

На правах рукописи



Тарасовский Тимофей Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКТИВНЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Аржанников Борис Алексеевич

Официальные оппоненты:

Бурков Анатолий Трофимович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), кафедра «Электроснабжение железных дорог», профессор;

Гаранин Максим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СамГУПС), и.о. ректора.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ДВГУПС)

Защита состоится «25» февраля 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 44.2.008.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, ауд. Б2-15, зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан «27» декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Направление совершенствования электрифицированного железнодорожного транспорта в Российской Федерации определено стратегией развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2030 года и стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации, которые предусматривают повышение провозной способности за счет повышения весовых норм поездов путем введения на электрифицированных участках грузовых тяжеловесных поездов массой 7100 т.

С увеличением весовых норм поездов увеличивается и потребляемая электровозами мощность, которую существующая система тягового электроснабжения не всегда способна обеспечить. На таких участках наблюдается падение напряжения на токоприемнике электровоза ниже минимального допустимого уровня 2,7 кВ, что приводит к снижению скорости движения поезда, а значит и пропускной способности участка.

Повышение мощности, подводимой к подвижному составу, возможно за счет использования системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН). Система обеспечивает стабилизацию выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата в диапазоне 3,5-3,7 кВ с помощью реакторных устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).

К недостаткам системы БАРН следует отнести значительные массо-габаритные показатели реакторных устройств регулирования напряжения, обусловленные использованием электротехнических стали и меди; увеличение потерь электрической энергии; снижение коэффициента мощности преобразовательного агрегата и высокая стоимость системы.

Современное развитие полупроводниковых приборов, обладающих высокой эффективностью, надежностью и быстродействием, делает возможным их применение в переключающих устройствах РПН. Совершенствование системы БАРН, путем применения в переключающем устройстве полупроводниковых (тиристоров) и индуктивных (неуправляемого реактора) приборов, позволит повысить энергетические, экономические и уменьшить массо-габаритные показатели, что является актуальной задачей диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования. Исследования в области совершенствования системы тягового электроснабжения занимаются такие организации, как АО «ВНИИЖТ», ДВГУПС, ИрГУПС, ОмГУПС, ПГУПС, РГУПС, РУТ (МИИТ), СамГУПС, УрГУПС и др.

Исследованиями в области устройств РПН занимаются такие организации, как АО «ВНИИЖТ», УрГУПС, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, АО «Уралэлектротяжмаш» (Россия), Siemens (Германия), ABB (Швейцария), *Maschinenfabrik Reinhausen* (Германия), *Hyundai Heavy Industries* (Южная Корея).

Совершенствование системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения с использованием индуктивных и полупроводниковых приборов связано с трудами российских и зарубежных ученых:

– усиление системы тягового электроснабжения постоянного тока: Б. А. Аржанников, М. П. Бадёр, А. Т. Бурков, М. А. Гаранин, К. Г. Марквардт, А. Н. Марикин, Р. И. Мирошниченко, Т. П. Третьяк, В. Т. Черемисин, Careglio Giuseppe, Mayer Lucio, Миура Адзуки;

– контакторные устройства РПН: А. М. Голунов, А. Л. Мазур, Г. М. Михеев, Л. М. Пестряева, В. В. Порудоминский, А. А. Пышкин, Я. Л. Фишлер, И. А. Якобсон, *Ande F, Heinz R*;

– реакторные устройства РПН: М. И. Клейнерман, Р. Н. Урманов, Б. А. Аржанников, Я. Л. Фишлер;

– тиристорные устройства РПН: Б. Ю. Алтунин, Б. А. Аржанников, А. А. Асабин, И. М. Туманов, А. И. Чивенков, *Guth G, Schaffer, J*.

Тема диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки): пункты 1 и 4.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является совершенствование системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения БАРН преобразовательного агрегата посредством применения в исполнительном регулируемом устройстве индуктивных и полупроводниковых приборов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Выполнить анализ способов усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока, а также устройств и систем регулирования напряжения под нагрузкой силовых трансформаторов с целью определения направления совершенствования системы БАРН.

2. Разработать теоретические положения, описывающие работу трансформатора с подключенным к нему тиристорно-реакторным переключающим устройством (ТРПУ) и на основании которых определить особенности расчета параметров основных элементов разрабатываемого переключателя.

3. Определить наиболее приемлемую для тяговой нагрузки систему автоматического регулирования для управления ТРПУ в составе системы БАРН.

4. Разработать методику определения рационального числа срабатываний ТРПУ в ступенчатой системе БАРН, которая бы обеспечивала наилучшее качество выпрямленного напряжения при наименьшем числе срабатываний переключателя.

5. Произвести моделирование работы системы тягового электроснабжения постоянного тока с регулированием напряжения системой БАРН с различными вариантами переключающих устройств.

Объект исследования – устройства электроснабжения, специальные электротехнические установки и системы управления ими.

Область исследования – совершенствование подвижного состава, тяговых подстанций, тяговых сетей, включая преобразователи, аппараты, устройства защиты, схемы электроснабжения. Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава и устройств электроснабжения.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Сформулированы теоретические положения, описывающие электромагнитные процессы в трансформаторе и преобразовательном агрегате с ТРПУ с учетом режимов работы переключателя.

2. Разработана методика расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ с учетом показателей энергетической эффективности преобразовательного агрегата.

3. Разработаны два варианта реализации релейной системы автоматического регулирования с амплитудной модуляцией, обеспечивающие плавное (один вариант) регулирование выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата и ступенчатое (второй вариант) с методикой определения рационального числа срабатываний ТРПУ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработанные теоретические положения, описывающие работу трансформатора с ТРПУ, а также результаты моделирования работы системы тягового электроснабжения подтверждают снижение потерь электрической энергии на тяговых подстанциях с системой БАРН при замене реакторного устройства РПН на тиристорно-реакторное.

2. Совершенствование системы БАРН за счет замены управляемого индуктивного на полупроводниковые приборы позволило повысить качество потребляемой преобразовательным агрегатом электрической энергии.

3. На основании проведенного расчета параметров основных элементов ТРПУ в составе преобразовательного агрегата с трансформатором ТРСНП-12500/10 определено снижение массо-габаритных показателей устройства РПН и стоимости системы БАРН при замене реакторного переключающего устройства на тиристорно-реакторное.

4. Практическая значимость подтверждается получением патента на полезную модель и актом внедрения результатов научно-исследовательской работы.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории систем автоматического регулирования, теории тягового электропитания, теории электротехники и основы математического моделирования. При математическом моделировании использовались система динамического моделирования *Matlab Simulink* и программный комплекс расчетов тягового электропитания КОРТЭС. Для проведения расчетов и анализа математических зависимостей применялись программные продукты *Microsoft Excel* и *Mathcad*.

Экспериментальная часть заключается в разработке лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ с преобразовательным трансформатором мощностью 30 кВА, с линейным первичным напряжением 380 В и имитационной модели, характеристики преобразовательного трансформатора которой соответствуют трансформатору ТРСНП-12500/10, с целью проведения оценки достоверности аналитических расчетов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические положения, описывающие работу трансформатора с ТРПУ и методика расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора. Особенности и результаты расчета основных параметров тиристорных и неуправляемого реактора разрабатываемого устройства РПН в составе преобразовательного агрегата с трансформатором ТРСНП-12500/10.

2. Функциональная схема замкнутой системы автоматического регулирования напряжения с ТРПУ с амплитудной модуляцией, фиксирующей величину и время отклонения напряжения от заданного значения, и два варианта ее реализации, которые обеспечивают плавное и ступенчатое регулирование выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата.

3. Методика определения рационального числа переключений ТРПУ в ступенчатой системе БАРН с результатами полученных зависимостей числа срабатываний устройства РПН и среднеквадратичного отклонения регулируемого напряжения от величины зоны нечувствительности и выдержки времени срабатывания переключателя.

4. Результаты моделирования работы системы тягового электропитания постоянного тока с регулированием напряжения системой БАРН с различными вариантами переключающих устройств, и результаты расчета экономической эффективности использования системы БАРН с ТРПУ.

Степень достоверности результатов. Погрешность результатов аналитических расчетов и результатов экспериментальных исследований, проведенных на имитационной и лабораторной физической моделях преобразовательного агрегата с ТРПУ, составляет не более 5 %. Достоверность результатов также подтверждается актом внедрения Форатек Энерготрансстрой.

Апробация результатов исследования.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах, семинарах: Всероссийская конференция «Техника и технологии наземного транспорта» (г. Екатеринбург, 2017, 2018 г.); Международный симпозиум «Элтранс» (г. Санкт-Петербург, 2017 г., 2019 г.); Международная научно-техническая конференция «Интеграция образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего и профессионального образования» (г. Екатеринбург, 2017 г.); X Международная научно-практическая конференция «Будущее транспорта России – 2018» (г. Екатеринбург, 2018 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Наука и образование транспорту» (г. Екатеринбург, 2018 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Инновации и новые технологические разработки для системы тягового электроснабжения» (г. Екатеринбург, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (г. Омск, 2018 г.); Научный семинар аспирантов УрГУПС (г. Екатеринбург, 2016, 2017, 2018, 2019 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта» (г. Екатеринбург, 2019 г.); Международная научная конференция «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (г. Хабаровск, 2019 г.); конкурс проектов ОАО «РЖД» - «Новое звено» - 2019; Всероссийская научно-техническая конференция «Транспорт Урала – 2020», (г. Екатеринбург, 2020 г.).

Результаты диссертационной работы в полном объеме заслушаны и одобрены на расширенном заседании кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС (г. Екатеринбург, 2021 г.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы отражены в 9 печатных работах, в том числе 2 статьи опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций» и 2 в изданиях, входящих в международную систему цитирования *Scopus*.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 175 страницах, содержит 161 страницу основного текста, 62 рисунка, 15 таблиц и 6 приложений на 14 страницах, 136 наименований библиографического списка, включая 14 наименований иностранных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы исследования, степень её разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, практическая значимость работы, методы исследования, выносимые на защиту положения, а также степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе произведен обзор существующих способов усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока, а также устройств и систем регулирования напряжения трансформаторов.

Определено, что наиболее энергоэффективным способом усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ является регулирование напряжения, в том числе за счет изменения коэффициента трансформации преобразовательного трансформатора с помощью устройств РПН.

Для системы тягового электроснабжения с 20 %-ным и 14 %-ным диапазонами регулирования напряжения, рассмотрены варианты применения ступенчатых контакторных и бесконтактных тиристорных устройств РПН, а также материалы использования регулируемых и нерегулируемых активно-индуктивных устройств (реакторов) для плавного регулирования напряжения. В зависимости от технической реализации разработана систематизация устройств регулирования напряжения.

На основании проведенного анализа определены достоинства и недостатки рассматриваемых типов переключателей и с целью повышения их технико-энергетических показателей определено, что перспективным направлением совершенствования является совместное использование в устройстве РПН индуктивных и полупроводниковых приборов.

Вторая глава посвящена разработке функциональной схемы системы БАРН с ТРПУ преобразовательного агрегата (рисунок 1), формированию основных соотношений трансформатора с рассматриваемым переключателем и определению основных параметров неуправляемого реактора и тиристорных ТРПУ.

Разрабатываемая система БАРН с ТРПУ состоит из: преобразовательного агрегата ПА с преобразовательным трансформатором ПТ и выпрями-

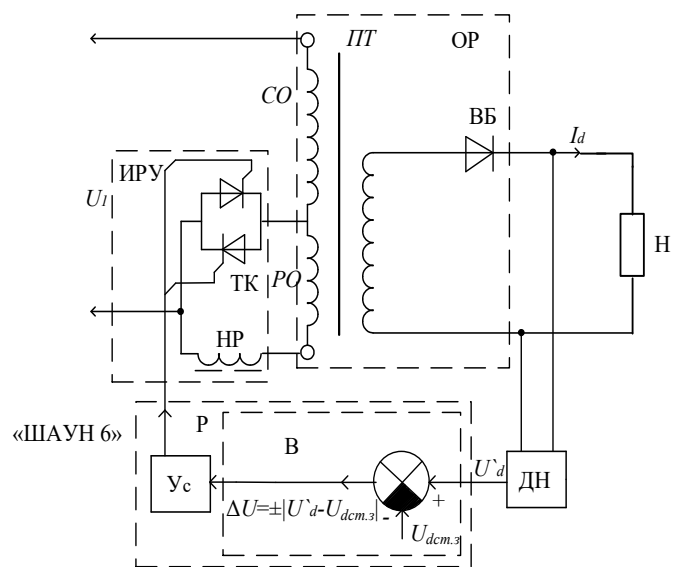


Рисунок 1 – Функциональная схема системы БАРН с ТРПУ преобразовательного агрегата

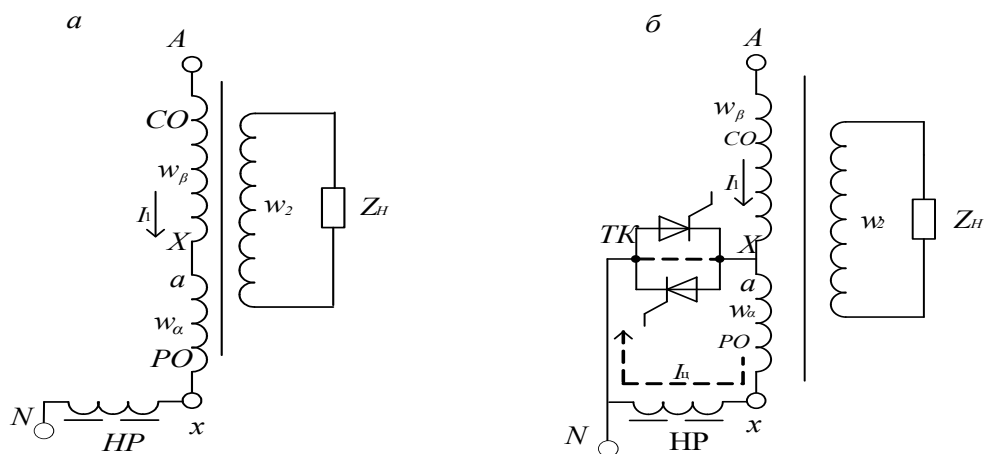
тельным блоком ВБ (объект регулирования ОР); исполнительного регулируемого тиристорно-реакторного переключающего устройства (ИРУ); шкафа автоматического управления напряжением «ШАУН 6» (регулятор Р); датчика напряжения (ДН) для обратной связи в системе автоматического регулирования напряжения.

Регулятор Р в зависимости от величины и знака ΔU – отклонения измеренного ДН преобразовательного агрегата U'_d от задающего напряжения $U_{дст.з}$, формирует сигнал управления и, через усилитель Ус, подает его на тиристорный ключ ИРУ, чем обеспечивает ступенчатое бесконтактное изменение выпрямленного напряжения в пределах регулировочной зоны.

Разработаны теоретические положения, описывающие работу трансформатора с исполнительным регулируемым устройством (рисунок 2).

В режиме с закрытым тиристорными ключами ТК (рисунок 2, а) первичный ток I_1 , пренебрегая незначительным током через закрытый ключ ТК, практически полностью протекает по включенным последовательно сетевой СО, регулировочной РО обмоткам и по неуправляемому реактору НР (формула 1), где $R_1 = R_\beta + R_\alpha$, $X_1 = X_\beta + X_\alpha$ – активные и индуктивные сопротивления сетевой w_β и регулировочной w_α обмоток с суммарным числом витков первичной обмотки $w_1 = w_\beta + w_\alpha$, Ом; I_0 – ток холостого хода, А; E_1 – действующие значения суммы ЭДС обмоток w_α и w_β , В; E_2 – действующее значение ЭДС обмотки w_2 , В; $R_{НР}, X_{НР}$ – активное и индуктивное сопротивления неуправляемого реактора НР, Ом.

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_\alpha + R_\beta) + j(X_\alpha + X_\beta) \dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - jX_2 \dot{I}_2; \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_\beta + w_\alpha}, \\ \dot{U}_{НР} = \dot{I}_1 R_{НР} + jX_{НР} \dot{I}_1, \end{cases} \quad (1)$$



а – при закрытом тиристорном ключе ТК;
б – при открытом тиристорном ключе ТК

Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема одной фазы трехфазного трансформатора с ТРПУ

В режиме открытого состояния ТК (рисунок 2, б) напряжение U_1 приложено к обмотке w_β . Включается в работу регулировочная обмотка РО, в контуре которой с открытым ТК и неуправляемым реактором НР протекает циркулирующий ток I_Π , который увеличивает намагничивающий ток I_0 трансформатора (формула 2).

где E_α – ЭДС регулировочной обмотки, В;

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_\beta + \dot{I}_1 Z_\beta + \dot{I}_1 R_{ТК} = -\dot{E}_\beta + \dot{I}_1 R_\beta + jX_\beta \dot{I}_1 + \dot{I}_1 R_{ТК}; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - jX_2 \dot{I}_2; \\ \dot{U}_{НР} = \dot{E}_\alpha - \dot{I}_\Pi Z_\alpha - \dot{I}_\Pi R_{ТК} = \dot{E}_\alpha - \dot{I}_\Pi R_\alpha - jX_\alpha \dot{I}_\Pi - \dot{I}_\Pi R_{ТК}; \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_\Pi, \end{cases} \quad (2)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_2 \frac{1}{K_\beta} = \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_\beta}; \quad \dot{I}_\Pi = \frac{w_\alpha^2 U_1}{w_\beta^2 (X_\alpha + X_{НР} + R_{ТК})};$$

В зависимости от состояния тиристорных ключей ТК ТРПУ, определены четыре режима работы переключателя:

1) Два симметричных (тиристорные ключи ТК открыты или закрыты во всех фазах). Тогда выпрямленное напряжения холостого хода преобразовательного агрегата с ТРПУ определяется по формуле:

$$U_{d0} = \frac{K_g}{K_\beta} \left\{ U_1 - \left[\frac{K_1}{K_\beta} I_0 + \frac{K_\alpha^2 U_1}{K_\beta^2 (X_\alpha + X_{НР} + R_{ТК})} \right] \cdot [X_\beta + \rho (X_\alpha + X_{НР})] \right\}, \quad (3)$$

где $K_1 = \frac{w_\beta + w_\alpha}{w_2} = K_\beta + K_\alpha$; $\rho = \frac{R_{ТК}}{X_\alpha + X_{НР} + R_{ТК}}$; K_g – коэффициент выпрямления.

2) Два несимметричных режима (когда тиристорный ключ ТК открыт только в одной фазе (любой) или открыты ключи ТК одновременно в двух фазах (любых)). Тогда выпрямленное напряжения холостого хода преобразовательного агрегата с ТРПУ определяется по формуле:

$$U_{d0} = \frac{(N_{ОТК} U_{d0_{МАКС}} + N_{ЗАКР} U_{d0_{МИН}})}{3}, \quad (4)$$

где $N_{ОТК}, N_{ЗАКР}$ – число открытых и закрытых тиристорных ключей ТК в ТРПУ соответственно; $U_{d0_{МАКС}}, U_{d0_{МИН}}$ – среднее значение выпрямленного напряжения холостого хода преобразовательного агрегата в режиме работы ТРПУ с открытыми и закрытыми тиристорными ключами ТК соответственно, В.

Исходя из рассмотренных режимов работы ТРПУ определено, что неуправляемый реактор влияет на энергетические показатели преобразовательного агрегата. В связи с чем, разработана методика расчета рационального сопротивления

неуправляемого реактора ТРПУ, где за критерий рациональности приняты энергетические показатели агрегата (коэффициент мощности μ или коэффициент полезного действия η) и которая включает в себя три этапа:

1 этап: расчет внешних естественных характеристик преобразовательного агрегата $U_{di} = f(I_d)$ симметричных режимов работы ТРПУ, при различных сопротивлениях неуправляемого реактора.

2 этап: расчет внешних естественных характеристик преобразовательного агрегата $U_{di} = f(I_d)$ в несимметричных режимах работы ТРПУ и соответствующих им значений косинуса угла между основной гармоникой сетевого тока и напряжением $\cos \varphi_{1(1)}$ или η при различных сопротивлениях реактора.

3 этап: расчет средних, по току нагрузки, значений $\cos \varphi_{1(1)CP}$ (формула 5) или η_{CP} (формула 6) для каждого значения сопротивления неуправляемого реактора и графическое представление результатов расчетов с дальнейшим определением рационального значения сопротивления исходя из наибольших значений энергетических показателей агрегата в рассматриваемых режимах работы ТРПУ.

$$\cos \varphi_{1(1)CP} = \frac{\sum_{i=I_{d.3}}^{I_{dH}} \cos \varphi_{1(1)i}}{INT \left(\frac{I_{dH} - I_{d.3}}{\Delta I_d} \right) + 1}, \quad (5)$$

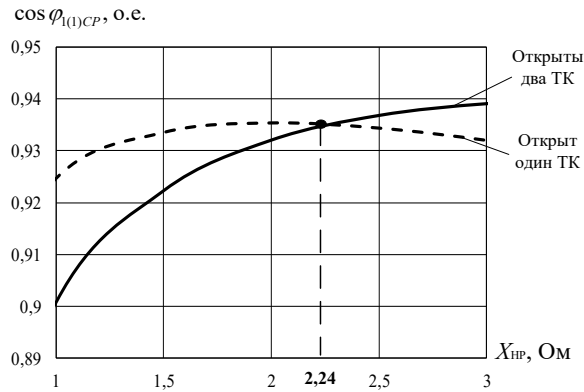
$$\eta_{CP} = \frac{\sum_{i=I_{d.3}}^{I_{dH}} \eta_i}{INT \left(\frac{I_{dH} - I_{d.3}}{\Delta I_d} \right) + 1}. \quad (6)$$

где ΔI_d – шаг изменения выпрямленного тока I_d ; INT – функция, определяющая целую часть выражения в скобках.

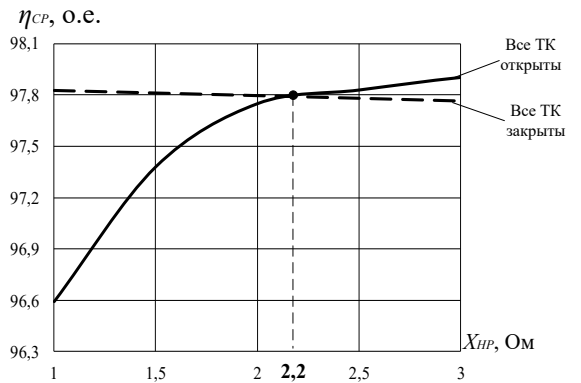
Результаты расчетов 3 этапа представлены на рисунке 3.

В результате проведенных расчетов для преобразовательного агрегата с ТРПУ и трансформатором ТРСНП-12500/10 рациональное значение сопротивления неуправляемого реактора, по обоим рассматриваемым критериям и округленное до десятых, равно 2,2 Ом.

а



б



а – $\cos \varphi_{1(1)CP}$ от сопротивления неуправляемого реактора $\cos \varphi_{1(1)CP} = f(X_{HP})$;

б – КПД от сопротивления неуправляемого реактора $\eta_{CP} = f(X_{HP})$

Рисунок 3 – Графики зависимости средних, по току нагрузки, значений показателей преобразовательного агрегата с ТРПУ

Проверка достоверности результатов расчетов, полученных по разработанной методике была произведена на лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ, погрешность полученных результатов составляет не более 2 %.

Третья глава посвящена выбору наиболее приемлемой, для тяговой нагрузки, системы автоматического регулирования выпрямленного напряжения с помощью ТРПУ.

Доказано, что наиболее приемлемой системой автоматического регулирования выпрямленного напряжения с помощью ТРПУ является релейная система с амплитудной модуляцией, фиксирующая величину и время отклонения напряжения от заданного значения.

Разработан принцип реализации плавного регулирования выпрямленного напряжения, где точность будет зависеть от частоты подачи сигнала управления на электроды управления тиристоров ТРПУ. Таким образом, частота сигнала управления будет зависеть от времени цикла регулирования:

$$f_{cy} = \frac{1}{T_{\text{ц}}}, \quad (7)$$

где $T_{\text{ц}} = NT$ – время цикла регулирования, с; N – число периодов питающего напряжения $T = 0,02$ с.

Число состояний тиристорных ключей при выбранном времени цикла регулирования $T_{ц}$, будет зависеть от скважности включения тиристорного ключа ТК и от числа фаз ТРПУ, которое можно представить в соответствии с формулой:

$$C_N^m = C_N^{m_0} + 3C_N^{m_1} + 3C_N^{m_2} + \dots + 3C_N^{m_n}, \quad (8)$$

где m – число периодов T , соответствующих включенному положению тиристорного ключа за время $T_{ц}$; 3 – число фаз ТРПУ.

Так, при $N = 1$, число состояний будет равно $C_N^m = C_1^0 + 3C_1^1$, где первый член C_1^0 соответствует симметричному режиму работы ТРПУ с закрытыми тиристорными ключами ТК, а второй член C_1^1 соответствует открытому состоянию тиристорного ключа ТК в течение одного периода T цикла регулирования $T_{ц}$, причем тиристорный ключ ТК может быть открыт только в одной или в двух фазах ТРПУ (несимметричные режимы), или во всех фазах (симметричный режим). Таким образом, при времени цикла регулирования, равном $T_{ц} = 1T$, $C_N^m = 4$, а значит имеем четыре внешние естественные характеристики преобразовательного агрегата с ТРПУ. Аналогично при времени цикла $T_{ц} = 2T$, $C_N^m = 7$ и т.д.

Возможность реализации плавного регулирования выпрямленного напряжения подтверждена на лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ где погрешность регулирования не превысила 2 %.

Разработан принцип реализации ступенчатого регулирования в рамках системы БАРН с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРСНП-12500/10.

Внешние характеристики преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП-12500/10 и ТРПУ показаны на рисунке 4.

Процесс получения автоматических внешних характеристик 5, 6, 7 осуществляется ступенчато, путем

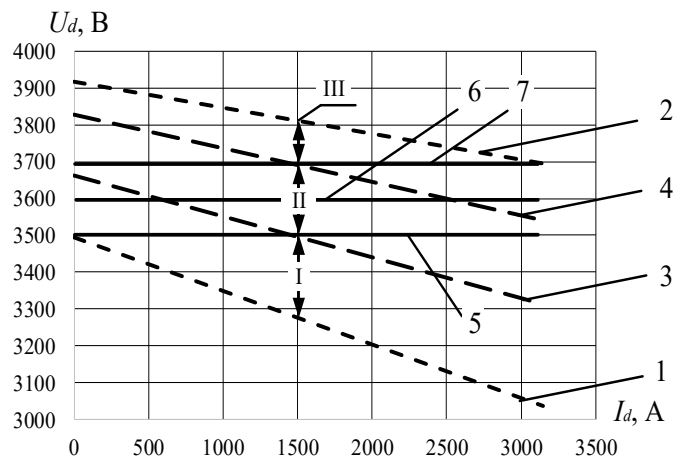


Рисунок 4 – Внешние характеристики преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП-12500/10 и ТРПУ

переключения между естественными внешними характеристиками 1, 2, 3, 4.

С целью определения рациональных значений зоны нечувствительности L или выдержки времени θ , при которых бы обеспечивалось наименьшее число срабатываний переключателя и наилучшее качество регулирования, разработана методика расчета рационального числа переключений ТРПУ в системе БАРН, за основу которой взяты результаты исследований д.т.н, профессора Марквардта Г. Г. и к.т.н, профессора Пышкина А. А., где выпрямленное напряжения рассматривается как случайная функция времени, а при оценке режимов работы системы тягового электроснабжения используются статистико-вероятностные методы.

Особенностью рассматриваемой ступенчатой системы БАРН с ТРПУ является уменьшение величины напряжения ступеней регулирования I, II и III (рисунок 4) с приближением к верхней ограничительной внешней характеристике, что соответствует теории пофазного регулирования. В связи с чем методику определения числа переключений ТРПУ в ступенчатой системе БАРН можно разделить на два этапа.

Автоматические внешние характеристики 5, 6, 7 пересекают сразу несколько ступеней регулирования, а значит целью первого этапа является определение средних значений напряжения диапазона регулирования Δ_{CP} :

$$\Delta_{CP} = \frac{\Delta_n I_{dP-n} + \Delta_{n+1} (I_{dP-(n+1)} - I_{dP-n}) + \dots + \Delta_k (I_{dH} - I_{dP-(k-1)})}{I_{dH}}, \quad (9)$$

и зоны нечувствительности L_{CP} :

$$L_{CP} = \frac{L_n I_{dP-n} + L_{n+1} (I_{dP-(n+1)} - I_{dP-n}) + \dots + L_k (I_{dH} - I_{dP-(k-1)})}{I_{dH}}, \quad (10)$$

где n – номера ступеней регулирования (I, II или III) через которые проходит автоматическая внешняя характеристика; k – номер последней ступени, через которую проходит автоматическая внешняя характеристика; I_{dP} – величина тока нагрузки ПА, определяемая в результате расчетов внешних характеристик агрегата с ТРПУ, при которой происходит переход автоматической внешней характеристики с одной ступени регулирования на другую, А.

На втором этапе методики производится определение числа переключений ТРПУ (формула 11) и среднеквадратичного отклонения регулируемого напряжения (формула 12) от величины зоны нечувствительности L_{CP} и выдержки времени срабатывания переключателя θ :

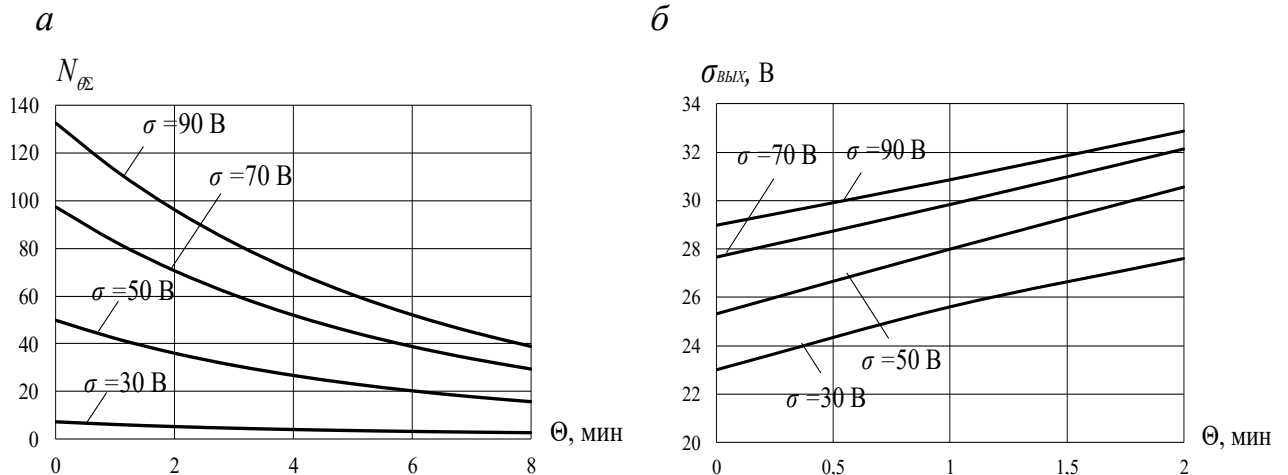
$$N_{\theta} = \frac{T\sigma_v}{2\pi\sigma} \left\{ \sum_{j=0}^{j=l} P_{L_2+j\Delta}(t > \theta) \exp \left[-\frac{(L_{2-CP} + j\Delta_{CP} - \bar{u})^2}{2\sigma^2} \right] + \sum_{j=0}^{j=m} P_{L_1-j\Delta}(t > \theta) \exp \left[-\frac{(L_{1-CP} - j\Delta_{CP} - \bar{u})^2}{2\sigma^2} \right] \right\}, \quad (11)$$

где T – период наблюдения, с; $P(t > 0)$ – вероятность «выброса» напряжения, длительностью больше θ ; σ – среднеквадратичное отклонение выпрямленного напряжения относительно оценки математического ожидания \bar{u} , В; σ^2 – дисперсия выпрямленного напряжения относительно оценки математического ожидания \bar{u} , В²; L_{1-CP} и L_{2-CP} – предельные значения зоны нечувствительности L_{CP} , В; σ_v – среднеквадратичное отклонение скорости нарастания выпрямленного напряжения, В; m – число ступеней регулирования на понижение напряжения, расположенных ниже нижнего предела L_{1-CP} ; l – число ступеней регулирования на повышение напряжения, расположенных выше верхнего предела L_{2-CP} .

$$\sigma_{\text{ВЫХ}} = \sqrt{\sigma^2 \left[2\Phi\left(\frac{L'}{\sigma}\right) - 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{L'}{\sigma} e^{-\frac{L'^2}{2\sigma^2}} \right] + 2L'^2 \left[1 - \Phi\left(\frac{L'}{\sigma}\right) \right]}. \quad (12)$$

где $L' = L_{2-CP} - \bar{u}$, $\Phi\left(\frac{L'}{\sigma}\right) = \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du$ – табулированная функция.

В соответствии с разработанной методикой произведен расчет числа срабатываний ТРПУ для преобразовательного агрегата с трансформатором ТРСНП-12500/10 в системе БАРН с ТРПУ. Результаты расчета для автоматической характеристики 5 представлены на рисунке 5.



а – число срабатываний ТРПУ N_{θ} от выдержки времени θ ;

б – среднеквадратичные отклонения регулируемого напряжения $\sigma_{\text{ВЫХ}}$ от выдержки времени θ

Рисунок 5 – Графики зависимости суточных показателей методики

Из представленных графиков видно, что с увеличением выдержки времени срабатывания переключателя происходит уменьшение числа срабатываний ТРПУ и, как следствие, увеличение среднеквадратичного отклонения регулируемого напряжения.

В четвертой главе производится укрупненный расчет стоимости и доказываемая экономическая эффективность использования системы БАРН с ТРПУ.

В соответствии с определенными в главе 2 параметрами неуправляемого реактора и тиристорных ТРПУ, произведен укрупненный расчет стоимости системы БАРН с ТРПУ, который составил 8 776 тыс. рублей.

Годовой экономический эффект от использования системы БАРН с ТРПУ определен (формула 13) на основании моделирования в программном комплексе «КОРТЭС» на участке Шаля – Кунгур системы тягового электроснабжения постоянного тока с регулированием напряжения системой БАРН с различными вариантами переключающих устройств.

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta A \cdot C_{\mathcal{E}} \cdot 2 \cdot 365, \quad (13)$$

где ΔA – снижение расхода электрической энергии за 12 часов, кВт·ч; $C_{\mathcal{E}}$ – цена 1 кВт·ч электрической энергии, равная 3,91 руб; 2 – коэффициент для перевода к суточной норме часов.

При сравнении результатов моделирования работы системы тягового электроснабжения постоянного тока с регулированием напряжения с помощью ТРПУ относительно системы с реакторными устройствами РПН, годовой экономический эффект $\Delta \mathcal{E}$ заключается в снижении потерь электрической энергии в трансформаторах и переключающем устройстве $\Delta A_{\text{тр}}$, который составляет от 5 620 до 6 276 тыс. руб. на один агрегат, в зависимости от заданного уровня стабилизации.

В результате проведенных расчетов оценочных показателей эффективности проекта определено, что внедрение системы БАРН с ТРПУ является эффективным: чистый дисконтированный доход за период 8 лет – 12 369 тыс. руб., а расчетный срок окупаемости составляет 2,2 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны теоретические положения, описывающие работу трансформатора с подключенным к нему ТРПУ с целью оценки влияния работы переключателя на трансформатор и преобразовательный агрегат. Достоверность расчетов по полученным уравнениям была подтверждена сходимостью результатов аналитических и экспериментальных исследований с погрешностью, не превышающей 5 %.

2. Разработана методика расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ, заключающаяся в последовательном переборе значений сопротивлений и определении наилучших энергетических показателей преобразовательного агрегата. Определено рациональное значение сопротивления неуправляемого реактора, равное 2,2 Ом для преобразовательного агрегата с трансформатором ТРСНП-12500/10. Достоверность разработанной методики подтверждена экспериментально на физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ, погрешность составила не более 2 %.

3. Установлено, что для ТРПУ в составе системы БАРН наиболее приемлемой является релейная система автоматического регулирования, фиксирующая величину и время отклонения напряжения от заданного значения и способная обеспечить плавное и ступенчатое регулирование выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата. Разработана методика расчета рационального числа переключений ТРПУ в ступенчатой системе БАРН, заключающаяся в определении зависимостей качества регулируемого напряжения и числа переключений устройства РПН от величины зоны нечувствительности и выдержки времени срабатывания переключателя.

4. На основании результатов моделирования работы системы тягового электроснабжения постоянного тока с регулированием напряжения определено, что годовой экономический эффект при сравнении системы тягового электроснабжения с системой БАРН с ТРПУ относительно существующей системы БАРН с реакторным переключающим устройством основан на снижении потерь электрической энергии в трансформаторах и устройствах РПН и составляет от 5 до 6 млн. руб. на один агрегат, в зависимости от заданного уровня стабилизации. Также обеспечивается, примерно, в два раза снижение массо-габаритных показателей и в три раз стоимости системы БАРН с ТРПУ.

Перспективы дальнейшей разработки темы включают в себя:

1. Проведение работ по внедрению разработанной системы БАРН с ТРПУ на действующих участках электрифицированных железных дорог с анализом результатов эксплуатации.

2. Участие в разработке и исследовании трехфазного тиристорного переключающего устройства ТПУ регулирования напряжения трансформатора.

Работы, опубликованные по теме диссертации:

а) научные работы, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. Тарасовский, Т. С. Тиристорно-реакторное устройство регулирования напряжения под нагрузкой РПН преобразовательного трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1 / Т. С. Тарасовский // Транспорт Урала. – 2017. – № 3 (54). – С. 87-91.

2. Тарасовский, Т. С. Методика расчета напряжений и токов преобразовательного трансформатора с тиристорно-реакторным переключающим устройством при пофазном регулировании напряжения. / Б. А. Аржанников, Т. С. Тарасовский // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 101-107.

б) научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных *Scopus* и *Web of Science*:

3. Tarasovskiy, T. S. Energy efficiency electrified section with automatic voltage regulation / B. A. Arzhannikov, I. A. Baeva, T. S. Tarasovskiy // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020 – pp. 87-97 https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_10/.

4. Tarasovskiy, T. S. Improvement of the system of contactless automatic regulation of voltage of converter traction units of traction substations / B. A. Arzhannikov, A. P. Buynosov, I. A. Baeva, T. S. Tarasovskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia – 2020 – pp. 012150. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/918/1/012150/>.

в) научные работы, опубликованные в других изданиях

5. Тарасовский, Т. С. Тиристорно-реакторное устройство регулирования напряжения под нагрузкой РПН преобразовательного трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1 с пофазным регулированием напряжения / Т. С. Тарасовский // Инновационный транспорт. – 2018. – № 4 (30). – С. 39-42.

6. Тарасовский, Т. С. Тиристорные устройства регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой РПН / Б. А. Аржанников, И. А. Баева, Т. С. Тарасовский // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – № 4 (25). – С. 32-38.

7. Тарасовский, Т. С. Моделирование переходных процессов тиристорно-реакторного устройства регулирования напряжения под нагрузкой / Т. С. Тарасовский // Инновационный транспорт. – 2020. – № 1 (35). – С. 69-72.

8. Тарасовский, Т. С. Система бесконтактного автоматического регулирования напряжения БАРН с тиристорно-реакторным переключающим устройством / Т. С. Тарасовский, А. О. Лимберг // Инновационный транспорт. – 2021. – № 2 (40). – С. 49-53.

г) Свидетельство о государственной регистрации программного продукта:

9. Тарасовский, Т. С. Устройство для автоматического регулирования напряжения на тяговой подстанции / Б. А. Аржанников, А. О. Лимберг, Т. С. Тарасовский // Патент на полезную модель *RU 196985 U1*, 23.03.2020. Заявка № 2019137181 от 19.11.2019.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Статьи [1, 5, 7] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [2] – разработка методики расчета напряжений и токов преобразовательного трансформатора с ТРПУ при пофазном регулировании напряжения; [3] – расчет параметров преобразовательных трансформаторов с устройствами РПН; [4] – анализ способов усиления системы тягового электроснабжения; [6] – обзор существующих тиристорных устройств РПН; [8] – разработка и монтаж силовой части лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ, проведение лабораторных испытаний, обработка данных; [9] – разработка блок-схемы алгоритма работы устройства для автоматического регулирования напряжения на тяговой подстанции.

Тарасовский Тимофей Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКТИВНЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ**

**2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация (технические науки)**

Подписано в печать «17» декабря 2021

Формат 60 x 84 1/16.
Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,2.
Заказ 31.