

Д. В. Ольховатов, А. В. Шевкунова, П. Ю. Коновалов, Д. Е. Притыкин, Я. К. Склифус

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА

Аннотация. Нестабильность выходного напряжения вторичных источников питания электропоездов при значительных колебаниях напряжения в контактной сети приводит к сбоям в работе аппаратуры, отказам и экономическим ущербам от их простоя. В качестве решения предлагается разработка усовершенствованной конструкции управляемого вторичного источника напряжения с системой автоматического регулирования, обеспечивающей стабилизацию выходного напряжения. Для достижения поставленной цели в работе выполнен анализ типовых схем вторичных источников питания, проведен расчет ключевых элементов, таких как разделительный трансформатор, и разработана система управления на основе регулятора напряжения, верифицированная с помощью имитационного моделирования в среде SimInTech. Результаты моделирования подтвердили работоспособность и эффективность разработанной системы управления, продемонстрировав ее способность поддерживать стабильное выходное напряжение при изменении входного.

Ключевые слова: электропоезд, вторичный источник питания, цепи управления, управляемый выпрямитель, стабилизация напряжения, математическое моделирование.

Для цитирования: Моделирование системы стабилизации напряжения вторичного источника питания цепей управления электропоезда / Д. В. Ольховатов, А. В. Шевкунова, П. Ю. Коновалов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 179–187. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_179.

Введение

Стабильное и надежное функционирование систем управления, безопасности и вспомогательного оборудования электропоезда (ЭПС) в значительной степени определяется качеством электроэнергии, предоставляемой бортовыми вторичными источниками питания (ВИП). Данные устройства выполняют критически важную функцию преобразования и стабилизации напряжения, поступающего от контактной сети или собственных силовых установок, для питания низковольтных цепей, таких как микропроцессорные системы управления, комплексные локомотивные системы безопасности, устройства освещения и связи, а также для обеспечения режима подзаряда аккумуляторных батарей (АКБ).

Актуальность исследования обусловлена ужесточением требований к качеству выходного напряжения вторичных источников питания в условиях значительных колебаний уровня напряжения в контактной сети переменного тока. Использование традиционных неуправляемых выпрямителей приводит к прямому переносу этих колебаний на выход источника, что может вызывать сбои в работе чувствительной электронной аппаратуры, снижение надежности ЭПС и, как следствие, привести к существенным экономическим ущербам, связанным с отказами и простоями.

В качестве объекта исследования взят за основу вторичный источник питания цепей управления электропоезда переменного тока.

Рассматриваемая проблема заключается в необходимости обеспечения высокого качества выходного напряжения вторичного источника питания. Основными требованиями являются стабильность этого напряжения и минимальный коэффициент пульсаций. Указанные параметры должны поддерживаться в условиях значительных колебаний входного напряжения, при этом необходимо обеспечить сохранение приемлемых массогабаритных показателей самого устройства.

Целью работы является проектирование конструкции и системы управления вторичного источника питания, способного поддерживать стабильное выходное напряжение в широком диапазоне изменений входного напряжения, что позволит повысить надежность работы систем электропоезда и обеспечить бесперебойный подзаряд аккумуляторной батареи.

Основная часть

Проведем краткий анализ структурных схем вторичных источников питания электровозов.

Рассматриваемый объект можно классифицировать по различным признакам, таким как род входного и выходного напряжения, мощность, количество выходных каналов, метод стабилизации и точность выходных параметров.

Существует несколько типовых структурных схем ВИП, каждая из которых обладает определёнными достоинствами и недостатками [1].

Наиболее простой структурой обладает ВИП, состоящий из выпрямителя и дросселя, выполняющего роль фильтра. Основное достоинство такой схемы – простота конструкции. Существенным недостатком является высокий уровень пульсаций выходного напряжения, который может достигать 100 %, что негативно сказывается на работе подключаемой нагрузки.

Более сложная схема включает в себя неуправляемый выпрямитель, сглаживающий фильтр, преобразователь напряжения и выходной фильтр. Такая конфигурация позволяет обеспечить минимальный коэффициент пульсации на выходе. Однако это достигается за счет усложнения конструкции и увеличения количества элементов [2].

Управляемый преобразователь лишён таких недостатков, как высокий коэффициент пульсации и сложность силовой части. Его ключевой особенностью является возможность регулирования выходного напряжения. Основным недостатком данной схемы считается повышенная сложность системы управления.

Для обеспечения гальванической развязки входных и выходных цепей, а также согласования уровней напряжений, часто применяются схемы ВИП с сетевым трансформатором. В таких схемах стабилизатор напряжения (СН) может быть параметрическим или компенсационного типа (с непрерывным или импульсным регулированием) и дополнительно способствует сглаживанию пульсаций. Недостатком структур со трансформатором промышленной частоты являются значительные масса и габариты.

С целью снижения массогабаритных показателей широкое распространение получили бестрансформаторные схемы или схемы с высокочастотным преобразованием [2]. В так называемых квазибестрансформаторных ВИП согласование напряжений осуществляется с помощью высокочастотного преобразователя, что позволяет уменьшить размеры магнитных компонентов. Недостатком таких схем является трёхкратное преобразование энергии, ведущее к снижению общего КПД.

В структурах с входом и выходом на постоянном напряжении основным узлом выступает высокочастотный преобразователь, который преобразует постоянное входное напряжение в переменное с последующим выпрямлением и фильтрацией. Стабилизация может осуществляться регуляторами, установленными как во входной, так и в выходной цепях.

В случаях, когда не требуется гальваническая развязка и отношение входного и выходного напряжений лежит в допустимом диапазоне, могут применяться ВИП на базе импульсных регуляторов постоянного напряжения (последовательного или параллельного типа) с входными и выходными сглаживающими фильтрами [3].

Для получения выходного переменного напряжения требуемого качества (частоты, числа фаз, формы кривой) используются схемы с автономным инвертором. Выигрыш в массе и габаритах достигается за счёт применения бестрансформаторного выпрямителя на входе и размещения согласующего трансформатора на стороне высокочастотного переменного напряжения.

Современная конструкция ВИП, отвечающая актуальным требованиям, часто включает в себя выпрямитель, инвертор, силовой высокочастотный трансформатор, фильтры, стабилизатор напряжения и аккумуляторную батарею, работающую в буферном режиме.

Такая схема позволяет обеспечить минимальный коэффициент пульсации и непрерывное электроснабжение критичных нагрузок. К её недостаткам относят повышенные массогабаритные показатели, стоимость, а также сложность силовой части и системы управления.

На основе проведенного анализа типовых структурных схем вторичных источников питания (ВИП) можно сделать вывод, что для питания цепей управления электровоза переменного тока наиболее подходящей является схема управляемого выпрямителя с обратной связью. Данный выбор можно аргументировать следующими положениями:

1 Стабильность выходного напряжения. В отличие от неуправляемых выпрямителей, чье выходное напряжение нестабильно при колебаниях в контактной сети, источник с обратной связью активно компенсирует эти колебания, обеспечивая стабильное питание для критичных систем управления и безопасности.

2 Оптимальное соотношение эффективности и сложности. Схема превосходит громоздкие решения с сетевыми трансформаторами по массогабаритным показателям и технически сложные высокочастотные схемы с низким КПД. Такой подход обеспечивает рациональный баланс параметров, соответствующий условиям эксплуатации на ЭПС.

3 Высокоточное регулирование. Использование фазового управления тиристорами на основе сигнала обратной связи реализует принцип компенсационной стабилизации, обеспечивающий более высокую точность поддержания выходного напряжения по сравнению с простыми параметрическими стабилизаторами.

4 Соответствие современным требованиям. Конструкция напрямую отвечает ключевым требованиям к современным ВИП: надежность, минимальный уровень пульсаций и обеспечение бесперебойного питания ответственного оборудования электровоза.

Рассмотрим кратко его устройство. Основные функциональные узлы [4]:

1 Тиристорно-диодный преобразователь. Выполнен по схеме с наложением регулируемого (тиристоры VS1, VS2) и нерегулируемого (диоды VD3-VD5) напряжений. Регулировка выходного напряжения осуществляется фазовым методом путем управления моментом отпирания тириستоров.

2 Система заряда АКБ. Включает тиристорный ключ (VS7), дроссель (L2) и трансформатор тока (T2) для контроля и формирования сигнала обратной связи по току.

3 Система управления. Состоит из регулятора напряжения (РН) и импульсного регулятора тока заряда: – регулятор напряжения (РН) формирует управляющие импульсы для тиристоров VS1, VS2 путем изменения времени разряда конденсаторов в RC-цепях, управляемого сигналом обратной связи по напряжению;

– импульсный регулятор ограничивает ток и напряжение заряда АКБ путем широтно-импульсного регулирования скважности открытия тиристора VS7.

4 Обратный тиристорный ключ (VS8). Обеспечивает автоматическое подключение нагрузок к аккумуляторной батарее при пропадании питающего напряжения.

С целью обеспечения гальванической развязки первичной сети, согласования уровней напряжения питания бортового оборудования электровоза и обеспечения стабильных выходных характеристик источника питания при колебаниях входного напряжения выполним электромагнитный расчет разделительного трансформатора с двумя вторичными обмотками [5].

Конструкция – двухстержневая, с размещением на каждом стержне сетевых полуобмоток и одной вторичной обмотки, между которыми заложена экранирующая обмотка. Магнитопровод выполнен из стали 3413.

Исходные данные для расчета:

- напряжение первичной обмотки: $U_1 = 380 \text{ В}$;
- максимальное входное напряжение: $U_{1\max} = 470 \text{ В}$;
- число вторичных обмоток: $n = 2$;
- напряжение холостого хода вторичной обмотки: $U_{2\text{хх}} = 120 \text{ В}$;
- допустимое отклонение: $\Delta U_{\text{хх}} = 0,5 \text{ В}$;
- номинальный ток вторичной обмотки: $I_{2\text{н}} = 5 \text{ А}$;
- частота питающей сети: $f = 50 \text{ Гц}$;
- активное сечение магнитопровода: $S_a = 0,0038 \text{ м}^2$;
- магнитная индукция: $B_m = 1,5 \text{ Тл}$.

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_1}{U_{2\text{хх}}} = \frac{380}{120} = 3,16.$$

Мощность трансформатора

$$P = n \cdot I_{2\text{н}} \cdot U_{2\text{хх}} = 2 \cdot 5 \cdot 120 = 1200 \text{ Вт}.$$

Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1\text{н}} = \frac{P}{U_1} = \frac{1200}{380} = 3,158 \text{ А},$$

где P – мощность трансформатора;
 U_1 – входное напряжение трансформатора.

Число витков первичной обмотки

$$W_1 = \frac{U_{\text{imax}}}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_a} = \frac{470}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 0,0038} = 371,42,$$

где f – частота питающей сети;
 B_m – магнитная индукция;
 S_a – активное сечение магнитопровода.
 Принимаем $W_1 = 372$ витка.
 Число витков вторичной обмотки

$$W_2 = \frac{W_1}{k} = \frac{371,4}{3,2} = 117,5.$$

Принимаем $W_2 = 118$ витков.
 Сечение провода первичной обмотки

$$S_1 = \frac{I_{1n}}{1,2 \cdot j} = \frac{3,16}{1,2 \cdot 2} = 0,877 \text{ мм}^2,$$

где I_{1n} – номинальный ток первичной обмотки;
 j – плотность тока в обмотках.
 Выбираем провод ПЭВ-2, $S_1 = 0,90 \text{ мм}^2$. Диаметр провода с учетом изоляции $d_1 = 0,78 \times 10^{-3} \text{ м}$.
 Число витков в слое первичной обмотки: 214 витков (2 слоя).
 Число витков в слое вторичной обмотки: 107 витков (2 слоя).
 Суммарная толщина изоляции катушки: 19,825 мм.
 Диаметр катушки: $D_k = 0,139 \text{ м}$.
 Активное сопротивление обмоток (при 115 °C):
 – первичная: $R_{115} = 0,0064 \text{ Ом}$;
 – вторичная: $R_{215} = 0,00536 \text{ Ом}$.

Активные потери в обмотках

$$P_1 = I_{1n}^2 \cdot R_{115} = 3,16^2 \cdot 0,0064 = 0,064 \text{ Вт};$$

$$P_2 = I_{2n}^2 \cdot R_{215} = 5^2 \cdot 0,00536 = 0,134 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери: $\Sigma P = 0,198 \text{ Вт}$.

Средний перегрев обмоток: $\Delta T = 2,16 \text{ °C}$.

Напряжение короткого замыкания: $U_{кз} = 0,197 \text{ В}$.

Качество выходного напряжения оценивается по коэффициенту пульсаций ($K_{\text{ПО}}$).

Без сглаживающего фильтра коэффициент пульсаций выходного напряжения составляет 60 %:

$$K_{\text{ПО}} = \frac{\Delta U}{U_{\text{cp}}} \cdot 100 \% = \frac{30}{50} \cdot 100 \% = 60 \%.$$

Применение LC-фильтра позволяет снизить коэффициент пульсаций до 20 %, что обеспечивает требуемое качество напряжения для питания цепей электровоза

$$K_{\text{ПО}} = \frac{\Delta U}{U_{\text{cp}}} \cdot 100 \% = \frac{10}{50} \cdot 100 \% = 20 \%.$$

Расчет подтверждает, что конструкция трансформатора (число витков, сечение провода, магнитные параметры) обеспечивает минимальное падение напряжения (0,5 В) и потери мощности (0,2 Вт) в рабочем диапазоне нагрузок, что гарантирует стабильную работу источника питания при колебаниях напряжения в контактной сети.

Как известно, проектирование электронной аппаратуры – циклический процесс, включающий разработку схем, управляющих систем, испытания и доработки. Рост сложности устройств, особенно с использованием высоких частот и аналого-цифровых компонентов, увеличивает число циклов из-за сложности аналитического учёта паразитных эффектов [6].

Решением этой многоступенчатой задачи является внедрение сквозного цикла автоматизированного проектирования (САПР), который объединяет моделирование как идеальной схемы, так и реальной конструкции. Среди достаточного множества инструментов моделирования [7–9] можно выделить среду динамического моделирования *SimInTech* ввиду ряда неоспоримых преимуществ [10, 11]:

- обширная библиотека электронных и электромеханических компонентов;
- встроенные средства для ведения проектов и визуализации результатов прямо на схеме;
- уточнённый анализ процессов, включая вклад каждого компонента в общее поведение системы;
- высокая надёжность расчёта переходных процессов;
- инструменты для создания новых моделей компонентов и их графических символов;
- возможно работать с русскоязычным интерфейсом и документацией, что ускоряет освоение и работу.

Все эти возможности реализует моделирование процессов в источнике с применением программы *SimInTech*.

Математическая модель преобразователя приведена на рис. 1.

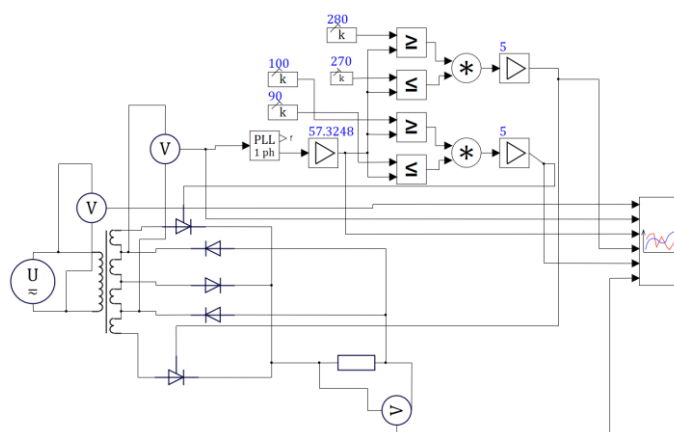


Рис. 1. Схема модели источника питания

В схеме проведено имитационное моделирование части источника, которая включает в себя следующие элементы: источник переменного напряжения, имитирующий напряжение в сети; разделительный трансформатор, обеспечивающий гальваническую развязку сети и цепей источника питания; плечо неуправляемого, диодного выпрямителя; тиристор, обеспечивающий управляемое напряжение; формирователь импульсов управления, для открытия тиристора, которые приходят с импульсного трансформатора регулятора напряжения; терминатор линии (сохраняет целостность цепи), ставится в том случае, если сигнал не используется; цепь нагрузки, отслеживающая уровень напряжения сети; формирователь графиков (все результаты моделирования заносятся в этот блок и формируются в виде графиков внутри блока).

Блок *PLL* реализует модель устройства фазовой автоподстройки частоты для однофазного сигнала. Структура модели устройства фазовой автоподстройки частоты для однофазного сигнала показана на рис. 2.

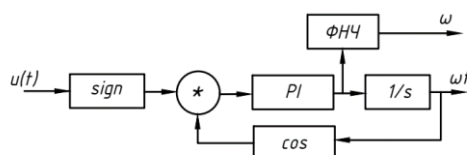


Рис. 2. Структура устройства ФАПЧ для однофазного сигнала

Блок служит для определения функции угла (ωt) синусоидального сигнала, который используется, например, в блоке ЭЦД – генератор импульсов (однофазный, двухпульсный). Угол изменяется в диапазоне от 0 до 2π , причем значение 0 соответствует началу положительной полуволны входного сигнала.

Сигнал после пи-регулятора (PI) представляет собой частоту входного сигнала, а после интегрирования угол. На первом периоде входного сигнала значение угла (ωt) может не соответствовать реальным значениям.

Рассмотрим более подробно процессы, происходящие в источнике питания и регуляторе напряжения, на примере выходных осциллограмм, полученных с помощью вывода данных *SimInTech*.

На рис. 3–5 представлены графики переходных процессов, протекающих в моделях. На графиках приняты следующие обозначения: U_1 – напряжение первичной обмотки трансформатора, U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора, угол – функция (ωt) синусоидального сигнала вторичной обмотки трансформатора, $T1$ и $T2$ – сигналы, подаваемые на управляющий электрод тиристоров $T1$ и $T2$ для их отпирания, U_n – напряжение на нагрузке.

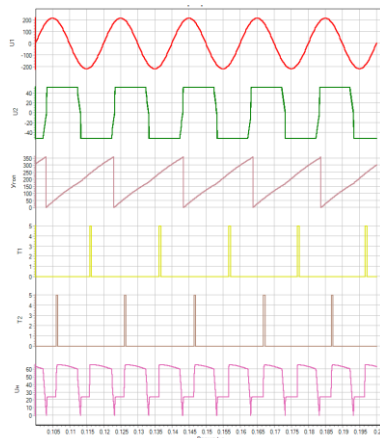


Рис. 3. Характеристики источника питания при углах регулирования 60° и 240°

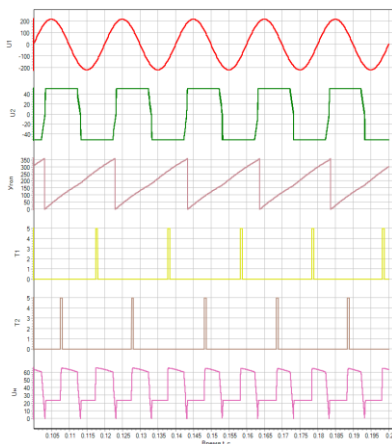


Рис. 4. Характеристики источника питания при углах регулирования 90° и 270°

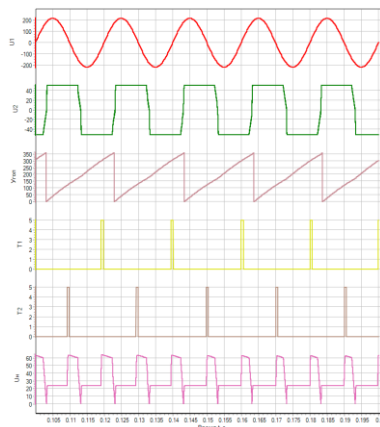


Рис. 5. Характеристики источника питания при углах регулирования 120° и 300°

Проведем анализ зависимости выходного напряжения при рассматриваемых углах регулирования.

При углах 60° и 240° (см. рис. 3) тиристоры открываются с умеренной задержкой относительно начала полуволны напряжения. Нагрузка получает значительную часть полуволны напряжения, что обеспечивает относительно высокое среднее значение U_n . Форма выходного напряжения демонстрирует характерные «срезы» в начале каждой полуволны, соответствующие задержке открытия тириستоров.

При углах 90° и 270° (см. рис. 4) задержка открытия тиристоров увеличивается, что приводит к сокращению времени проводимости каждого тиристора. Среднее значение напряжения на нагрузке снижается по сравнению с предыдущим случаем (см. рис. 3). Форма напряжения становится более «обрезанной», что визуально отражает уменьшение площади под кривые напряжения.

При углах 120° и 300° (см. рис. 5) тиристоры открываются ещё позже, ближе к концу полуволны. Время проводимости минимально среди двух рассмотренных случаев, что приводит к дальнейшему снижению среднего выходного напряжения. Напряжение на нагрузке принимает форму коротких импульсов, следующих за каждым пиком полуволны.

Выводы

Проведённое имитационное моделирование подтвердило адекватность математической модели работы управляемого выпрямителя, реализующего функцию источника вторичного питания. Увеличение угла регулирования приводит к сокращению длительности открытого состояния тиристоров и, как следствие, к снижению среднего напряжения на нагрузке, что полностью соответствует теоретическим основам электроники и подтверждает практическую применимость модели для проектирования и анализа источников вторичного питания.

Использование программы *SimInTech* позволило провести визуализацию и анализ переходных процессов системы, что особенно важно при проектировании схем, где взаимодействие элементов может существенно влиять на работу устройства.

Таким образом, модель может быть использована для дальнейшего проведения испытаний при различных внешних воздействиях, анализа устойчивости и оптимизации системы управления.

Список литературы

- 1 **Иксар, Е. В.** Повышение энергоэффективности источников вторичного питания в схеме управления тяговым приводом электроподвижного состава / Е. В. Иксар // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 17–18 октября 2024 года. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2024. – С. 373–379.
- 2 **Самойлов, А. Г.** Устройства электропитания : учебное пособие / А. Г. Самойлов, С. А. Самойлов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 160 с. – ISBN 978-5-9984-1183-0.
- 3 **Милютин, В. С.** Источники питания для сварки / В. С. Милютин, М. П. Шалимов, С. М. Шанчуров. – Москва : Айрис-пресс, 2007. – 384 с. – ISBN 978-5-8112-2741-9.
- 4 **Электровоз ЭП1М (ЭП1П).** Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы. ИДМБ.661142–01РЭ1. – ОАО «ВЭЛНИИ», 2006. – 1306 с.
- 5 **Ермолин, Н. П.** Расчет трансформаторов малой мощности / Н. П. Ермолин. – Москва : Энергия, Ленинград, 1969. – 192 с.
- 6 **Худяков, В. Ф.** Моделирование источников вторичного электропитания в среде MATLAB 7.x : учебное пособие / В. Ф. Худяков, В. А. Хабужов. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2008. – 332 с.

References

- 1 **Iksar, E. V.** Increasing the energy efficiency of secondary power sources in the control circuit of the traction drive of electric rolling stock / E. V. Iksar // Innovative Technologies in Water, Utilities and Water Transport : proceedings of the International scientific and technical conference, Minsk, October 17–18, 2024. – Minsk : Belarusian National Technical University, 2024. – P. 373–379.
- 2 **Samoylov, A. G.** Power supply devices : textbook / A. G. Samoylov, S. A. Samoylov ; Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs. – Vladimir : VLSU Publishing House, 2021. – 160 p. – ISBN 978-5-9984-1183-0.
- 3 **Milyutin, V. S.** Power sources for welding / V. S. Milyutin, M. P. Shalimov, S. M. Shanchurov. – Moscow : Iris-press, 2007. – 384 p. – ISBN 978-5-8112-2741-9.
- 4 **Electric locomotive EP1M (EP1P).** Operation manual. Book 1. Description and operation. Electrical circuits. IDMB.661142–01RE1. – JSC “VEINII”, 2006. – 1306 p.
- 5 **Ermolin, N. P.** Calculation of Low-Power Transformers / N. P. Ermolin. – Moscow : Energiya, Leningrad, 1969. – 192 p.
- 6 **Khudyakov, V. F.** Modeling of secondary power sources in the MATLAB 7.x environment : a textbook / V. F. Khudyakov, V. A. Khabuzov. – Saint-Petersburg : GUAP, 2008. – 332 p.

7 Моделирование объёмных характеристик области нагрева контактного провода подвижной электрической дугой и их вычисление в среде MathCAD / И. А. Кондрашов, Ю. Г. Семенов, А. Д. Цой, Д. А. Кецакло // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 140–148. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_140.

8 **Сироткин, В. В.** Эффективное использование энергии рекуперации в тяговой сети электропитания / В. В. Сироткин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (94). – С. 100–109. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_100.

9 **Шевкунова, А. В.** Моделирование работы тиристорного выпрямителя / А. В. Шевкунова, Д. В. Ольховатов // Молодежь и наука : актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 307–311.

10 **Ольховатов, Д. В.** Разработка энергоэффективного асинхронного электропривода мотор-вентилятора электровоза / Д. В. Ольховатов, А. В. Шевкунова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (59). – С. 46–55. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-3-46-55.

11 **Зарифьян, А. А.** Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (83). – С. 81–89. – DOI 10.46973/0201727X_2021_3_81.

7 Modeling the volumetric characteristics of the contact wire heating area by a moving electric arc and their calculation in the MathCAD environment / I. A. Kondrashov, Yu. G. Semenov, A. D. Tsoy, D. A. Ketskalo // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 140–148. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_140.

8 **Sirotkin, V. V.** Efficient use of regeneration energy in a traction power supply network / V. V. Sirotkin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 2 (94). – P. 100–109. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_100.

9 **Shevkunova, A. V.** Modeling of a thyristor rectifier operation / A. V. Shevkunova, D. V. Olkhovатов // Youth and science : actual problems of fundamental and applied research : materials of the VIII All-Russian national scientific conference of young scientists, Komsomolsk-on-Amur, April 07–11, 2025. – Komsomolsk-on-Amur : Komsomolsk-on-Amur State University, 2025. – P. 307–311.

10 **Olkhovатов, D. V.** Development of an energy-efficient asynchronous motor drive for an electric locomotive motor-fan / D. V. Olkhovатов, A. V. Shevkunova // Vestnik of the Ural State University of Railway Transport. – 2023. – No. 3 (59). – P. 46–55. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-3-46-55.

11 **Zarifyan, A. A.** Study of electromechanical processes in a commutator traction motor taking into account losses / A. A. Zarifyan, A. Sh. Mustafin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2021. – No. 3 (83). – P. 81–89. – DOI 10.46973/0201727X_2021_3_81.

D. V. Olkhovатов, A. V. Shevkunova, P. Yu. Konovalov, D. E. Pritykin, Ya. K. Sklifus

MODELING OF THE VOLTAGE STABILIZATION SYSTEM FOR THE SECONDARY POWER SUPPLY OF ELECTRIC LOCOMOTIVE CONTROL CIRCUITS

Abstract. Instability of the output voltage of electric locomotive secondary power supplies during significant voltage fluctuations in the overhead contact line leads to malfunctions of equipment, failures, and economic losses from their downtime. As a solution, the development of an improved design of a controlled secondary voltage source with an automatic regulation system that ensures output voltage stabilization is proposed. To achieve this goal, the work involved an analysis of typical secondary power supply circuits, a calculation of key elements such as an isolation transformer, and the development of a control system based on a voltage regulator, verified through simulation modeling in the SimInTech environment. The simulation results confirmed the operability and effectiveness of the developed control system, demonstrating its ability to maintain a stable output voltage during input voltage changes.

Keywords: electric locomotive, secondary power supply, control circuits, controlled rectifier, voltage stabilization, mathematical modeling.

For citation: Modeling of the voltage stabilization system for the secondary power supply of electric locomotive control circuits / D. V. Olkhovaton, A. V. Shevkunova, P. Yu. Kononov [et. al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 179–187. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_4_179.

Сведения об авторах

Ольховатов Дмитрий Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Dmolkh@yandex.ru

Шевкунова Анастасия Владимировна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: nastya3051990@mail.ru

Коновалов Павел Юрьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: pk_zao@dek.rgups.ru

Притыкин Дмитрий Евгеньевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
Центр развития инновационных компетенций,
кандидат технических наук, доцент,
директор,
e-mail: pde_crik@rgups.ru

Склифус Ярослав Константинович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
Центр дизайна, проектирования и моделирования,
кандидат технических наук, доцент,
начальник центра,
e-mail: Yaroslav.sklifus@mail.ru

Information about the authors

Olkhovaton Dmitry Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Dmolkh@yandex.ru

Shevkunova Anastasiya Vladimirovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: nastya3051990@mail.ru

Kononov Pavel Yurievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: pk_zao@dek.rgups.ru

Pritykin Dmitry Evgenievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Center for the Development of Innovative Competencies,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Director,
e-mail: pde_crik@rgups.ru

Sklifus Yaroslav Konstantinovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Center for Design, Engineering and Modeling,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Center,
e-mail: Yaroslav.sklifus@mail.ru