


Рисунок 4.7 – Уровень заряда при трех различных экспериментах

Анализируя характеристики КПД (рисунок 4.6) можно сделать вывод о том, что при низковольтном электроприводе в период интенсивного ускорения и торможения наблюдается увеличение потерь и соответственно снижения КПД.

Как видно на рисунке 4.7, до середины цикла наблюдается постепенное увеличение разности расхода заряда. Это объясняется тем что в период интенсивных переходных процессов при высоковольтном электроприводе токи нагрузки в обмотках двигателя меньше и соответственно потери энергии меньше. Начиная с середины цикла рост разности расхода заряда прекращается из-за того, что согласно ездовому циклу ускорение и замедление автомобиля переходит в менее интенсивный период. Таким образом, результаты проведённых исследований показывают, что повышение напряжения источника при использовании ОППН дает возможность снизить потери в переходных режимах. Так как электромобиль как любой другой автомобиль значительную часть движения работает в переходных режимах (частое ускорение и замедление) особенно в городских условиях, то задача оптимизации потери энергии в электроприводе ЭТС в этих режимах имеет большое значение.

**В пятой главе** приведены результаты экспериментов на собранной физической модели с целью подтверждения её работоспособности, а также сопоставления результатов экспериментов для проверки адекватности собранных моделей. Для реализации поставленной задачи в учебно-практической лаборатории кафедры электротехники и электрооборудования МАДИ собрана физическая модель повышающего преобразователя постоянного напряжения. В качестве системы управления преобразователем, т.е. генератора управляющих импульсов транзисторного ключа G1 (рисунок 5.1), использован программируемый микроконтроллер семейства ATmega. Для проведения экспериментальных работ и снятия рабочих характеристик был собран стенд с использованием повышающего ППН, различных датчиков и измерительных приборов. В качестве источника питания был использован лабораторный блок питания Mastech NY5020E, а в



качестве нагрузки для повышающего ППН использовался потенциометр с допустимым током 5 А и максимальным сопротивлением 30 Ом. На рисунке 5.1 представлена принципиальная схема проектированного повышающего преобразователя постоянного напряжения.

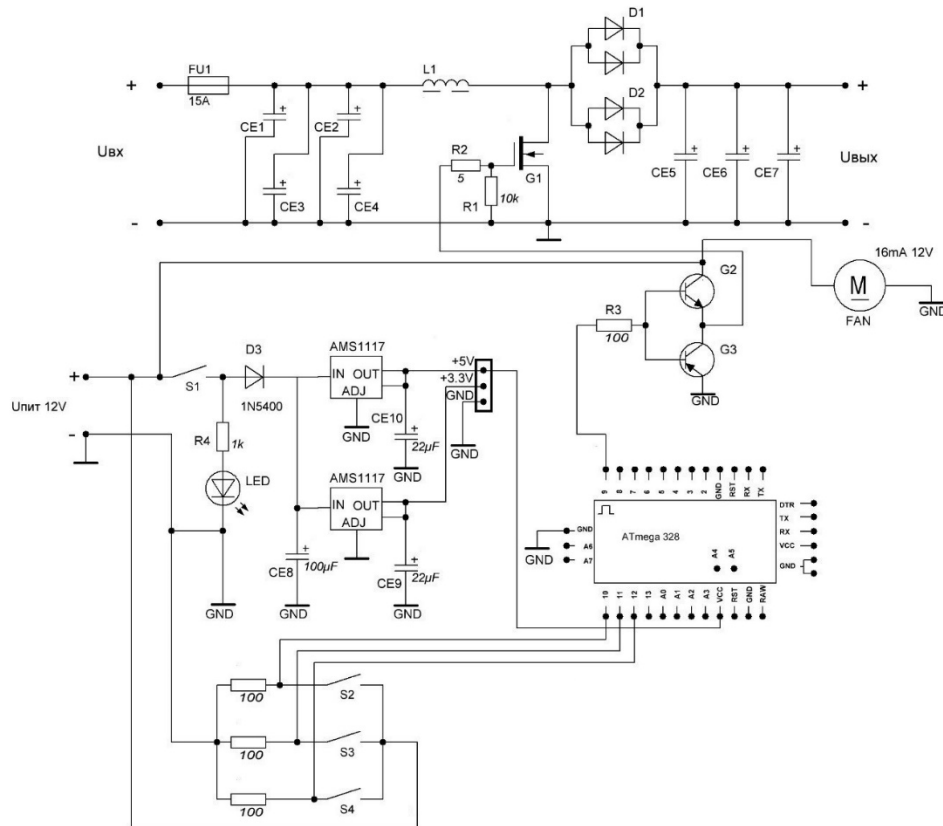


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема повышающего преобразователя

Программа проведения экспериментальных работ состоит в установке входного напряжения повышающего преобразователя на величину 18,4 В и повышении этого напряжения до 30 В с помощью ППН с поддержанием выходного напряжения неизменным при различных нагрузках. Данные временных характеристик при разных значениях нагрузки, полученные с использованием модуля АЦП/ЦАП, показаны на рисунке 5.2.

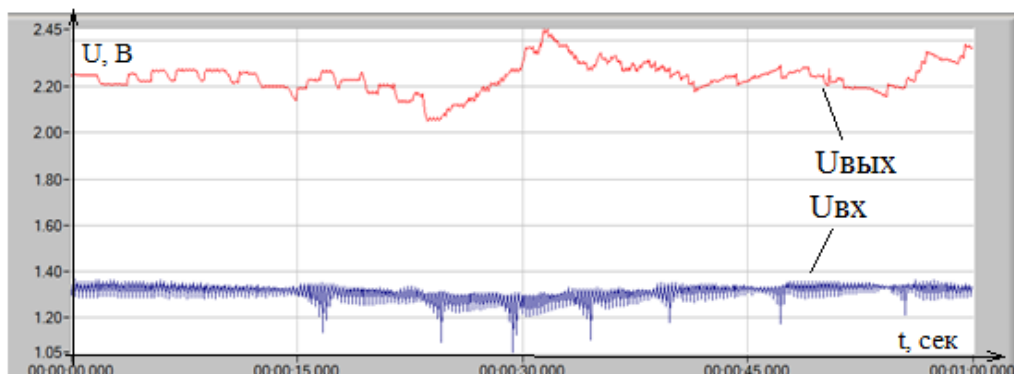


Рисунок 5.2 – Временная диаграмма входного и выходного напряжения ППН

Так как рабочий диапазон измеряемых сигналов модуля АЦП/ЦАП находится в пределах  $\pm 10$  В, а рабочее напряжение ППН выходит за пределы

измерения модуля, были использованы датчики напряжения с коэффициентом 1/13, т.е. модуль АЦП/ЦАП измеряет и регистрирует напряжение в 13 раз ниже, чем реальное напряжение преобразователя.

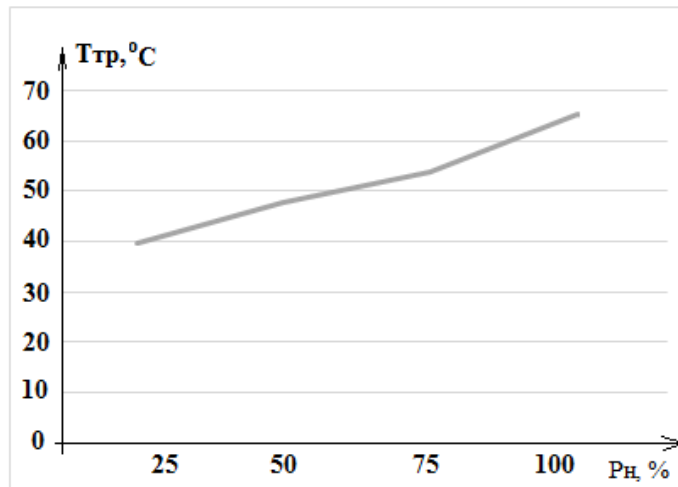


Рисунок 5.3 – Изменение температуры ключевого транзистора в зависимости от изменения нагрузки

Как видно из рисунка 5.3, во всем диапазоне изменения нагрузки температура ключевого транзистора находится в допустимых пределах, что подтверждает правильность подобранных деталей и расчет системы охлаждения. С целью подтверждения достоверности результатов моделирования были проведены сравнения результатов экспериментальных исследований. Для правильного проведения моделирования на экспериментальных стендах методы проведения работ, обработка и сравнения результатов осуществлялись, руководствуясь методикам проведения экспериментов.

Существуют много методик проведения экспериментов, один из которых является метод теории подобия. Согласно этой теории, если пара величин в модели и в оригинале характеризующие процессы, происходящие в системе, имеют одинаковую природу, то в таких случаях имеет место физическое подобие системы.

Для вывода уравнений электрической схемы имитационной и физической модели в относительных значениях воспользуемся последовательностью действий, согласно второй теореме подобия:

1. Выберем базисные величины имитационной и физической модели:  $I_{иб}$ ,  $U_{иб}$ ,  $P_{иб}$  и  $I_{фб}$ ,  $U_{фб}$ ,  $P_{фб}$  связанные друг с другом масштабами подобия:

$$m_I = \frac{I_{иб}}{I_{фб}}; \quad m_U = \frac{U_{иб}}{U_{фб}}; \quad m_P = \frac{P_{иб}}{P_{фб}}.$$

2. Введем относительные величины для имитационной и физической модели:

$$I_{и}^* = \frac{I_{и}}{I_{иб}}; \quad U_{и}^* = \frac{U_{и}}{U_{иб}}; \quad P_{и}^* = \frac{P_{и}}{P_{иб}}.$$

$$I_{ф}^* = \frac{I_{ф}}{I_{фб}}; \quad U_{ф}^* = \frac{U_{ф}}{U_{фб}}; \quad P_{ф}^* = \frac{P_{ф}}{P_{фб}}.$$

3. Выразим именованные величины имитационной и физической модели через относительные и базисные значения:

$$I_{и} = I_{и}^* I_{и\phi}; U_{и} = U_{и}^* U_{и\phi}; P_{и} = P_{и}^* P_{и\phi};$$

$$I_{\phi} = I_{\phi}^* I_{\phi\phi}; U_{\phi} = U_{\phi}^* U_{\phi\phi}; P_{\phi} = P_{\phi}^* P_{\phi\phi}.$$

Так как:

$$m_I = \frac{I_{и}}{I_{\phi}} = \frac{I_{и\phi}}{I_{\phi\phi}}, \text{ то } I_{и}^* = \frac{I_{и}}{I_{\phi\phi}} = \frac{I_{\phi}}{I_{\phi\phi}} = I_{\phi}^*,$$

аналогично  $U_{и}^* = U_{\phi}^*; P_{и}^* = P_{\phi}^*$ .

Для того чтобы иметь возможность корректно сравнить характеристики преобразователей, имитационная модель повышающего преобразователя была собрана аналогично схеме стенда физической модели мощностью аналогичную модели использованную в СУ ЭТС и проведены дополнительные моделирования. На рисунке 5.2 показан модель повышающего ППН в Matlab/Simulink.

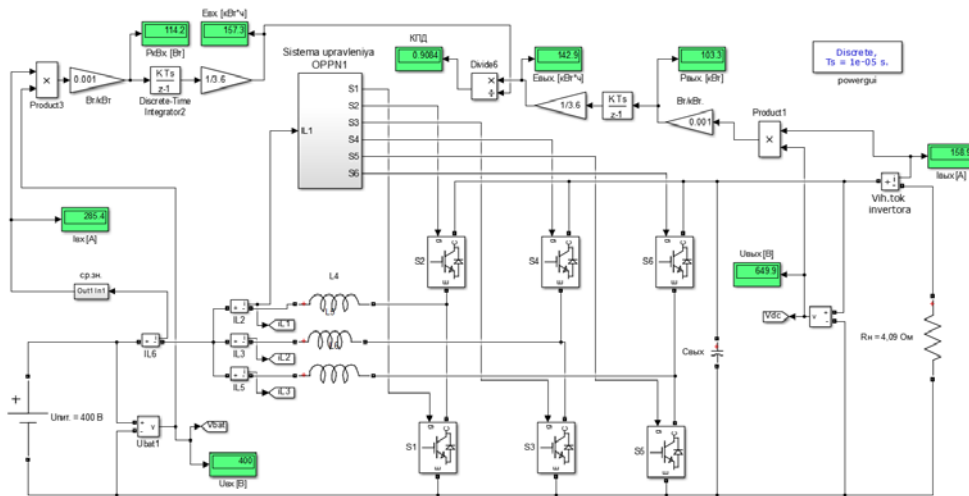


Рисунок 5.2 – Имитационная модель ППН с активной нагрузкой

Для наглядного сравнения результатов физического эксперимента и результатов моделирования, на рисунках 5.7-5.10 показаны зависимости, построенные по экспериментальным данным в относительных единицах.

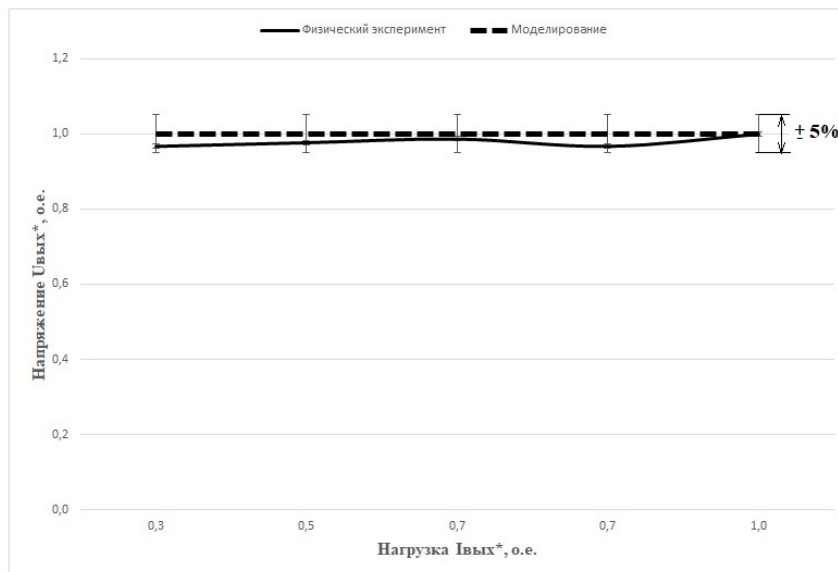


Рисунок 5.7 – Нагрузочная характеристика преобразователя при физическом и имитационном моделировании

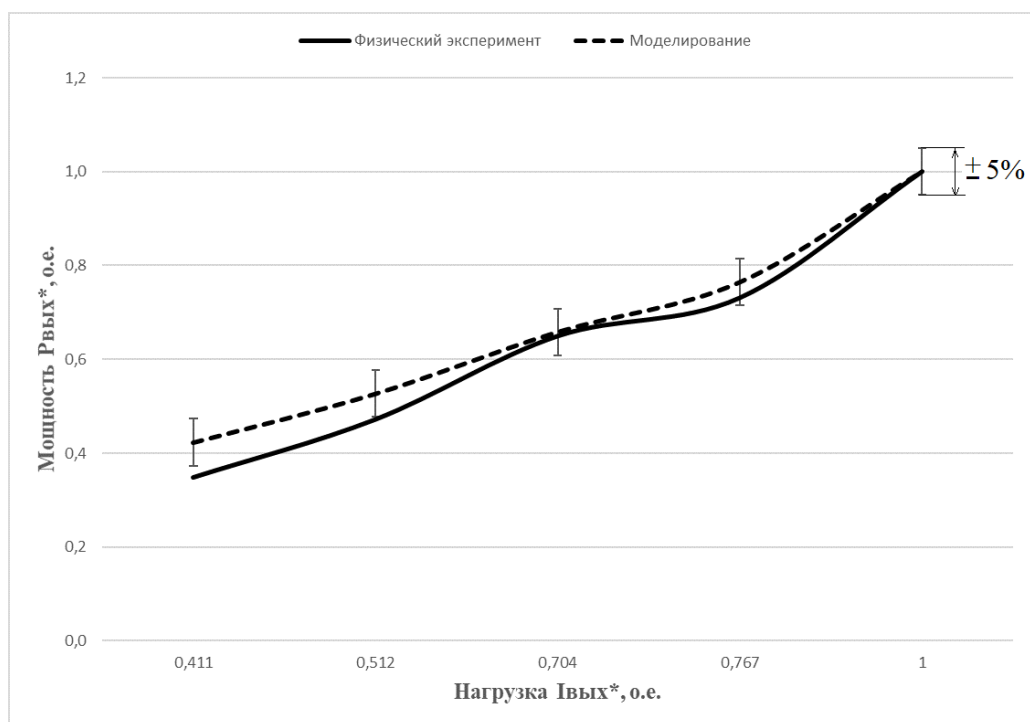


Рисунок 5.8 – Энергетическая характеристика повышающего преобразователя при физическом и имитационном моделировании

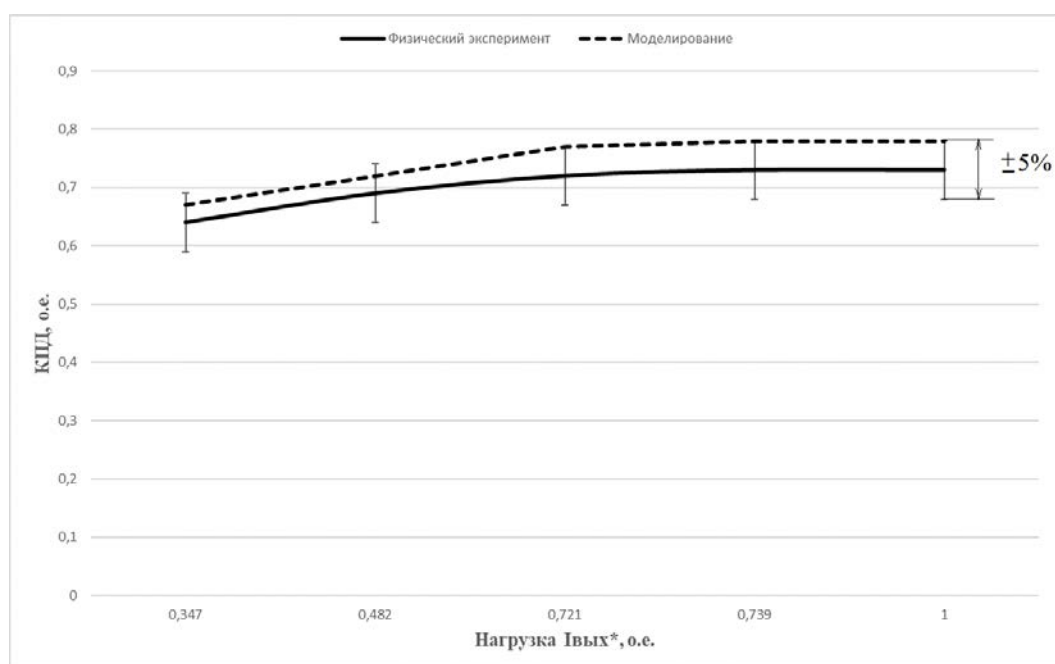


Рисунок 5.9 – Зависимость КПД преобразователя от нагрузки при физическом и имитационном моделировании

Следует отметить, что результаты экспериментального исследования физической модели повышающего преобразователя показали высокую сходимость с результатами имитационного моделирования. Как видно на рисунках 5.7-5.9 нагрузочных и энергетических характеристиках преобразователей, расхождение между физическим и имитационным моделированием в рабочей области практически не выходит за пределы  $\pm 5\%$  области погрешности, показанных на этих рисунках.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих разработок в области импульсных преобразователей постоянного напряжения, транспортного назначения. По результатам анализов было установлено что для ЭП транспортного назначения мощностью более 50 кВт, для повышения напряжения АБ, применение трехканального ППН является более оптимальным решением. Выбор в пользу данного решения обусловлено более высокой эффективностью и большой плотностью мощности что для ЭП с автономным источником энергии имеет большое значение.
2. Разработана методика определения и расчета параметров основных компонентов ОППН транспортного назначения и даны рекомендации по проектированию системы управления многоканальных преобразователей постоянного напряжения, где в основном рассмотрены цифровые методы управления на базе программируемых контроллеров.
3. Разработана комплексная математическая модель тягового электрооборудования ЭТС включающая тяговую аккумуляторную батарею, трехфазного инвертора и синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, а также ОППН интегрированного в силовую цепь для повышения напряжения тягового источника тока. С использованием разработанной модели проведен ряд экспериментов по определению эффективности и целесообразности применения ОППН в состав СУ ЭТС.
4. Результаты анализа проведенных экспериментов показали, что при использовании ЭП с относительно высоким номинальным напряжением в период интенсивных переходных режимов (частое ускорение и торможение) когда токи нагрузки достигают больших значений, КПД системы выше по сравнению с низковольтным электроприводом.
5. Анализ результатов исследования показали, что повышение напряжения с использованием ОППН является одной из эффективных решений задачи оптимизации и улучшения массогабаритных показателей аккумуляторной батареи. Основная причина использования повышающего преобразователя вместо увеличения количества единичных аккумуляторов в пакете АБ состоит в том, что в последнем достаточно сильно усложняется конструкция пакета аккумуляторов. Кроме того, усложняется система мониторинга за состоянием аккумуляторов (BMS) т.к. пакет АБ состоит из сотни единичных накопителей энергии (в случай, когда используется литий-ионный тип АБ цилиндрической формы, их количество в разы больше). Кроме этого с увеличением количества батарей увеличивается его общая стоимость и вес.
6. Проведенные экспериментальные исследования на лабораторном стенде, собранном на базе повышающего преобразователя постоянного напряжения, показали работоспособность, высокую эффективность и стабильность при различных режимах работы ППН. Следует отметить, что результаты экспериментального исследования физической модели повышающего преобразователя показали высокую сходимость с результатами имитационного моделирования. В энергетических характеристиках, расхождение между

физическим и имитационным моделированием в рабочем диапазоне практически не выходит за пределы  $\pm 5\%$  области допустимой погрешности.

7. Полученные результаты диссертационной работы могут быть успешно применены и внедрены при создании полностью электрических автомобилей или конвертации обычных автомобилей в электромобили в части повышения напряжения источника с передачей энергии в прямом и обратном направлении, где вопросы снижения потерь энергии и массогабаритные показатели имеют большое значение.

Рекомендации по итогам исследований. Необходимо отметить что предложенное в данной работе способ улучшения массогабаритных показателей компонентов тягового электрооборудования наиболее целесообразно применить при модернизации уже существующего электромобиля, когда изменение конструкции, существующей АБ и добавление новых элементов затруднена и влечет за собой большие затраты. Также применение данного метода целесообразно, когда электромобиль является малогабаритным и нет возможности размещать АБ большого размера и веса, но необходимо получить источник более высокого и стабилизированного напряжения. Также в грузовых ТС на электрической тяге промышленного назначения, которые эксплуатируются с возможностью дозарядки в процессе эксплуатации или пассажирских ТС с ограниченной емкости АБ, которые заряжаются в конце каждой линии. В данном случаи повышения напряжения с применением ОППН дает возможность использовать двигатели с более широкими скоростными и тяговыми характеристиками.

Перспектива дальнейшей разработки темы. Дальнейшая разработка темы данной диссертационной работы имеет широкое практическое применение при проектировании и внедрении энергоэффективных электроприводов и энергоустановок различного назначения. При дальнейшем усовершенствовании системы управления многоканального преобразователя можно создать адаптивную СУ, которая дает возможность отключать вышедшую из строя определенный канал и обеспечить бесперебойное питание всей системы. Такая перспектива развития значительно увеличивает надежность источника питания и всей системы энергообеспечения.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

### ***Публикации в рецензируемых научных изданиях:***

1. Гулямов, К.Х. Применение преобразователей постоянного напряжения в составе энергетической установки электрического транспортного средства / В.Е. Ютг, В.В. Лохнин, К.М. Сидоров, К.Х. Гулямов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2015. – №4. – С.34-40.
2. Гулямов, К.Х. Экспериментальное исследование режимов работы импульсных преобразователей постоянного напряжения трехфазной структуры при активной

- и активно-индуктивной нагрузках / В.Е. Ютт, Т.В. Голубчик, К.Х. Гулямов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – №5. – С.11-14.
3. Гулямов, К.Х. Повышение мощности импульсных преобразователей постоянного напряжения с использованием многофазных структур / В.Е. Ютт, К.М. Сидоров, К.Х. Гулямов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – №4. – С. 13-16.
  4. Гулямов, К.Х. Преимущества использования повышающих преобразователей постоянного напряжения в составе системы тягового электрооборудования перспективных транспортных средств / К.Х. Гулямов, К.М. Сидоров, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – №5. – С. 7-10.
  5. Гулямов, К.Х. Разработка и исследование повышающего преобразователя постоянного напряжения / К.Х. Гулямов, А.Х. Гуломзода // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – №4. – С.55-61.

#### ***Публикации в других изданиях:***

1. Гулямов, К.Х. Проблемы электробезопасности при эксплуатации электромобилей с высоковольтным источником энергии / К.Х. Гулямов // Международная научно-исследовательская федерация «Общественная наука»: сб. науч. тр. – Екатеринбург, 2017. –Т.2 – С. 17-18.
2. Гулямов, К.Х. Имитационное моделирование обратимого преобразователя постоянного напряжения в составе силового электрооборудования электромобиля в режиме рекуперации / К.Х. Гулямов // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе современных информационно-коммуникационных и энергосберегающих технологий: сб. науч. тр. / ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, – Воронеж, 2016. –№5-4. – С. 46-50.
3. Гулямов К.Х. Эксплуатация электромобилей в условиях Таджикистана / К.Х. Гулямов, А.Х. Гуломзода // Электроэнергетика, гидроэнергетика, надежность и безопасность. сб. науч. тр. / ТТУ им. М.С.Осими, – Душанбе, 2016. – С. 154-157.
4. Гулямов, К.Х. Исследование обратимого преобразователя постоянного напряжения в составе силового электрооборудования электромобиля в среде matlab/simulink / К.Х. Гулямов // Современные проблемы науки, технологий, инновационной деятельности. сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практической конференции, Белгород, 2017. в 4 ч., ч.1, – С. 65-71.

Гулямов Камол Хикматович

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С СИСТЕМОЙ  
МНОГОКАНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

---

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . \_\_\_\_ Заказ № \_\_\_\_\_ Формат 60X90/16  
Усл. печ. л. – 1,5 Тираж 80 экз.

---

УПЦ ГИ РУТ (МИИТ), Москва, 127994, ул. Образцова, дом 9, стр.9.