

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Уральский государственный университет путей сообщения
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

На правах рукописи



ТАРАСОВСКИЙ ТИМОФЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

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

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

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Аржанников Борис Алексеевич

Екатеринбург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ	12
1.1 Обзор существующих способов повышения эффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока	12
1.2 Современное состояние систем и устройств регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов.....	14
1.3 Выводы по первой главе.....	33
2 НАПРАВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ.....	34
2.1 Система бесконтактного автоматического регулирования напряжения трансформаторов преобразовательных агрегатов с использованием индуктивных и полупроводниковых приборов.....	34
2.2 Основные соотношения параметров преобразовательного агрегата с исполнительным регулируемым тиристорно-реакторным переключающим устройством	38
2.3 Определение основных параметров неуправляемого реактора тиристорно-реакторного переключающего устройства.....	53
2.4 Определение основных параметров тиристоров тиристорно-реакторного переключающего устройства	71
2.5 Выводы по второй главе.....	96
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ТРПУ В СИСТЕМЕ БЕСКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ.....	98

3.1 Общие положения	98
3.2 Принцип реализации плавного бесконтактного автоматического регулирования выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с ТРПУ.....	102
3.3 Принцип реализации ступенчатого бесконтактного автоматического регулирования выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с ТРПУ....	109
3.4 Методика определения числа переключений тиристорных ключей ТРПУ в системе бесконтактного автоматического ступенчатого регулирования напряжения.....	112
3.5 Выводы по третьей главе.....	132
4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСИЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА СИСТЕМОЙ БАРН С ТРПУ.....	134
4.1 Общие положения	134
4.2 Определение экономического эффекта от усиления системы тягового электро-снабжения системой БАРН с ТРПУ	136
4.3 Определение экономической эффективности от усиления системы тягового электро-снабжения системой БАРН с ТРПУ	141
4.4 Выводы по четвертой главе.....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Характеристики и область применения преобразовательных трансформаторов с переключающим устройством	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Основные параметры преобразовательного трансформатора ТРСНП-12500/10	164
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Основные параметры устройств, применяемых в лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным пере-ключающим устройством.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Стоимость системы БАРН и тиристорных ключей ТРПУ	169

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы.....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Патент на полезную модель.....	174

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Направление совершенствования электрифицированного железнодорожного транспорта в Российской Федерации определено [1] стратегией развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2030 года [2] и стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации [3], которые предусматривают повышение провозной способности за счет повышения весовых норм поездов путем введения на электрифицированных участках грузовых тяжеловесных поездов массой 7100 т [4].

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 [4, 5].

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 (тиристор) 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. Алексева, 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 [3–11], М. П. Бадёр [12], А. Т. Бурков [13–15], М. А. Гаранин [16, 17], К. Г. Марквардт [18, 19], А. Н. Марикин [20,21], Р. И. Мирошниченко [22, 23], Т. П. Третьяк [24], В. Т. Черемисин [25-28], Careglio Giuseppe [29], Mayer Lucio [30], Миура Адзуки [31];

– контакторные устройства РПН: А. М. Голунов [32], А. Л. Мазур [33], Г. М. Михеев [33, 34], Л. М. Пестряева [35–40], В. В. Порудоминский [41, 42], А. А. Пышкин [43], Я. Л. Фишлер [35, 44], И. А. Якобсон [45], *Ande F* [46], *Heinz R* [47];

– реакторные устройства РПН: М. И. Клейнерман [5], Р. Н. Урманов [48–51], Б. А. Аржанников [6–8], Я. Л. Фишлер [35];

– тиристорные устройства РПН: Б. Ю. Алтунин [52–57], Б. А. Аржанников [6, 58], А. А. Асабин [52, 56, 57], И. М. Туманов [59], А. И. Чивенков [53, 56, 57], *Guth G* [60], *Schaffer, J* [61].

Тема диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки): пункт 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 стоимость 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 электроснабжения 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 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 си-

стем 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.); конкурсе проектов ОАО «РЖД» - «Новое звено» - 2019, Международном симпозиуме «ELTRANS 10.0» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); 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.

1 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ

1.1 Обзор существующих способов повышения эффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока

Повышение эффективности электрифицированных железных дорог связано с повышением весовых норм поездов и введением на электрифицированных участках поездов массой 7100 т. Однако существующая система тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ не справляется с такими задачами, и на некоторых ее участках устанавливают различные устройства усиления.

Существующие способы усиления [6–8, 19] системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ можно разделить на две категории.

1) Пассивные – обеспечивают повышение напряжения в контактной сети без возможности его регулирования. К этой категории относятся следующие способы усиления:

- увеличение сечения проводов контактной сети;
- строительство дополнительных тяговых подстанций [61, 62];
- применение постов секционирования;
- применение пунктов параллельного соединения;
- переход от шестипульсовых к двенадцатипульсовым схемам выпрямления выпрямительных блоков преобразовательных агрегатов;
- применение пунктов повышенного напряжения [3, 8, 21, 29, 30];
- применение одноагрегатных пунктов питания с продольными линиями электроснабжения [3, 8, 13, 15];
- повышение напряжения в контактной сети до 6, 12, 24 кВ [3, 8, 13].

2) Активные – являются замкнутыми системами автоматического регулирования напряжения, которые обеспечивают поддержание уровня напряжения в заданном диапазоне или его стабилизацию. К этой категории относятся следующие способы усиления:

- применение регулируемых вольтодобавочных устройств [3, 8, 20];
- применение выпрямительных и выпрямительно-инверторных агрегатов с регулированием напряжения [3, 8, 14];
- применение устройств регулирования напряжения под нагрузкой преобразовательных трансформаторов [3, 6, 8, 10, 11].

Такие пассивные способы усиления, как строительство дополнительных одно- и двухагрегатных тяговых подстанций, а также увеличение сечения проводов контактной сети сопровождается значительными капитальными затратами.

Повышение напряжения постоянного тока в контактной сети до 6, 12, 24 кВ повысит энергетическую эффективность системы тягового электроснабжения постоянного тока, однако реализация данных предложений встречает ряд проблем, связанных с разработкой преобразователя 12/3 кВ (24/3), а также с разработкой коммутационной и защитной аппаратуры на тяговых подстанциях и электровозах [3, 8, 12].

Применение постов секционирования, в том числе с накопителями электрической энергии [27, 28], пунктов параллельного соединения, одноагрегатных тяговых блоков, пунктов повышенного напряжения и переход от шестипульсовых к двенадцатипульсовым схемам выпрямления выпрямительных блоков обеспечивает повышение напряжения на токоприемнике электровоза, однако при условии сохранения потребляемой им мощности [3]. В связи с чем, использование указанных способов усиления при увеличении весовых норм поездов, а значит и увеличении потребляемой электровозами мощности, будет малоэффективным.

Для одновременного повышения напряжения в контактной сети и мощности, подводимой к подвижному составу, применяются активные способы усиления, а на особо грузонапряженных участках, одновременно активные и пассивные. Таким

образом применяется буферная система тягового электроснабжения [3, 8], которая содержит две тяговые подстанции с устройствами регулирования напряжения и питающие «непроходимую» межподстанционную зону, на которой устанавливается одноагрегатная тяговая подстанция с питанием от соседних тяговых подстанций по ЛЭП-10 (35 кВ) (рисунок 1.1).

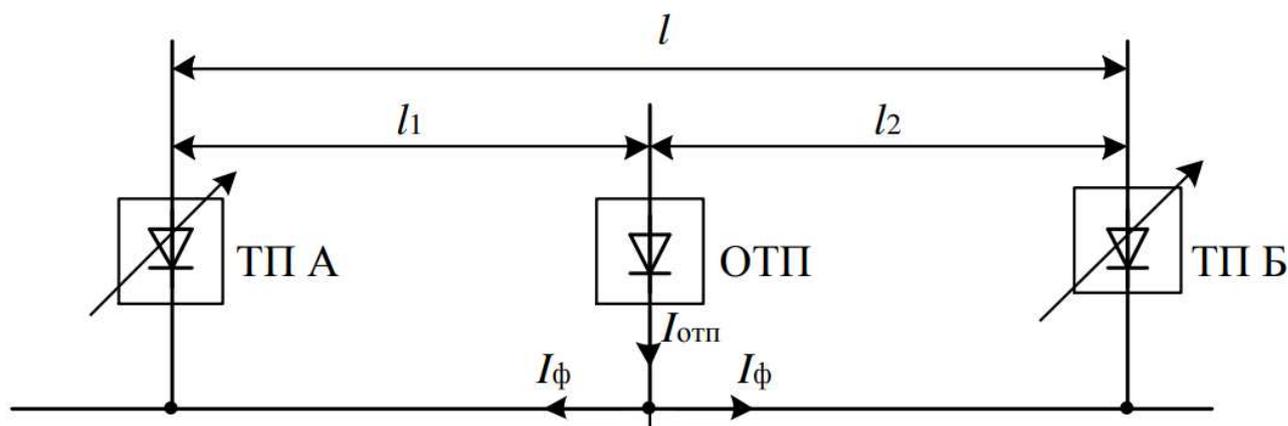


Рисунок 1.1 – Схема питания и распределения тока электровоза

1.2 Современное состояние систем и устройств регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов

1.2.1 Общие положения

Большинство устройств регулирования напряжения трансформаторов используют способ изменения ЭДС первичной или вторичной обмоток.

На практике, для изменения ЭДС обмоток и, соответственно, регулирования выходного напряжения трансформатора широко используется изменение коэффициента трансформации, т.е. изменение числа витков первичной или вторичной обмоток [6, 35]:

$$K_T = \frac{w_1}{w_2}, \quad (1.1)$$

где w_1 – число витков первичной обмотки трансформатора;

w_2 – число витков вторичной обмотки трансформатора.

В зависимости от технической реализации, систематизацию устройств регулирования напряжения можно представить в виде диаграммы на рисунке 1.1.

Существующие силовые трансформаторы общего назначения выполняют с переключением отводов обмотки без возбуждения (ПБВ), т.е. после отключения обмотки от сети, и с механическим переключением отводов под нагрузкой (РПН) [6, 32–34, 41, 42, 44–47, 63].

Устройства РПН позволяют автоматически регулировать напряжение без прерыва питания и отключения обмоток трансформатора от сети.

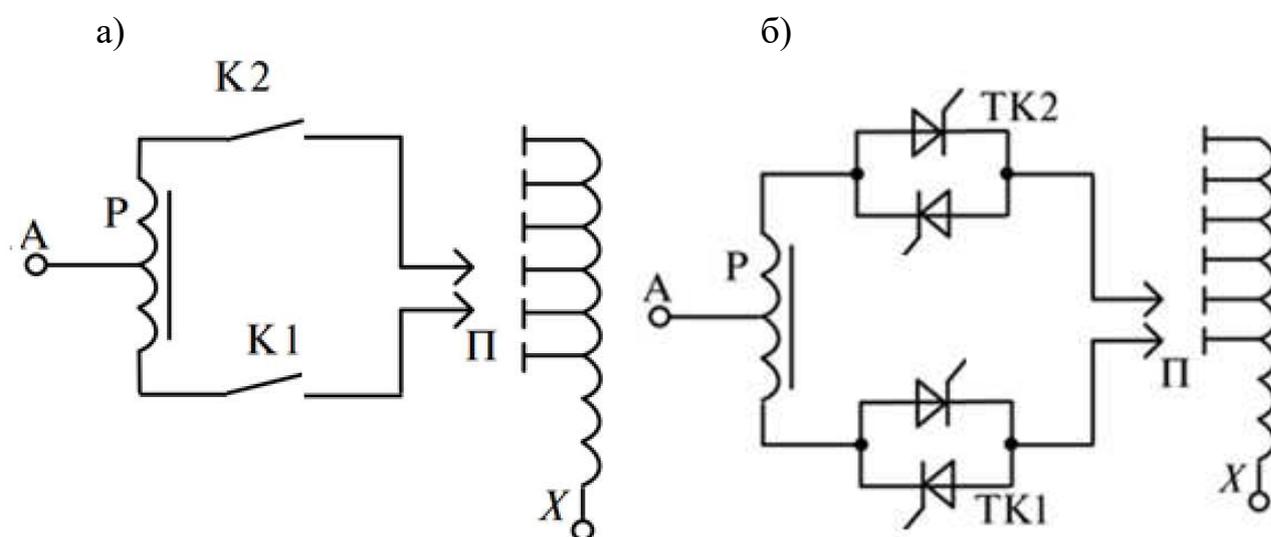
Регулирование напряжения в трансформаторах осуществляется механическими переключателями ответвлений обмотки с токоограничивающим электромагнитным (реакторным) сопротивлением с контакторными (рисунок 1.3, а) или с тиристорными (рисунок 1.3, б) ключами управления. Для РПН разработано устройство с механическим быстродействующим переключателем ответвлений с резисторным токоограничивающим сопротивлением и с применением, для разрыва цепи тока, вакуумных дугогасительных камер.



Рисунок 1.2 – Систематизация устройств регулирования напряжения трансформаторов

Применение в механических переключателях токоограничивающих сопротивлений (рисунок 1.3, а, б) увеличивает потери в трансформаторах за счет дополнительных потерь электрической энергии при протекании по этим сопротивлениям рабочих токов нагрузки.

В некоторых установках, в частности на электрифицированных железных дорогах и в электрометаллургии, необходимо плавное регулирование напряжения, а значит требуется большое число переключений или разработка трансформаторов с плавным бесконтактным РПН [6, 35].



П – переключатель; Р – реактор; К1, К2 – контакты; ТК1, ТК2 – тиристорные ключи
 а – с контакторными ключами управления и механическим переключателем;
 б – с тиристорными ключами управления и механическим переключателем

Рисунок 1.3 – Принципиальная электрическая схема устройства ступенчатого РПН с токоограничивающим реактором

Плавное РПН трансформаторов может осуществляться с помощью управляемых реакторов, подключаемых к отводам регулировочной части первичной или вторичной обмоток трансформатора [6].

Для снижения потерь электрической энергии в устройствах регулирования трансформатора в отводы регулировочной части обмоток трансформатора вместо реакторов включается комбинированное регулируемое устройство, состоящее из неуправляемого реактора и тиристорного ключа (тиристорно-реакторное переключающее устройство ТРПУ).

Применение в механических переключателях тиристорных ключей без токоограничивающих сопротивлений, с целью обеспечения бестоковой коммутации, связано с разработкой надежных схем управления тиристорами.

Характеристики и область применения преобразовательных трансформаторов с переключающими устройствами показаны в приложении А.

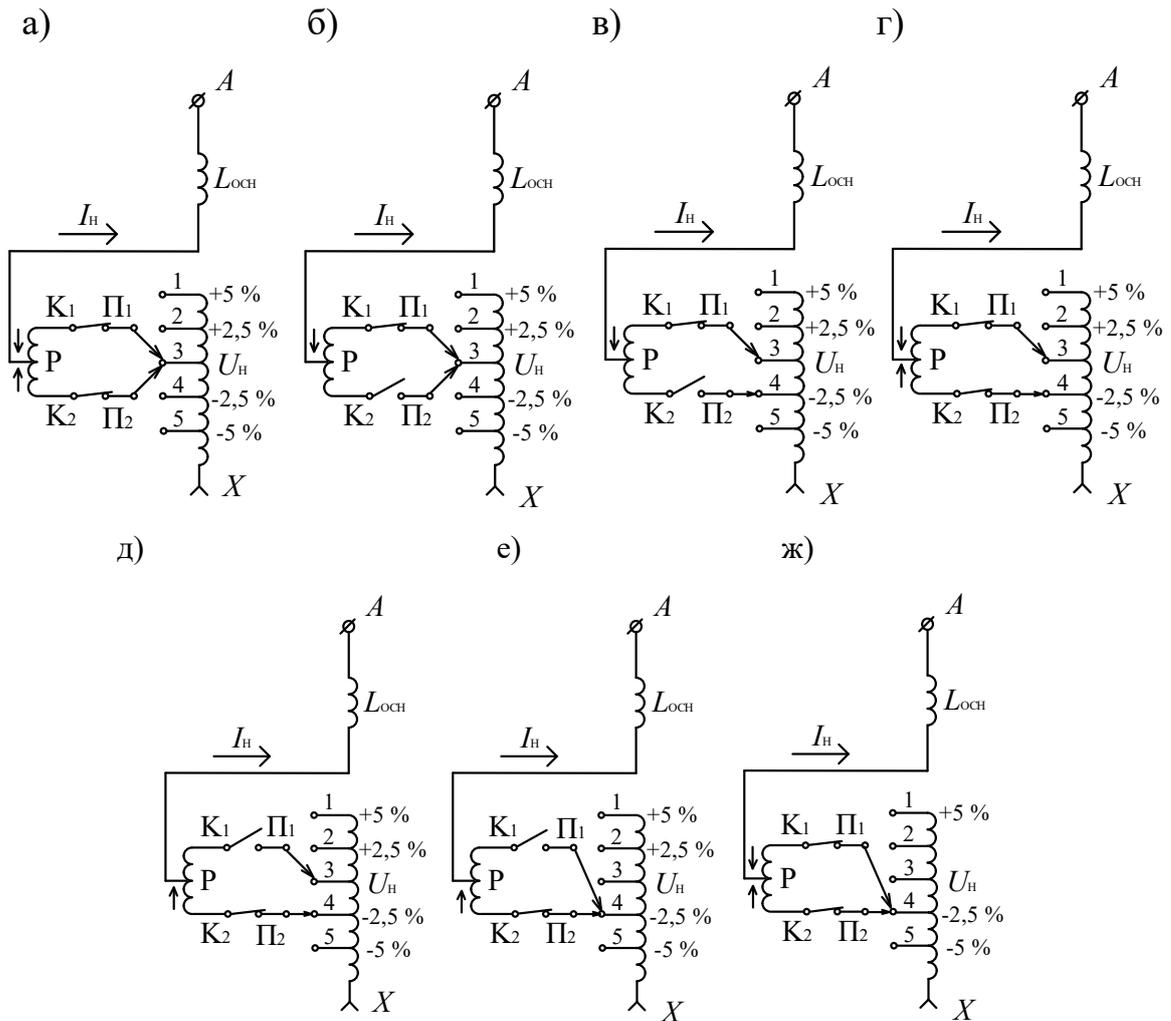
1.2.2 Ступенчатые контакторные устройства РПН с токоограничивающим реактором

В настоящее время широко применяются преобразовательные трансформаторы со ступенчатыми контакторными устройствами РПН с реакторными токоограничивающими элементами типа РНТ-13. В этих устройствах контакторы обеспечивают коммутацию тока в специальном кожухе с трансформаторным маслом [35].

Схема последовательности работы контакторного РПН с токоограничивающим реактором приведена на рисунке 1.4.

Переход с одной ступени напряжения на другую (с 3-й ступени на 4-ю) происходит согласно схемам (а – ж), представленным на рисунке 1.4. При размыкании контакта правого плеча К2, переключатель П2 переходит с 3-й ступени на 4-ю. Одновременно ток нагрузки протекает через левое плечо контактов контактора. Далее контакт К2 замыкается и нагрузочный ток будет протекать поровну на двух плечах реактора. При этом в контуре регулировочной обмотки, между отводами 3 и 4, возникает циркулирующий ток, ограниченный токоограничивающим реактором Р. Далее происходит размыкание контакта К1 в левом плече контактора, переключатель П1 переключается с 3-й ступени на 4-ю, а контакт левого плеча К1 замыкается.

Существенным недостатком устройств РНТ-13 является быстрый износ контактов в результате горения дуги при коммутации и структурное изменение масла, при этом они надёжны в работе, и имеют простую конструкцию [64-71].



П1, П2 – контакты переключателя; К1, К2 – контакты контактора; Р – реактор;

I_H – нагрузочный ток

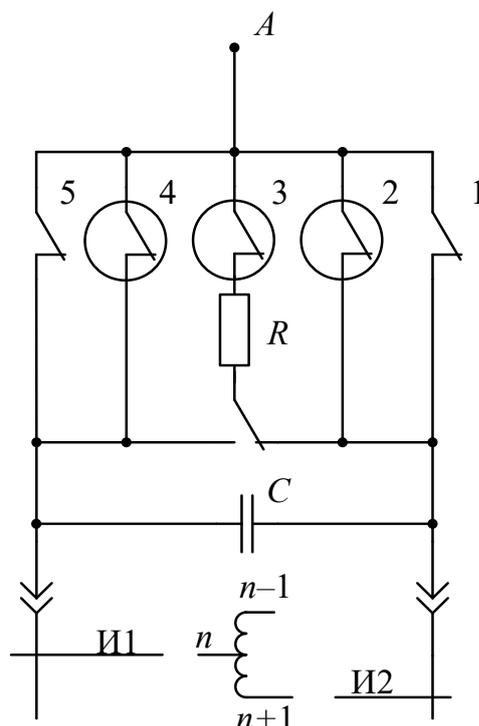
а – положение переключателей на 3-й ступени; б – разомкнут контакт правого плеча К2;
 в – переход переключателя П2 с 3-го положения на 4-ое; г – замкнут контакт правого плеча К2,
 секция 3-4 замкнута на реактор; д – разомкнут контакт левого плеча К1; е – переход переключателя
 П1 с 3-го положения на 4-ое;
 ж – замкнут контакт левого плеча К1

Рисунок 1.4 – Схема последовательности работы контактов контактора устройства РПН с токоограничивающим реактором

1.2.3 Ступенчатые контакторные устройства РПН с токоограничивающим резистором

В трансформаторах, где необходимо большое число переключений, широко используется способ коммутации контактов, при котором гашение дуги происходит в вакууме. При гашении дуги в вакуумных дугогасящих камерах (ВДК) отсутствует необходимость замены масла и исключается возможность появления открытой дуги, что увеличивает их срок работы между периодическими ревизиями. Такие устройства обладают высокой коммутационной способностью и малыми габаритами. Отечественные производители выпускают устройства РПН с ВДК типа РНТА [72–77].

Принципиальная электрическая схема одной фазы контакторов РНТА-35/1000 ВУ1 приведена на рисунке 1.5.



1, 5 – шунтирующие контакты; 2, 3, 4 – контакты с ВДК;
 R – токоограничивающий резистор; C – защитный конденсатор;
 И1, И2 – избиратель

Рисунок 1.5 – Принципиальная электрическая схема одной фазы контакторов РНТА-35/1000ВУ1

Принцип работы устройства РПН с резисторами аналогичен работе устройства с токоограничивающим реактором. Основной особенностью работы этих устройств является то, что нагрузочный ток протекает через токоограничивающий резистор (R) кратковременно и только в процессе коммутации. Его назначение - ограничить ток, протекающий через контактную цепь в контуре регулировочной обмотки на доли секунды [33, 70].

На практике устройства РПН с токоограничивающими резисторами применяются для переключения отводов трансформатора с меньшими токами нагрузки, но более высокими напряжениями, тогда как устройства с токоограничивающими реакторами, напротив, чаще применяются с большими токами.

Работа контактов ВДК 2, 3 и 4 происходит следующим образом. В процессе переключения контакты 3 и один из пары контактов 2 или 4 разомкнуты. В это время контакты ВДК второй из пары контактов 2 или 4 замкнут и зашунтированы соответствующим главным контактом 1 или 5. Когда контакт 3 находится в разомкнутом состоянии, происходит замыкание и размыкание контактов резистора. При замыкании резистор R подключается параллельно контактам 2 или 4, которые подготавливают к переключению переключателя И1 или И2. Защитный конденсатор C защищает цепь контактора от перенапряжений.

Кроме рассмотренных выше отечественных устройств РПН с ВДК, широко используется и зарубежные переключатели типа *SAV*, *SCV*, *SDV* производства *Maschinenfabrik Reinhausen* (Германия) [78–88], серии *PC* производства *Hyundai Heavy Industries* (Болгария) [89–93], и *ABB* (Швейцария).

Более подробные характеристики переключающих устройств показаны в таблице 1.1.

Большая скорость подвижных частей, стойкость контактов контактора механическим ударам и электрической дуге заставляют предъявлять жёсткие требования к конструкции пружин привода переключателя [6].

Таблица 1.1 – Характеристики переключающих устройств РПН

Основные технические данные	Тип устройства					
	РНТ 13	РНТА35/100 0 ВУ2	MR VACUTAP® VR	Hyundai RSV 5.3 серия	ABB VRLTC	ABB VUBB
Номинальное напряжение, кВ	35	35	72, 5	36	34, 5	76
Номинальный ток, А	625	1000	1300	1250	2000	600
Напряжение ступени, В	1500	2000	4500	1200	500	1600
Число фаз	3	3	3	3	3	3
Число ступеней регулирования	8/17*	±9	18/35	14/27	17/33	10/19
Срок службы механизмов и контактов, не разрывающих ток и переключений (число переключений)	200 000	1 000 000	1 200 000	1 200 000	1 000 000	1 000 000
Срок службы контактов, разрывающих номинальный ток при номинальном напряжении ступени переключений (число переключений)	10 000	150 000	300 000	300 000	300 000	300 000
Число переключений до смены масла	Максимально 10 000	Менять не требуется	Менять не требуется	Менять не требуется	Менять не требуется	Менять не требуется
Масса устройства без масла, т	1,36	0,55	0,55	0,55	-	-
Технология	Контактное Переключение, реактивное сопротивление	Вакуумное переключение, резистивное сопротивление	Вакуумное переключение, резистивное сопротивление	Вакуумное переключение, резистивное сопротивление	Вакуумное Переключение, реактивное сопротивление	Вакуумное переключение, резистивное сопротивление

Примечание: *17 ступеней при использовании положения «мост».

1.2.4 Ступенчатые тиристорные устройства регулирования напряжения под нагрузкой

Тиристорные переключающие устройства (ТПУ) можно разделить на два типа. Первый включает в себя применение токоограничивающих сопротивлений с целью ограничения циркулирующего тока в момент переключения отводов трансформатора.

Схема ТПУ одноступенчатого устройства РПН с электромагнитным токоограничивающим сопротивлением P , увеличивающим потери электрической энергии за счет протекания тока нагрузки через реактор P и циркулирующего тока при переключении отводов трансформатора, представлена на рисунке 1.6.

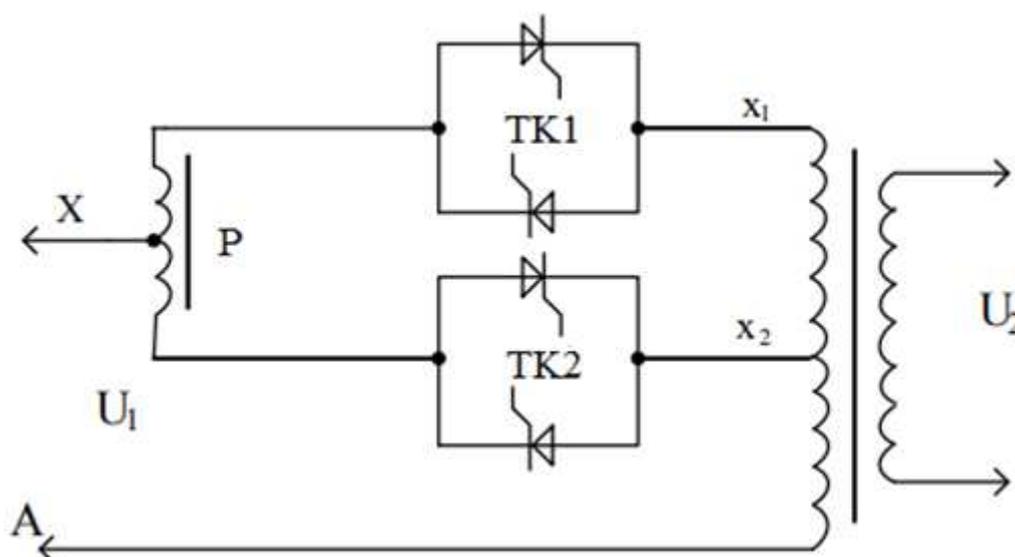


Рисунок 1.6 – Принципиальная электрическая схема с тиристорным РПН с включением реактора в контур ступени регулировочной обмотки и тиристорных ключей

Научными коллективами Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), Всесоюзным научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом трансформаторостроения (ВИТ) и Харьковским институтом механизации и электрификации сельского хозяйства (ХИМЭСХ) выполнена разработка исследования многоступенчатых ТПУ для силовых трансформаторов средней мощности напряжением 6, 10 и 35 кВ [54].

На рисунке 1.7 приведена структурная схема одной фазы трансформатора мощностью 1000 кВА напряжением 6-10 кВ с ТПУ с одним токоограничивающим сопротивлением.

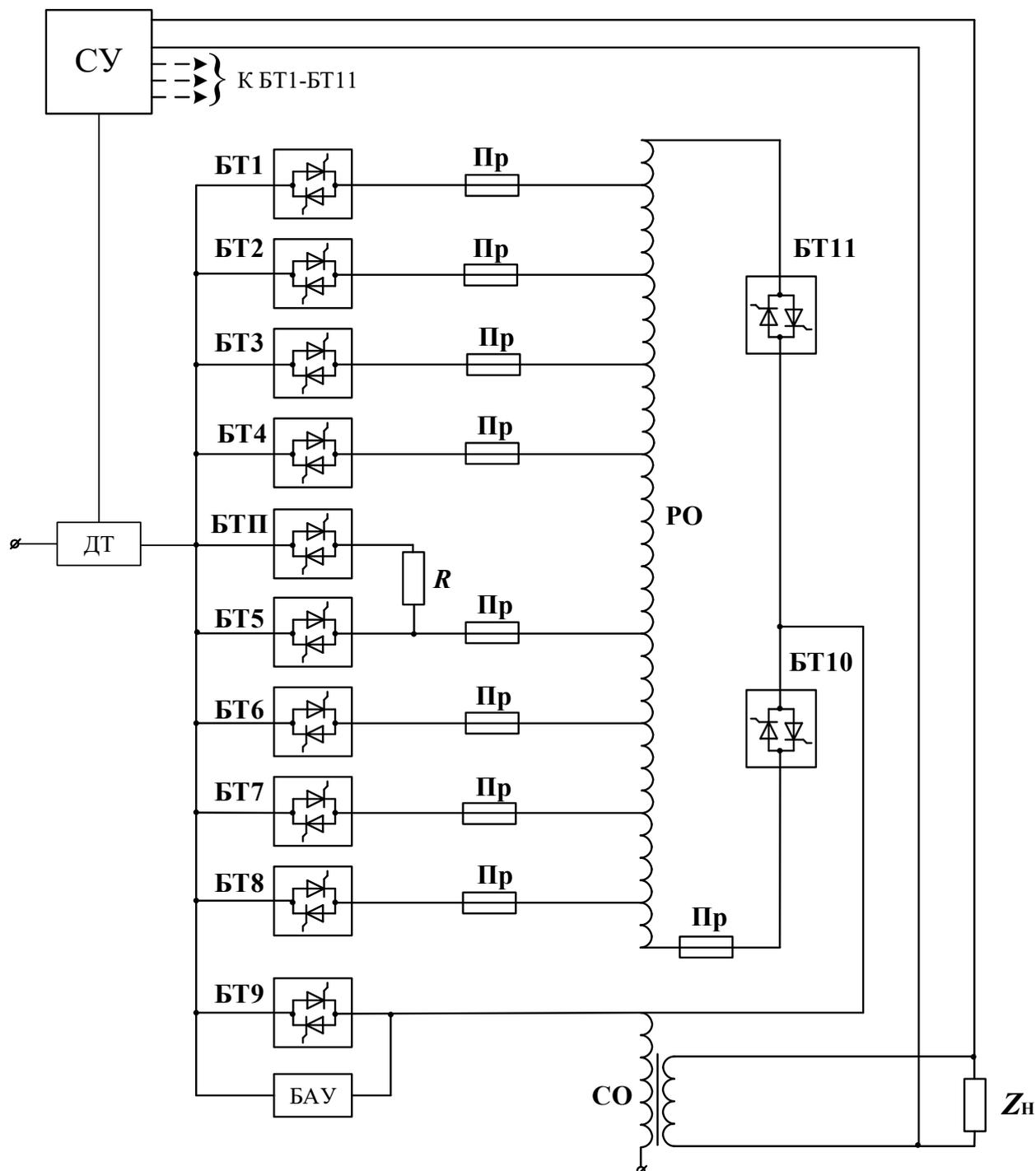


Рисунок 1.7 – Структурная схема трансформатора с ТПУ регулировочных отводов

Число ступеней регулирования ± 8 по 1,25% номинального напряжения. Тиристорные блоки БТ1–БТ8 с предохранителями (Пр) обеспечивают переключение

8 отводов обмотки трансформатора. Блоки БТ10 и БТ11 выполняют функции реверса РО. С помощью емкостного устройства принудительной коммутации БАУ и блоком БТ9 производится отключение тока внешнего короткого замыкания.

Переключение с одного ответвления на другое выполняется в два этапа. На первом этапе снимаются сигналы управления с БТ, отпирается БТП и циркулирующий ток в контуре отводов РО ограничивается токоограничивающим резистором R . На втором этапе отпирается заданный системой управления БТ, выполняется ограничение циркулирующего тока и естественное открытие БТП при переходе его тока через нулевого значения [54].

Устройство имеет следующие недостатки [54]:

- малое число ступеней регулирования при сравнительно большом количестве ТК;
- использование предохранителей является ненадежной системой защиты от токов короткого замыкания ступени.

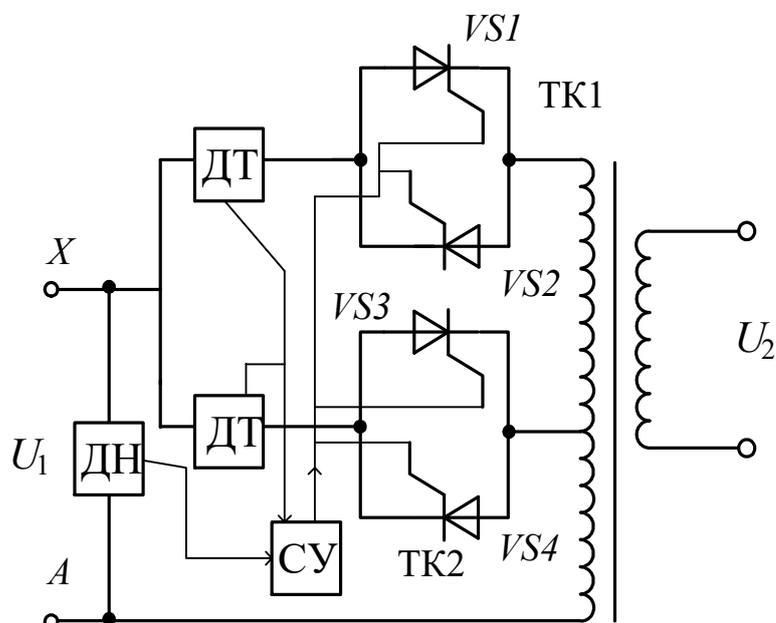
Рассмотренное устройство применимо к трансформатору ТМН-1000/10 по технико-экономическим показателям оказалось неконкурентоспособным по сравнению с серийными контакторными устройствами РПН [54].

Второй тип ТПУ исключает применение токоограничивающих сопротивлений. Для открытия и закрытия тиристорных ключей разрабатываются различные сложные схемы управления на базе электронной техники. Известно множество вариантов электронных схем управления тиристорными ключами [52–61, 94–99]. Принцип работы таких схем заключается в выборе момента подачи сигнала на тиристорные ключи, не допускающего одновременного их открытия, что вызовет протекание тока короткого замыкания. С другой стороны, одновременное закрытие тиристорных ключей приведет к разрыву рабочего тока и перенапряжению в обмотках трансформатора [6].

Функциональная схема управления тиристорным устройством РПН трансформатора показана на рисунке 1.8.

В способе переключения отводов РО трансформатора под нагрузкой производится контроль напряжения с помощью датчика напряжения ДН и контроль тока

нагрузки с помощью датчика тока ДТ и по импульсу управления в момент перехода тока в одном из отводов РО через нулевое значение производится переключение на следующий отвод подачей сигналов управления на один из тиристорных ключей ТК1 или ТК2, необходимый для переключения на другой отвод РО [58].



ТК1 и ТК2 – тиристорные ключи; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; СУ – система управления ТК

Рисунок 1.8 – Функциональная схема управления тиристорным РПН трансформатора

Рассмотренное устройство РПН трансформатора на рисунке 1.8 реализовано в комплектной трансформаторной подстанции с однофазным литым трансформатором КТПОЛ и регулированием вторичного напряжения [99].

Обобщая опыт отечественных и зарубежных разработок ТПУ трансформаторного оборудования [52–61, 94–100] следует отметить, что возможности практической реализации ТПУ в трансформаторах большой мощности мало изучены и требуются дальнейшие разработки по увеличению их надежности.

1.2.5 Ступенчатые устройства регулирования напряжения под нагрузкой трансформаторов тяговых подстанций постоянного тока

С увеличением скоростей движения пассажирских поездов, а также при введении в обращение грузовых поездов повышенной массы на ряде электрифицированных участков наблюдается снижение напряжения на токоприемнике электровоза ниже допустимых значений.

В соответствии с европейским стандартом *ЕН 50163*, принятым 06.03.1995, номинальное напряжение в контактной сети принято 3,0 кВ. При принятом в проектировании электровозов допускается максимальное напряжение 3,9 кВ и минимальное 2,0 кВ. Дополнительными требованиями железных дорог принят минимальный уровень 2,7 кВ для нагруженных участков и 2,4 кВ для слабозагруженных линий [100].

Опыт использования преобразовательных трансформаторов без устройств РПН показывает, что нередко напряжение на нагруженных участках оказывается ниже 2,7 кВ, что противоречит ПТЭ.

Механизм переключения ответвлений РО трансформатора устанавливается в головном понизительном трансформаторе или непосредственно в преобразовательном трансформаторе.

Использование ступенчатого устройства РПН в головном трансформаторе связано с отказом установки на тяговой подстанции дополнительного трансформатора мощностью 2 500–4 000 кВА для обеспечения районных потребителей. С этой целью был спроектирован трехобмоточный трансформатор ТДЦТРУН–25000/110, который обеспечивал питание как тяговых потребителей, так и районных. Выпрямительное напряжение поддерживается на уровне 3 400 – 3 500 В. Увеличение этого уровня напряжения привело бы к ненормальному повышению напряжения в цепях собственных нужд и районных потребителей, что является существенным недостатком.

Применение трансформаторов ТДРУНГ–20000/110, с замкнутой автоматической системой АРНП [101, 102] с пределами регулирования $\pm 4 \times 2,5 \%$ обеспечивает стабилизацию выпрямительного напряжения на тяговой подстанции в диапазоне 3500–3700 В с абсолютной погрешностью до ± 75 В. Этот трансформатор снабжен механическим переключателем с токоограничивающим реактором типа РНТ – 13, который допускает около 500 тыс. переключений механизмов устройства. В отдельные сутки количество переключений может достигать 3000. При использовании выдержки времени в 1 минуту, число переключений сократится до 50–240, 2 минуты – до 7–32 в сутки. Введение выдержки времени не обеспечивает необходимого уровня напряжения при изменении нагрузки. Частые переключения в трансформаторе обуславливают необходимость проведения частых ревизий, и замена устройств РНТ на устройства РНТА, где используются контакторы с вакуумными дугогасительными камерами ВДК, что обеспечивает не менее 1 млн. срабатываний, не решает полностью проблему обеспечения надежности всего устройства РПН.

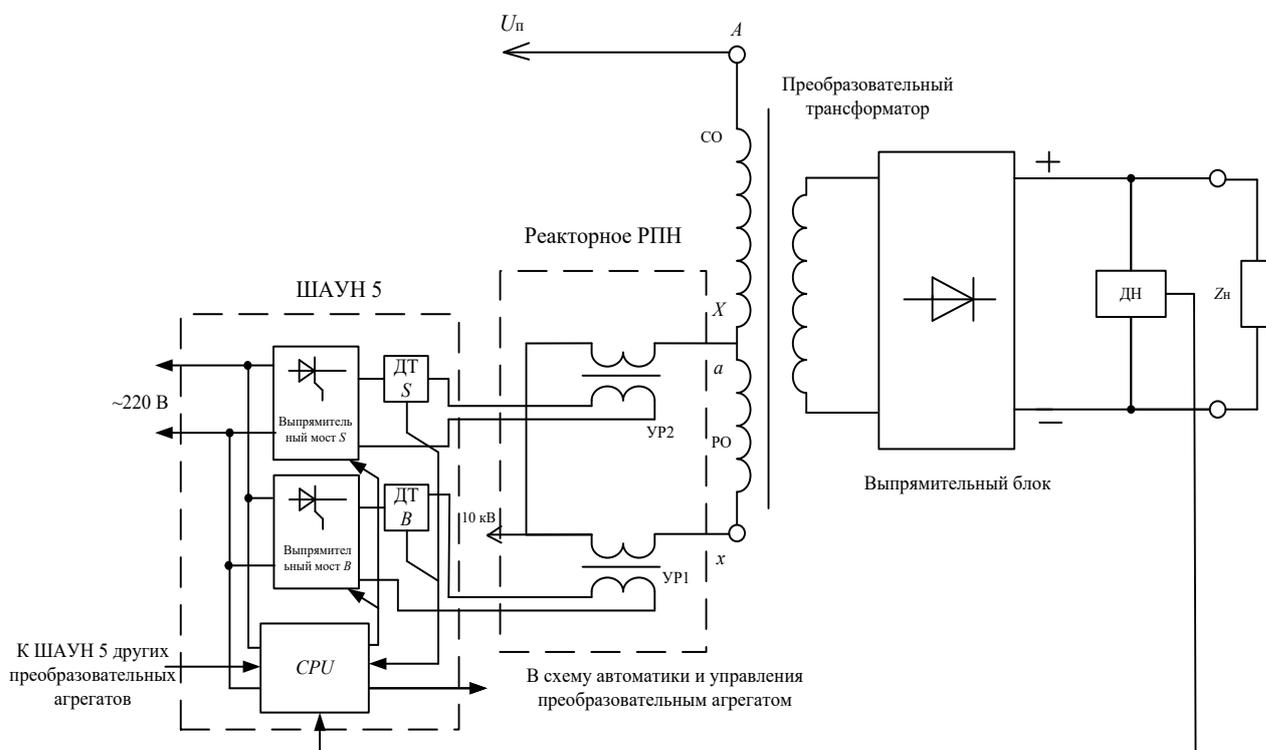
В последующем для ряда тяговых подстанций постоянного тока были выполнены проекты и установлены для автоматического переключения устройств РПН на головных понизительных трансформаторах блоки автоматического управления – БАУРПН производства ГлавЛатвЭнерго, не нашедшие широкого применения ввиду низкой работоспособности оборудования устройств РПН [103].

1.2.6 Реакторное симметричное устройство с двумя управляемыми реакторами

На электрифицированных участках железных дорог применяется система бесконтактного автоматического регулирования напряжения БАРН. На рисунке 1.9 показана функциональная схема системы автоматического регулирования напряжения БАРН с двумя управляемыми реакторами УР1–УР2.

В рассматриваемой системе управляемые реакторы УР1 и УР2 подключены к отводам регулировочной части первичной обмотки преобразовательного трансформатора, а шкаф автоматического управления напряжением «ШАУН 5» обеспечивает регулирование напряжения за счет подмагничивания и размагничивания управляемых реакторов.

По этой схеме разработаны и испытаны в составе системы БАРН преобразовательные трансформаторы ТДПУ-20000/10, ТДП-16000/10, ТРДП-16000/10 мощностью 20000 и 16000 кВА с первичным напряжением обмотки трансформатора 35 и 10 кВ для схем выпрямления «две обратные звезды с уравнительным реактором», трехфазных мостовых (шестипульсовой и двенадцатипульсовой) [100].



ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока тиристорных мостов; Z_n – полное сопротивление нагрузки, СО, РО – сетевая и регулировочная обмотки ПТ

Рисунок 1.9 – Функциональная схема системы автоматического регулирования напряжения БАРН с двумя управляемыми реакторами УР1–УР2

Регулирование напряжения в трансформаторах производится без ступеней в одном диапазоне с помощью подмагничивания сердечника одного из реакторов,

тем самым уменьшая индуктивное сопротивление его обмоток, и размагничиванием другого, что приводит к увеличению сопротивления этого реактора. Следовательно, если УР1 полностью намагничен, а УР2 размагничен, напряжение питающей сети прикладывается к виткам СО+РО и вторичное напряжение минимально. При размагничивании УР1 и одновременном намагничивании УР2, напряжение сети прикладывается к виткам СО, тем самым увеличивая вторичное напряжение [6].

Система БАРН, представленная на рисунке 1.9, в пределах регулировочной зоны между естественными характеристиками 1 и 2 на рисунке 1.10, позволяет получить внешние стабилизированные характеристики с различным уровнем стабилизации в 20%-ном диапазоне регулирования $w_{PO}=0,2 w_{CO}$ для преобразовательного трансформатора ТДПУ–20000/10 с шестипульсовой схемой выпрямления.

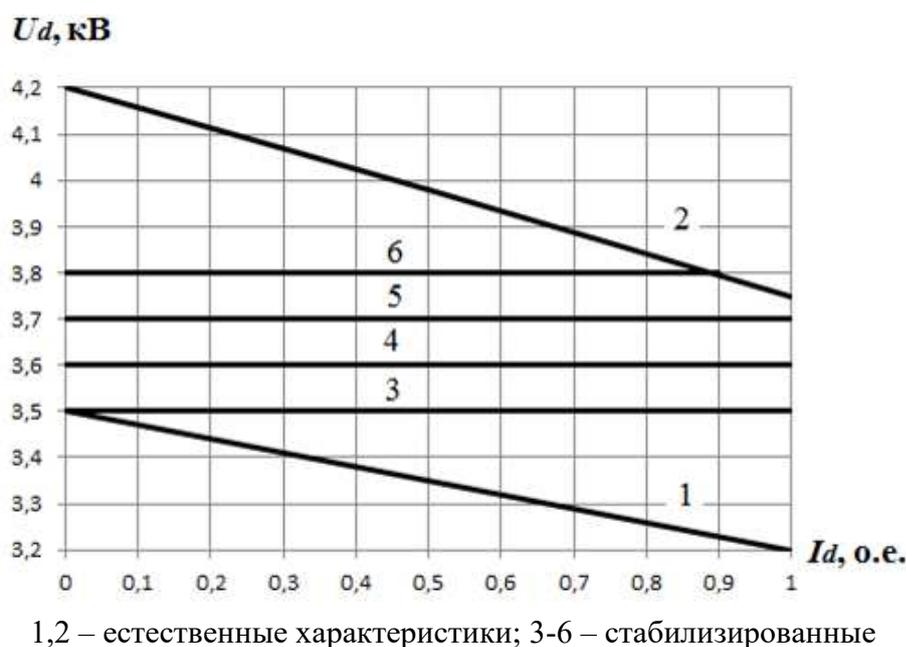


Рисунок 1.10 – Внешние характеристики шестипульсового преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТДПУ–20000/10 в системе БАРН с реакторами УР1–УР2

1.2.7. Реакторное несимметричное устройство с неуправляемым и управляемым реакторами

Следующим этапом развития системы БАРН является замена одного управляемого реактора УР1 реакторного РПН на неуправляемый НР1. На рисунке 1.11 приведена функциональная схема системы автоматического регулирования напряжения БАРН с одним управляемым и одним неуправляемым реакторами.

Регулирование напряжения в трансформаторах производится путем подмагничивания сердечника УР2, а роль НР1 сводится к ограничению циркулирующего тока $I_{\text{ц}}$. Следовательно, если УР2 полностью размагничен, напряжение питающей сети прикладывается к виткам СО+РО и НР1, соответственно вторичное напряжение минимально. При намагничивании УР2, напряжение сети прикладывается к виткам СО, тем самым увеличивая вторичное напряжение.

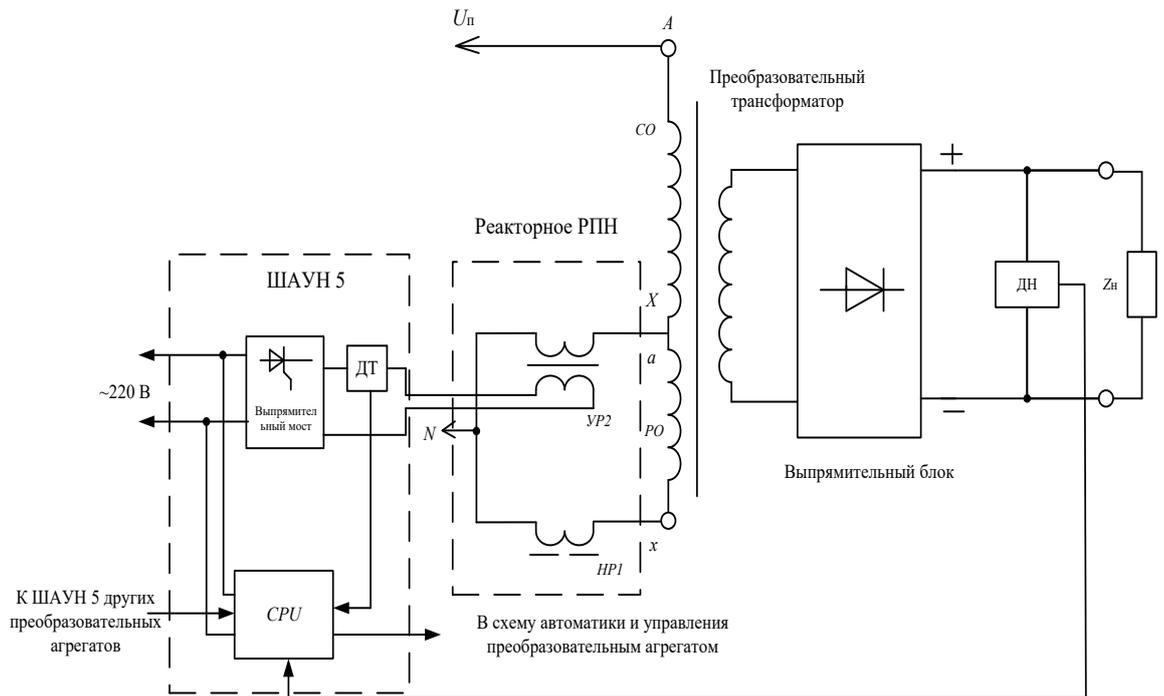


Рисунок 1.11 – Функциональная схема системы автоматического регулирования напряжения БАРН с одним управляемым УР2 и одним неуправляемым НР1 реакторами

Преобразовательный агрегат с преобразовательным трансформатором ТРДП–16000/10 ЖУ1, с реактором РТДП–6300/10 (НР1–УР2) и выпрямительным

блоком с двенадцатипульсовой схемой выпрямления со сниженным 14%-ным [100] диапазоном регулирования $w_{PO}=0,14 w_{CO}$, обеспечивают регулирование в пределах регулировочной зоны между естественными характеристиками 1 и 2 (рисунок 1.12).

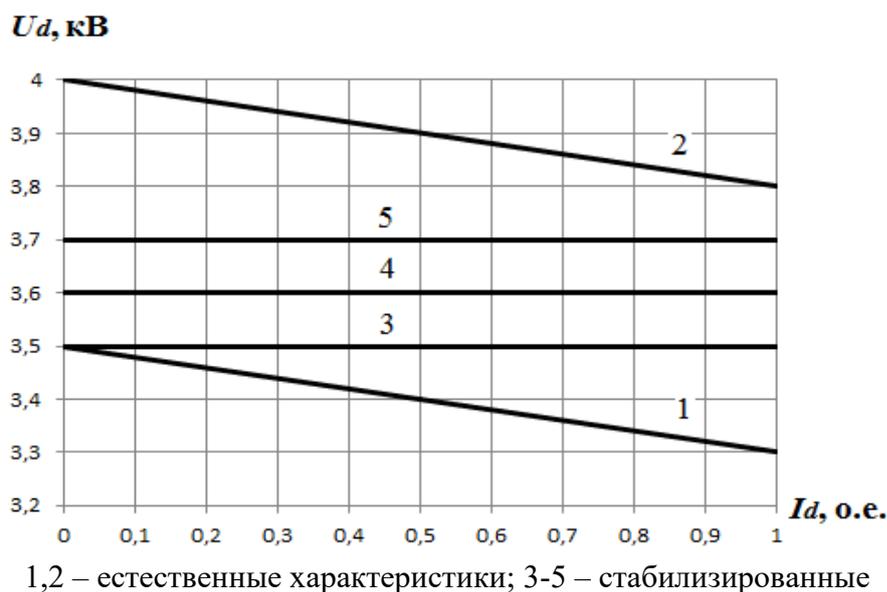


Рисунок 1.12 – Внешние характеристики двенадцатипульсового преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРДП–16000/10 в системе БАРН с реакторами НР1–УР2

1.2.8 Оценка технико-энергетического состояния преобразовательных трансформаторов с реакторными устройствами регулирования напряжения

Применение бесконтактного реакторного способа регулирования обеспечивает высокое качество напряжения, плавное регулирование коэффициента трансформации и высокую надежность за счет отсутствия контакторов. Однако существует и ряд недостатков [7, 8, 48].

Появление в контуре регулировочной обмотки циркулирующего тока $I_{ц}$, имеющего практически индуктивный характер, снижает коэффициент мощности преобразовательного агрегата. Кроме значительной массы и габаритов реактора, существенным фактором, снижающим технико-энергетические и экономические показатели, являются дополнительные потери электрической энергии, вносимые реакторами в работу преобразовательного агрегата [6].

Замена реакторного устройства РПН типа УР1–УР2 на НР1–УР2 позволило существенно уменьшить массогабаритные параметры, повысить коэффициент мощности и снизить потери энергии.

Для повышения технико-энергетических показателей системы БАРН, перспективным направлением дальнейшего развития является применение полупроводниковых приборов в конструкции устройства РПН. Одним из направлений является разработка тиристорно-реакторного переключающего устройства, где УР2 заменяется на тиристорный ключ ТК, а роль НР1 сводится к ограничению циркулирующего тока $I_{ц}$.

1.3 Выводы по первой главе

1. Для системы тягового электроснабжения с 20 %-ным диапазоном регулирования напряжения, рассмотрено применение ступенчатых контакторных устройств РПН с использованием механического переключения отводов регулировочной обмотки трансформатора. Недостатками таких устройств являются необходимость периодической замены контактов переключателя, что усложняет их эксплуатацию и снижает надежность.

2. Приведены материалы использования включения в отводы (с 20 %-ным и 14 %-ным диапазонами) регулировочной обмотки трансформаторов регулируемых и нерегулируемых активно-индуктивных сопротивлений (реакторов). Основными недостатками этих устройств являются значительные потери электроэнергии, большие массогабаритные параметры и высокая стоимость.

3. С целью повышения технико-энергетических показателей переключающих устройств, перспективным направлением их совершенствования является совместное использование в устройстве РПН неуправляемого реактора и полупроводниковых управляемых силовых приборов вместо управляемого реактора.

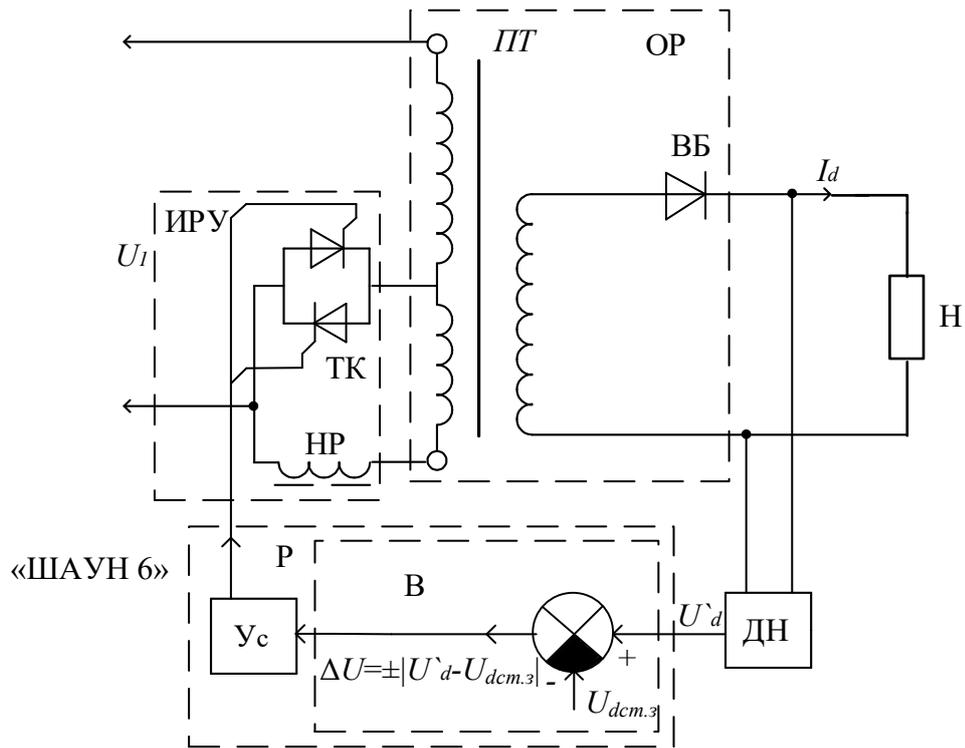
2 НАПРАВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

2.1 Система бесконтактного автоматического регулирования напряжения трансформаторов преобразовательных агрегатов с использованием индуктивных и полупроводниковых приборов

На рисунке 2.1 изображена функциональная схема системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключающим устройством ТРПУ.

Система бесконтактного автоматического регулирования напряжения БАРН с ТРПУ состоит из следующих элементов: преобразовательный агрегат ПА с преобразовательным трансформатором ПТ и выпрямительным блоком ВБ (объект регулирования ОР); тиристорно-реакторное переключающее устройство ТРПУ (исполнительное регулируемое устройство ИРУ); шкаф автоматического управления напряжением «ШАУН 6» (регулятор Р); датчик напряжения ДН для осуществления обратной связи в системе автоматического регулирования напряжения.

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

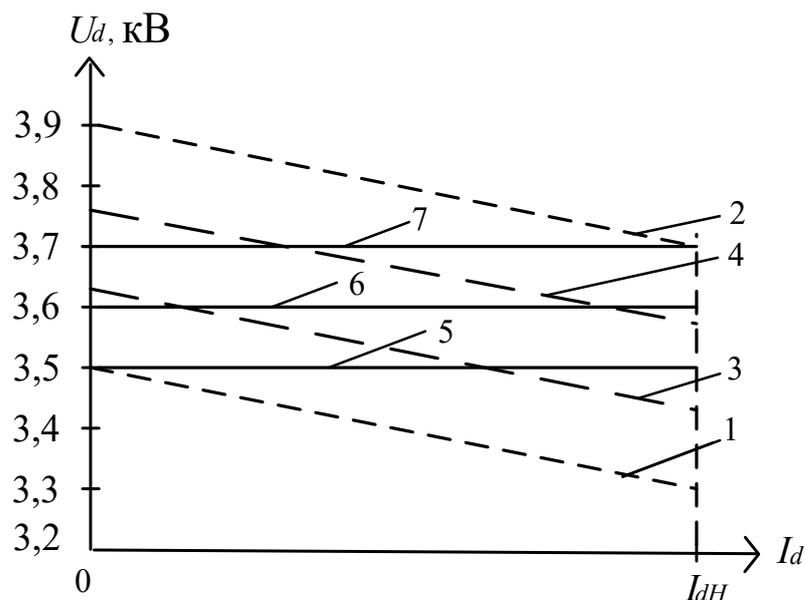


ОР – объект регулирования; ПТ – преобразовательный трансформатор;
 ВБ – выпрямительный блок; Н – нагрузка; ДН – датчик напряжения;
 Р – регулятор; В – вычислительное устройство; У_С – усилитель;
 ИРУ – исполнительное регулируемое устройство

Рисунок 2.1 – Функциональная схема системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения трансформатора преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключающим устройством ТРПУ

Система предназначена для бесконтактного регулирования выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в диапазоне 14 %. [9]. Основные параметры преобразовательного трансформатора ТРСНП–12500/10 представлены в приложении Б.

Вид предполагаемых внешних характеристик преобразовательного агрегата с разрабатываемым ТРПУ к преобразовательному трансформатору ТРСНП–12500/10 показан на рисунке 2.2.



1-4 – естественных характеристики; 5-7 – стабилизированные характеристики

Рисунок 2.2 – Предполагаемые внешние характеристики преобразовательного агрегата с разрабатываемым ТРПУ к преобразовательному трансформатору ТРСНП–12500/10

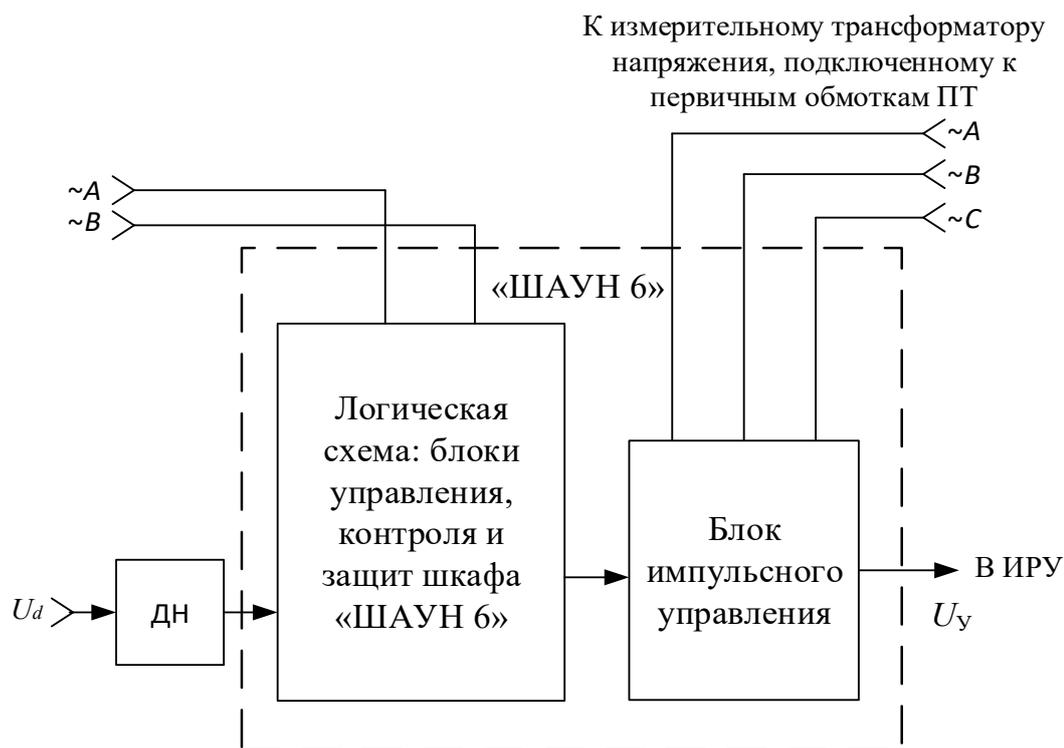
Естественные характеристики 1, 2 соответствуют двум предельным режимам работы системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения с ТРПУ, которые рассматриваются ниже в разделе 2.2. Регулировочная зона располагается между характеристиками 1 и 2.

Изменяя коэффициент трансформации K_T , получим бесчисленное количество промежуточных внешних естественных характеристик вида 3, 4.

Изменяя коэффициент трансформации по закону автоматического перехода с одной естественной характеристики на другую, обеспечивается получение стабилизированных характеристик 5–7.

Система бесконтактного автоматического регулирования напряжения с ТРПУ с трансформатором ТРСНП–12500/10 направлена на обеспечение стабилизации выпрямленного напряжения на уровнях 3500 В, 3600 В и максимального 3700 В.

Функциональная схема шкафа «ШАУН 6» для управления исполнительным регулируемым тиристорно-реакторным переключающим устройством ТРПУ представлена на рисунке 2.3.



U_y – сигнал управления исполнительным регулируемым устройством

Рисунок 2.3 – Функциональная схема шкафа «ШАУН 6» для управления исполнительным регулируемым тиристорно-реакторным переключающим устройством ТРПУ

Блок импульсного управления подключается к измерительному трансформатору напряжения тяговой подстанции для определения интервалов нулевого значения напряжения фаз преобразовательного трансформатора. Для облегчения коммутации тиристорных ключей ТРПУ, передача сигнала управления от шкафа «ШАУН 6» в исполнительное регулируемое устройство ИРУ тиристорно-реакторного переключающего устройства ТРПУ осуществляется в момент нулевого значения напряжения.

2.2 Основные соотношения параметров преобразовательного агрегата с исполнительным регулируемым тиристорно-реакторным переключающим устройством

2.2.1 Симметричные режимы работы ТРПУ

Основным способом регулирования напряжения трансформаторов без нагрузки ПБВ и под нагрузкой РПН принимается способ регулирования коэффициента трансформации с помощью изменения числа витков первичной обмотки.

В рассматриваемой системе бесконтактного автоматического регулирования напряжения с ТРПУ изменение числа витков производится с помощью тиристорно-реакторного переключающего устройства ТРПУ, подключенного к первичной обмотке трехфазного трансформатора (рисунок 2.4).

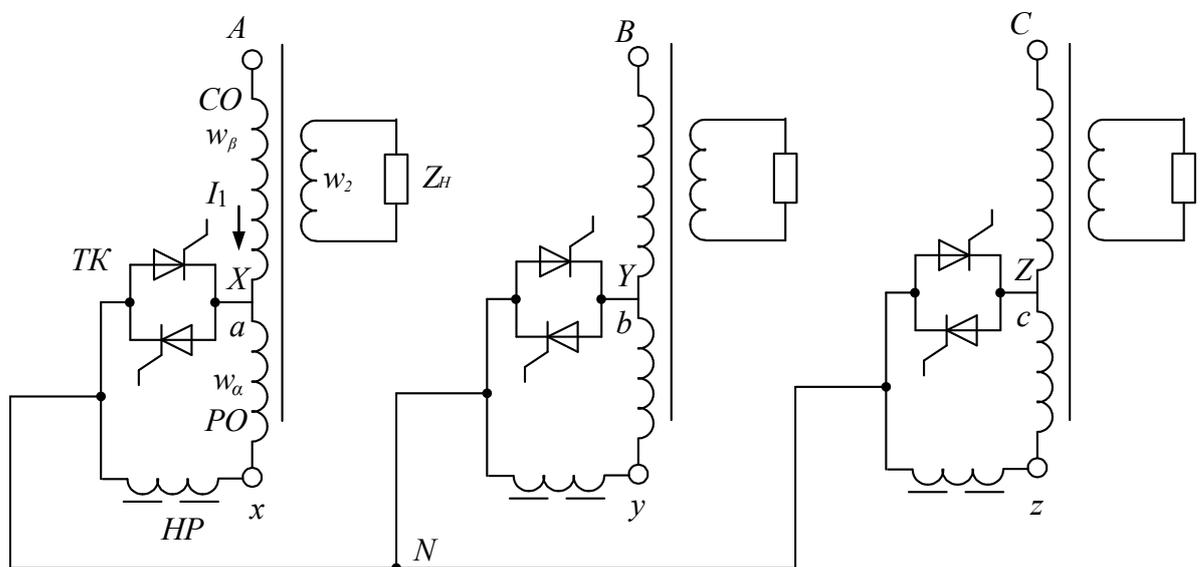


Рисунок 2.4 – Принципиальная электрическая схема соединений ТРПУ с первичными обмотками трехфазного трансформатора

Первичная обмотка трансформатора состоит из последовательно соединенных сетевой СО и регулировочной РО обмоток. К соединению обмоток (первый отвод РО) подключен тиристорный ключ (два встречно-параллельно включенных тиристора) ТК. К второму выводу РО подключен неуправляемый реактор НР,

соединенный с концом ТК, образуя общую точку. Соединение общих точек всех трех фаз образует нейтраль N соединения первичных обмоток с ТРПУ трансформатора.

Коэффициенты трансформации трансформатора: общий с первичной обмоткой $w_\beta + w_\alpha$, отдельные с сетевой w_β и регулировочной w_α представлены формулами:

$$K_1 = \frac{w_\beta + w_\alpha}{w_2} = K_\beta + K_\alpha, \quad (2.1)$$

где $K_\beta = \frac{w_\beta}{w_2}$, $K_\alpha = \frac{w_\alpha}{w_2}$.

Регулируемый коэффициент трансформации [6, 35]:

$$K_\rho = K_\beta + \rho K_\alpha, \quad (2.2)$$

где параметр регулирования

$$\rho = \frac{R_{\text{ТК}}}{Z_\alpha + Z_{\text{НР}} + R_{\text{ТК}}}. \quad (2.3)$$

Полные сопротивления Z обмоток w_β , w_α трансформатора, обмотки $w_{\text{НР}}$ неуправляемого реактора НР состоят, как известно, из активного R и индуктивного X сопротивлений, определяемые расчетным путем [104] или принимаемые из опыта короткого замыкания.

Для упрощения анализа и учитывая, что при работе выпрямительных систем [105] определяющими параметрами являются индуктивные сопротивления, а активными сопротивлениями в силу их незначительных погрешностей, вносимых в расчеты выпрямительных схем, можно пренебречь и представить формулу параметра регулирования (2.3) через индуктивные сопротивления X :

$$\rho = \frac{R_{TK}}{X_{\alpha} + X_{HP} + R_{TK}}. \quad (2.4)$$

Режим работы ТРПУ при регулировании напряжения трансформатора может быть определен двумя идеальными состояниями тиристорного ключа:

$$1) \text{ ТК-закрыт, } R_{TK} = \infty; \rho = 1; K_{\rho_{\text{МАКС}}} = K_{\beta} + K_{\alpha} = K_1;$$

$$U_{20} = \frac{U_{10}}{K_{\rho_{\text{МАКС}}}} = \frac{U_{10}}{K_1} = U_{20_{\text{МИН}}}.$$

$$2) \text{ ТК-открыт, } R_{TK} = 0; \rho = 0; K_{\rho_{\text{МИН}}} = K_{\beta}; \quad (2.5)$$

$$U_{20} = \frac{U_{10}}{K_{\rho_{\text{МИН}}}} = \frac{U_{10}}{K_{\beta}} = U_{20_{\text{МАКС}}}.$$

где U_{10} , U_{20} – первичное и вторичное напряжения преобразовательного трансформатора.

В реальных режимах сопротивление R_{TK} имеет конкретную величину (при открытых ТК - $R_{TK_{\text{МИН}}}$, при закрытых ТК - $R_{TK_{\text{МАКС}}}$) и создает незначительную погрешность при расчете параметра регулирования ρ и, соответственно, коэффициента трансформации K_{ρ} . Поэтому для упрощения расчет энергетических показателей (коэффициент мощности и коэффициент полезного действия) трансформаторной схемы с ТРПУ и расчет сопротивления неуправляемого реактора НР в ТРПУ произведем при идеальном состоянии тиристорного ключа ТК в устройстве ТРПУ.

В режиме закрытого состояния ТК, в схеме цепи нерегулируемой части СО первичной обмотки с числом витков w_{β} находится двухдиагональный мост сопротивлений, в одном плече которого включен тиристорный ключ с большим сопротивлением R_{TK} , в другом – ЭДС E_{α} обмотки w_{α} сопротивлением Z_{α} с последовательно соединенным сопротивлением $Z_{\text{НР}}$ неуправляемого реактора НР. В контуре

E_α с неуправляемым реактором НР и тиристорным ключом ТК протекает незначительный по величине ток, ограниченный большим сопротивлением закрытого тиристорного ключа ТК, поэтому цепью плеча с ТК пренебрегают.

Тогда при закрытых тиристорных ключах ТК электрическая схема трансформаторного агрегата на рисунке 2.4 может быть представлена электрической схемой на рисунке 2.5 трехфазного трансформатора с подключенным в каждой фазе дополнительным сопротивлением в виде НР. Концы трех НР соединены в общую точку, создавая через реакторы схему соединения первичной обмотки «звезда».

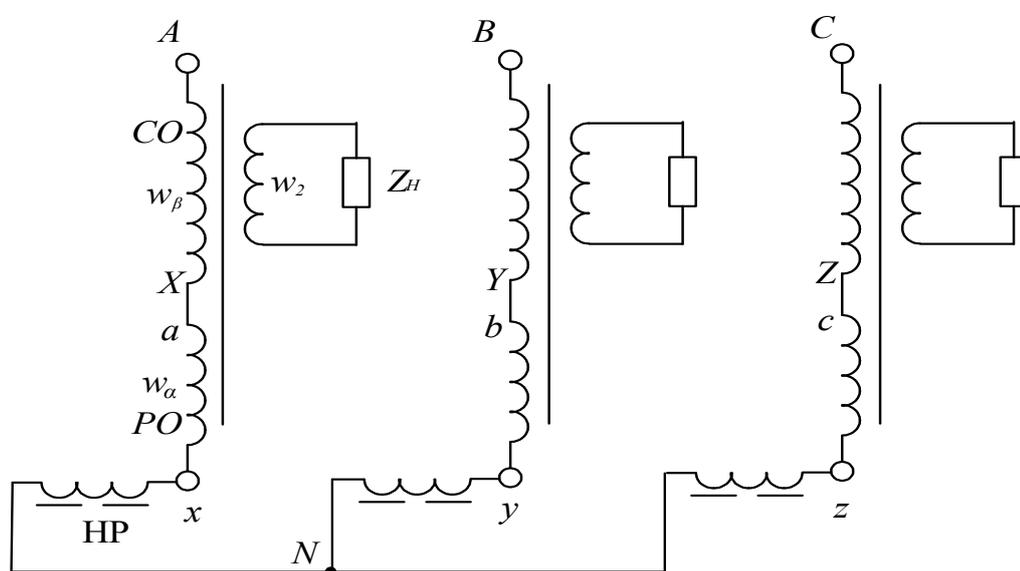


Рисунок 2.5 – Принципиальная электрическая схема соединения СО и РО трехфазного трансформатора и НР при закрытых тиристорных ключах ТРПУ

Основные соотношения одной фазы трансформатора с ТРПУ (например, A) в режиме с закрытым тиристорным ключом представлены в виде известной системы уравнений [6]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_{Ax} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_\alpha + R_\beta) + j(X_\alpha + X_\beta) \dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - jX_2 \dot{I}_2; \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_\beta + w_\alpha}, \\ \dot{U}_{HP} = \dot{I}_1 R_{HP} + jX_{HP} \dot{I}_1, \end{cases} \quad (2.6)$$

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.

$R_{НР}$ – активное сопротивление неуправляемого реактора НР, Ом.

Схему замещения такого трансформатора с включенным в первичную цепь двухдиагональным мостом, составленную на основании известной схемы замещения двухобмоточного трансформатора, представленной на рисунке 2.6,

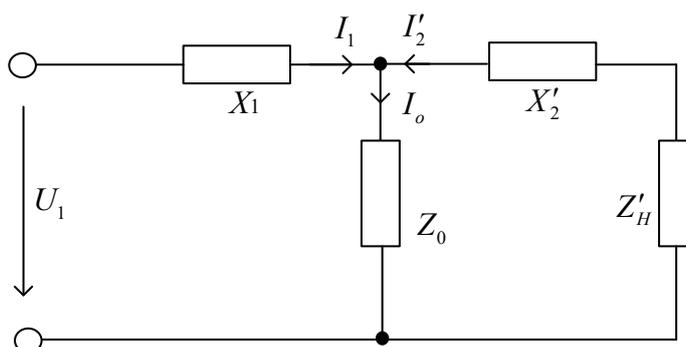


Рисунок 2.6 – Схема замещения двухобмоточного трансформатора без ТРПУ

где сопротивление первичной цепи рассматриваемого трансформатора с ТРПУ (рисунок 2.4):

$$X_1 = X_\beta + \frac{R_{ТК}(X_\alpha + X_{НР})}{X_\alpha + X_{НР} + R_{ТК}}. \quad (2.7)$$

С учетом формулы (2.8), где при идеальном бесконечно большом сопротивлении $R_{ТК}$ получим $\rho = 1$ и сопротивление $X_1 = X_\beta + 1(X_\alpha + X_{НР}) = X_\beta + (X_\alpha + X_{НР})$.

Тогда схема замещения преобразовательного трансформатора с ТРПУ при закрытом ТК имеет вид:

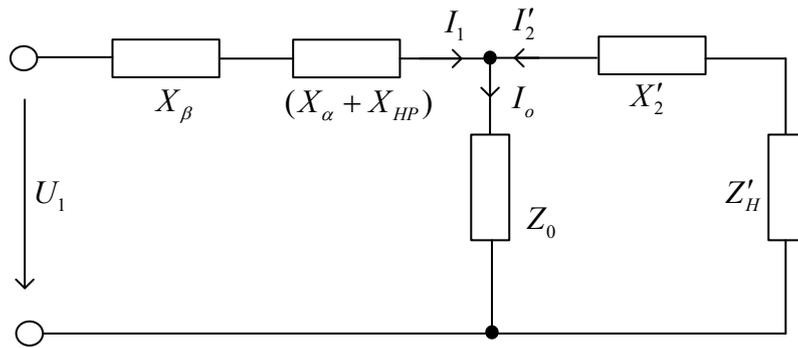


Рисунок 2.7 – Схема замещения двухобмоточного трансформатора с закрытым тиристорным ключом в ТРПУ

Первичный ток I_1 (рисунок 2.4), пренебрегая незначительным током через закрытый ключ ТК, практически полностью протекает по включенным последовательно сетевой СО, регулировочной РО обмоткам и по неуправляемому реактору НР, сопротивление которого увеличивает потери электрической энергии, снижает коэффициент мощности преобразовательного агрегата [35, 104], т.е. ухудшает энергетические показатели преобразовательного агрегата.

Минимальное ухудшение показателей агрегата в режиме закрытого состояния ТК может быть получено при малой величине сопротивления неуправляемого реактора X_{HP} .

В режиме открытого состояния ТК электрическая схема трансформаторного агрегата на рисунке 2.4 может быть представлена электрической схемой на рисунке 2.8 (открытое состояние ключей на рисунке 2.8 показано штриховой линией).

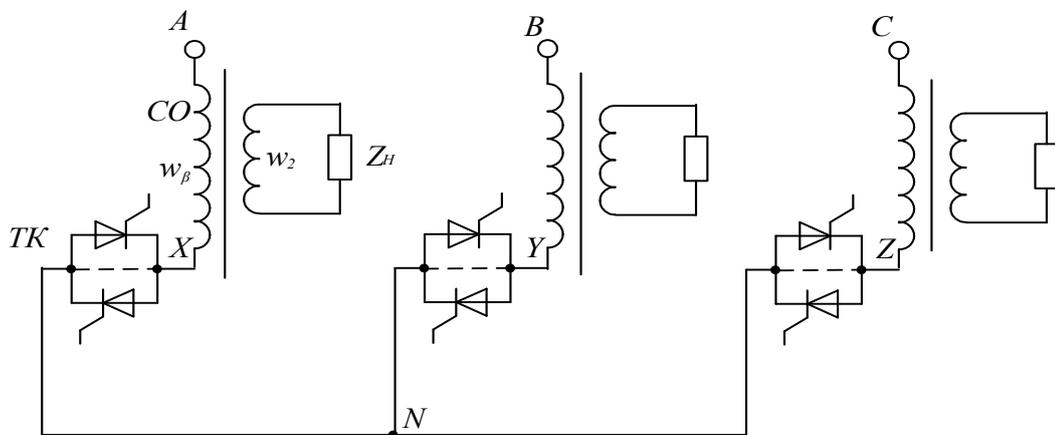


Рисунок 2.8 – Принципиальная электрическая схема соединений сетевых обмоток трансформатора с ТРПУ при открытых тиристорных ключах

Принципиальная электрическая схема для одной фазы трансформатора с ТРПУ при открытом тиристорном ключе с принятым обозначением токов показана на рисунке 2.9.

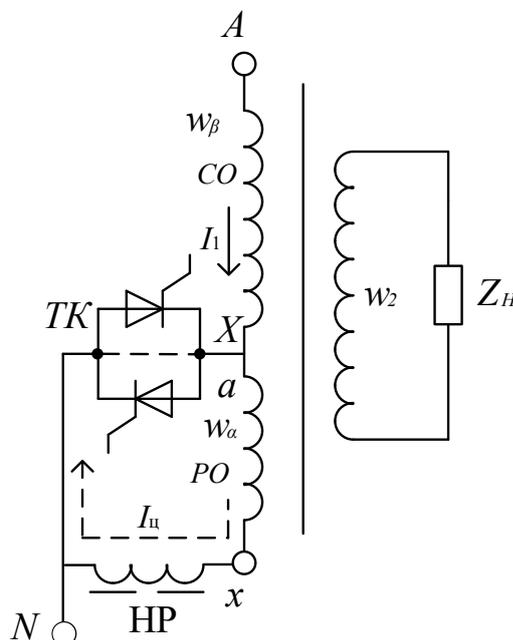


Рисунок 2.9 – Принципиальная электрическая схема двухобмоточного трансформатора с ТРПУ при открытом тиристорном ключе

Основные соотношения одной фазы трансформатора с ТРПУ (например, A) в режиме с открытым тиристорным ключом представлены в виде известной системы уравнений [6]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_{Ax} = -\dot{E}_\beta + \dot{I}_1 Z_\beta + \dot{I}_1 R_{TK} = -\dot{E}_\beta + \dot{I}_1 R_\beta + jX_\beta \dot{I}_1 + \dot{I}_1 R_{TK}; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - jX_2 \dot{I}_2; \\ \dot{U}_{HP} = \dot{E}_\alpha - \dot{I}_\alpha Z_\alpha - \dot{I}_\alpha R_{TK} = \dot{E}_\alpha - \dot{I}_\alpha R_\alpha - jX_\alpha \dot{I}_\alpha - \dot{I}_\alpha R_{TK}; \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_\alpha, \end{cases} \quad (2.8)$$

где $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \frac{1}{K_\beta} = \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_\beta}$.

В режиме открытого состояния ТК напряжение U_1 приложено к обмотке w_β , коэффициент трансформации минимален и равен K_β . Включается в работу регу-

лировочная обмотка РО (рисунок 2.9), в контуре которой с открытым ТК и неуправляемым реактором НР протекает ток третьей (регулирующей РО) обмотки, так называемый циркулирующий ток:

$$I_{ц} = \frac{E_{\alpha}}{X_{\alpha} + X_{НР} + R_{ТК}}. \quad (2.9)$$

величина которого соответствует, в режиме открытого состояния ТК, максимальной величине ЭДС регулировочной обмотки:

$$E_{\alpha} = \frac{K_{\alpha} U_1}{K_{\rho}}, \quad (2.10)$$

или с учетом, что $K_{\rho} = K_{\beta}$:

$$E_{\alpha} = \frac{K_{\alpha} U_1}{K_{\beta}}, \quad (2.11)$$

и определяется сопротивлением неуправляемого реактора $X_{НР}$, величина которого, также как и в режиме закрытого состояния ТК, влияет на энергетические показатели преобразовательного агрегата.

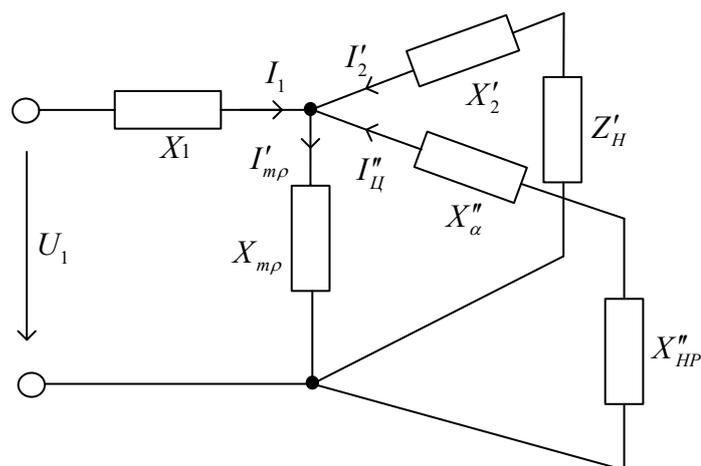


Рисунок 2.10 – Схема замещения трехобмоточного трансформатора при открытом ТК тиристорно-реакторного переключающего устройства

Циркулирующий ток увеличивает намагничивающий ток I_m (рисунок 2.10) на величину:

$$I_{\text{Ц}}'' = \frac{K_\alpha}{K_\beta} I_{\text{Ц}}' = \frac{K_\alpha^2 U_1}{K_\beta^2 (X_\alpha + X_{\text{HP}} + R_{\text{TK}})}, \quad (2.12)$$

откуда суммарный намагничивающий ток $I'_{m\beta}$ равен:

$$I'_{m\beta} = I'_{0\beta} + I_{\text{Ц}}'', \quad (2.13)$$

где

$$I'_{0\beta} = \frac{K_1}{K_\beta} I_0 \quad (2.14)$$

и

$$I'_{m\beta} = \frac{K_1}{K_\beta} I_0 + \frac{K_\alpha^2 U_1}{K_\beta^2 (X_\alpha + X_{\text{HP}} + R_{\text{TK}})}. \quad (2.15)$$

Намагничивающий ток уменьшает величину напряжения сети, приложенного к сетевой обмотке трансформатора w_β :

$$U_1' = U_1 - I'_{m\beta} \left[X_\beta + \frac{(X_\alpha + X_{\text{HP}}) R_{\text{TK}}}{X_\alpha + X_{\text{HP}} + R_{\text{TK}}} \right] = U_1 - \left[\frac{K_1}{K_\beta} I_0 + \frac{K_\alpha^2 U_1}{K_\beta^2 (X_\alpha + X_{\text{HP}} + R_{\text{TK}})} \right] \cdot [X_\beta + \rho (X_\alpha + X_{\text{HP}})].$$

Учитывая, что при открытом ТК сопротивление $R_{\text{TK}} = 0$ и $\rho = 0$, получим:

$$U_1' = U_1 - \left[\frac{K_\alpha^2 U_1}{K_\beta^2 (X_\alpha + X_{\text{HP}})} + I'_{0\beta} \right] X_\beta = U_1 - \left[\frac{K_\alpha^2 U_1 X_\beta}{K_\beta^2 (X_\alpha + X_{\text{HP}})} \right] - I'_{0\beta} X_\beta. \quad (2.16)$$

После преобразования формулы (2.17) получим:

$$U_1' = U_1 \left[1 - \frac{K_\alpha^2 X_\beta}{K_\beta^2 (X_\alpha + X_{\text{HP}})} \right] - I'_{0\beta} X_\beta. \quad (2.17)$$

В формулах (2.16), (2.17) не принимается во внимание сопротивление питающей сети X_c , т.е. считаем что ЭДС источника питания бесконечной мощности и

в этом случае получим реальное соотношение между параметрами трансформатора и сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ при открытом тиристорном ключе ТК.

Среднее значение напряжения холостого хода преобразовательного агрегата:

$$U_{d0} = \frac{K_\epsilon}{K_\beta} \left\{ U_1 \left[1 - \frac{K_\alpha^2 X_\beta}{K_\beta^2 (X_\alpha + X_{HP})} \right] - I'_{0\beta} X_\beta \right\}, \quad (2.18)$$

где K_ϵ – коэффициент зависимости U_{d0} от действующего значения фазового напряжения вентильной (вторичной) обмотки E_2 (коэффициент выпрямления, равный при трехфазной мостовой двенадцатипульсовой схеме выпрямителя $K_\epsilon = 4,68$).

Известное [105] аналитическое выражение среднего значения выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором без ТРПУ:

$$U_d = U_{d0} - \Delta U_\gamma - \Delta U_R - \Delta U_B = U_{d0} - \frac{3I_d X''}{\pi} - \Delta U_R - \Delta U_B, \quad (2.19)$$

где $\Delta U_R, \Delta U_B$ – падение напряжения в активных сопротивлениях схемы и в вентильных выпрямительного блока, В;

X'' – индуктивное сопротивление обмоток трансформатора, отнесенное к вентильной обмотке:

$$X'' = \frac{U_K U_{1H}}{I_{1H} K_T^2 100}, \quad (2.20)$$

где U_K – напряжение короткого замыкания трансформатора, В.

Индуктивное сопротивление обмоток трансформатора может быть определено расчетным путем с использованием аналитических методов В. Роговского – Е. Г. Маркварда или Г. Н. Петрова [104]. С допустимой для практических расчетов

погрешностью, определение индуктивных сопротивлений производится с использованием опыта короткого замыкания. Для сетевой обмотки с витками w_β соответствует напряжение короткого замыкания $U_{K\beta}$, для первичной обмотки с витками $(w_\beta + w_\alpha)$ соответствует $U_{K(\beta+\alpha)}$.

В расчетах пренебрегают активной составляющей напряжения короткого замыкания U_{Ka} ввиду ее малости и используют реактивную составляющую U_{KP} (реактанс). Так, например, в 12-ти пульсовой схеме выпрямления для трансформатора ТРДП-16000/10 с числом витков $(w_\beta + w_\alpha)$ напряжение $U_{K(\beta+\alpha)} = 9,55 \%$, активная составляющая $U_{Ka} = 0,65 \%$, реактивная $U_{KP} = 9,53 \%$.

Индуктивная потеря напряжения ΔU_γ , определяемая условиями цепей коммутации выпрямительной схемы зависит от индуктивных сопротивлений вентильной обмотки X_2 и индуктивного сопротивления цепей первичной обмотки, приведенных к вентильной обмотке.

В рассматриваемом режиме, когда в ТРПУ открыт тиристорный ключ ТК, в процессе коммутации участвует сетевая обмотка с числом витков w_β . Тогда индуктивное сопротивление цепи коммутации:

$$X_a = \frac{1}{K_\beta^2} X_\beta + X_2, \quad (2.21)$$

выпрямленное напряжение

$$U_d = \frac{K_\epsilon}{K_\beta} \left\{ U_1 \left[1 - \frac{K_\alpha^2 X_\beta}{K_\beta^2 (X_\alpha + X_{HP})} \right] - I_{0\beta} X_\beta \right\} - K_{CX} I_d X_a - \Delta U_R - \Delta U_B, \quad (2.22)$$

где K_ϵ, K_{CX} – коэффициенты, определяемые схемой выпрямления [105], (для трехфазной мостовой двенадцатипульсовой схемы, например, $K_\epsilon = 4,68$; $K_{CX} = \frac{6}{\pi}$).

Активное падение напряжения во всех нелинейных элементах схемы:

$$\Delta U_R = \frac{\Delta P}{I_d}, \quad (2.23)$$

где $\Delta P = \Delta P_{T\rho} + \Delta P_{CV} + \Delta P_{ТРИУ\rho}$, Вт.

Потери мощности в преобразовательном трансформаторе ΔP_T складываются из потерь в стали (потери холостого хода – ΔP_0) и потерь в меди (потери короткого замыкания – ΔP_K).

$$\Delta P_{T\rho} = \Delta P_{0\rho} + \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2 \Delta P_K. \quad (2.24)$$

Потери холостого хода преобразовательного трансформатора определяются из выражения:

$$\Delta P_{0\rho} = \left(\frac{K_1}{K_\rho} \right)^2 \Delta P_0, \quad (2.25)$$

где ΔP_0 – активные потери в стали трансформатора при условии, что напряжение сети U_1 приложено к максимальному числу витков первичной обмотки трансформатора $w_1 = w_\beta + w_\alpha$, Вт.

Потери в меди преобразовательного трансформатора:

$$\Delta P_{K\rho} = \left(\frac{K_1}{K_\rho} \right)^2 \Delta P_K, \quad (2.26)$$

где ΔP_K – мощность короткого замыкания при условии, что напряжение сети U_1 приложено к максимальному числу витков первичной обмотки трансформатора $w_1 = w_\beta + w_\alpha$, Вт

Потери в ТРПУ $\Delta P_{ТРИУ\rho}$ включают в себя потери от протекания циркулирующего тока $I_{ц}$ в режиме работы ТРПУ с открытыми тиристорными ключами ТК, и потери при протекании через неуправляемый реактор НР тока нагрузки I_1 трансформатора в режиме работы ТРПУ с закрытыми тиристорными ключами ТК:

$$\Delta P_{\text{ТРПУ}\rho} = 3((1-\rho)I_{\text{ц}}^{\prime 2}(R_{\text{ТК}} + R_{\alpha} + R_{\text{HP}}) + \rho I_1^2 R_{\text{HP}}) \cdot 10^{-3}. \quad (2.27)$$

Потери мощности в сглаживающем реакторе ΔP_{CV} определяются по следующему выражению:

$$\Delta P_{\text{CV}} = I_d^2 R_{\text{CV}}, \quad (2.28)$$

где R_{CV} – активное сопротивление сглаживающего реактора, Ом.

Потери напряжения в вентилях выпрямительного блока определяются по выражению:

$$\Delta U_B = p \cdot s(U_{(TO)} + r_T \frac{K_{\text{CX}} I_d}{3a}), \quad (2.29)$$

где p – число последовательно работающих вентильных плеч;

s, a – число последовательно и параллельно соединенных диодов (тиристоров) в плече;

$U_{(TO)}$ – пороговое напряжение диода (тиристора), В;

r_T – динамическое сопротивление диода (тиристора), Ом.

В общем случае работы ТРПУ в двух режимах состояния тиристорного ключа ТК формула (2.22) среднего значения выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором с регулируемым ТРПУ отличается от формулы (2.19) такого же напряжения преобразовательного агрегата с трансформатором без ТРПУ наличием неуправляемого реактора, подключенного параллельно РО преобразовательного трансформатора и играющего роль нагрузки, которая в формуле (2.22) представлена в виде сопротивления неуправляемого реактора X_{HP} .

2.2.2 Несимметричные режимы работы ТРПУ

Рассмотренные режимы работы ТРПУ при регулировании напряжения трансформатора (рисунки 2.5 и 2.8) называются симметричными. К несимметричным относятся режимы: когда тиристорный ключ ТК открыт только в одной фазе (любой) или открыты ключи ТК одновременно в двух фазах (любых), что соответствует теории пофазного регулирования напряжения, рассмотренного в [35, 106].

Принципиальные электрические схемы соединений первичных обмоток трехфазного трансформатора с ТРПУ в несимметричных режимах показаны на рисунке 2.11.

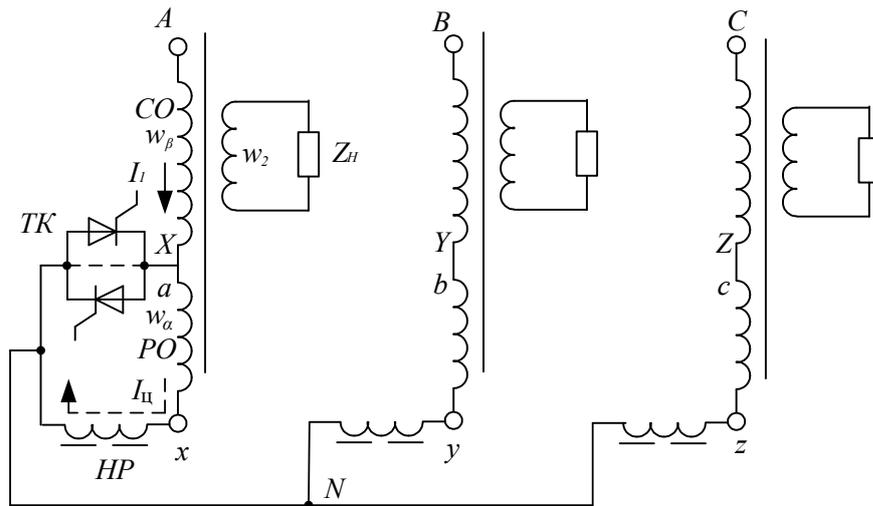
Расчет среднего значения выпрямленного напряжения холостого хода преобразовательного агрегата в несимметричных режимах работы трансформатора с ТРПУ зависит от количества открытых $N_{ОТК}$ и закрытых $N_{ЗАКР}$ тиристорных ключей ТК и, с учетом формул (2.7) и (2.18), определяется по формуле:

$$U_{d0} = \frac{(N_{ОТК} U_{d0_{МАКС}} + N_{ЗАКР} U_{d0_{МИН}})}{3} = \frac{K_B}{3} \left(N_{ОТК} \frac{U'_1}{K_\beta} + N_{ЗАКР} \frac{U_1 - I_{0\rho} (X_\beta + \rho(X_\alpha + X_{HP}))}{K_1} \right), \quad (2.30)$$

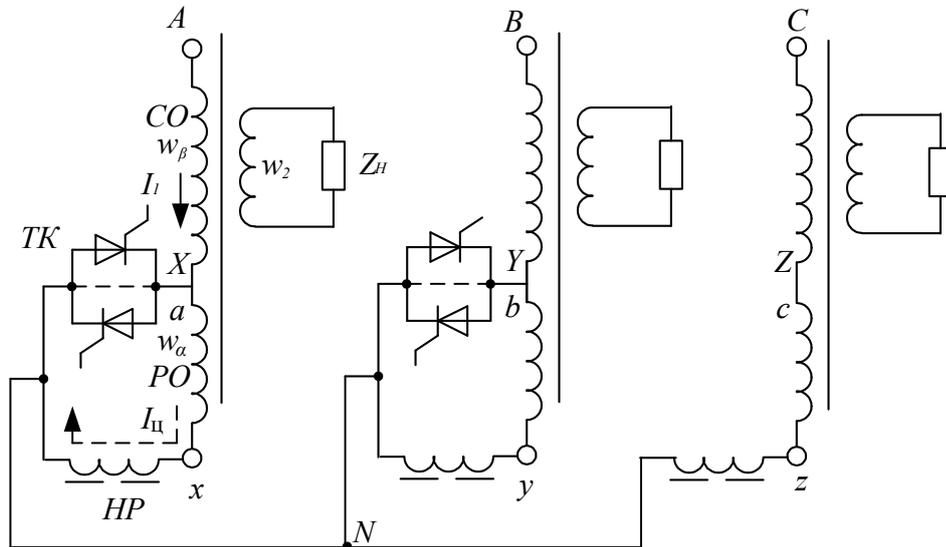
где $N_{ОТК}, N_{ЗАКР}$ – число открытых и закрытых тиристорных ключей ТК в ТРПУ соответственно;

$U_{d0_{МАКС}}, U_{d0_{МИН}}$ – среднее значение выпрямленного напряжения холостого хода преобразовательного агрегата в режиме работы ТРПУ с открытыми и закрытыми тиристорными ключами ТК соответственно, В.

а)



б)



а – при одном открытом тиристорном ключе ТК (в фазе *A*);

б – при двух открытых тиристорных ключах ТК (открыты в фазах *A* и *B*)

Рисунок 2.11 – Принципиальная электрическая схема соединений первичных обмоток трехфазного трансформатора с ТРПУ в несимметричных режимах

С учетом формул (2.19) и (2.22), среднее значение выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата, при работе ТРПУ в несимметричных режимах определяется по формуле:

$$U_d = \frac{N_{\text{ОТК}} U_{d_{\text{МАКС}}} + N_{\text{ЗАКР}} U_{d_{\text{МИН}}}}{3}. \quad (2.31)$$

2.3 Определение основных параметров неуправляемого реактора тиристорно-реакторного переключающего устройства

2.3.1 Общие положения

К основным параметрам НР относятся его сопротивление $X_{НР}$, рабочий фазный ток $I_{ФР}$, рабочее фазное напряжение $U_{ФР}$ и полная рабочая мощность S_p .

Значение тока $I_{ФР}$ соответствует номинальному току $I_{1Н}$ преобразовательного трансформатора ТРСНП–12500/10 с числом витком $w_\alpha + w_\beta$. Напряжение $U_{ФР}$ соответствует напряжению РО преобразовательного трансформатора. Зная эти величины, не сложно определить и полную рабочую мощность S_p .

Параметры неуправляемого реактора ТРПУ в составе ПА с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры неуправляемого реактора ТРПУ

Параметр	Значение
Рабочий фазный ток $I_{ФР}$, А	630
Рабочее фазное напряжение $U_{ФР}$, В	760
Полная рабочая мощность S_p , кВА	1440

Определить же рациональное сопротивление неуправляемого реактора $X_{НР}$ значительно сложнее. В режиме работы ТРПУ с закрытыми тиристорными ключами, неуправляемый реактор играет роль дополнительного сопротивления, препятствующего протеканию тока нагрузки, следовательно, рациональная величина сопротивления должна стремиться к нулю ($X_{НР} = 0$). С другой стороны, при открытых тиристорных ключах, для снижения потребляемой преобразовательным агрегатом потерь мощности, неуправляемый реактор должен максимально ограничивать циркулирующий ток. В этом случае величина сопротивления реактора стремится к бесконечности ($X_{НР} = \infty$) [6, 107].

Соответственно, из всего множества значений $X_{НР}$ необходимо найти рациональную величину.

Как было отмечено в разделе 2.2, неуправляемый реактор в ТРПУ влияет на энергетические показатели (коэффициент мощности и коэффициент полезного действия) преобразовательного агрегата. Тогда расчет сопротивления неуправляемого реактора может быть получен в первом варианте при расчете коэффициента мощности, и во втором варианте – при расчете потерь мощности преобразовательного агрегата.

2.3.2 Методика расчета рационального по коэффициенту мощности значения сопротивления неуправляемого реактора

Коэффициент мощности преобразовательного агрегата при наличии полупроводникового выпрямителя большой катодной индуктивности определяется уравнением следующего вида:

$$\mu = F_1 \cos \varphi_{1(1)}, \quad (2.32)$$

- где $F_1 = I_{1(1)} / I_1$ – коэффициент искажения формы кривой сетевого тока I_1 , вносимый выпрямителем;
- $I_{1(1)}$ – основная гармоника сетевого тока, А;
- $\varphi_{1(1)} = \alpha + \frac{2}{3} \gamma$ – угол между основной гармоникой сетевого тока и напряжением, эл. градусы;
- α, γ – углы задержки и коммутации тока вентилей коммутирующих фаз вентильной обмотки трансформатора, эл.градусы.

Угол задержки появляется при регулировании напряжения с помощью управляемых полупроводниковых устройств. Известно, что в первом режиме работы вентилей выпрямителя, характеризуемого наибольшим значением коэффициента мощности, угол коммутации γ изменяется от 0 до 60 электрических градусов.

Этот режим находится в диапазоне:

$$0 \leq \frac{I_d X_a}{\sqrt{m} E_2} \leq 1,225,$$

и определяется уравнением

$$\cos \gamma = 1 - \frac{I_d X_a}{\sqrt{m} E_2}. \quad (2.33)$$

Таким образом, угол коммутации вентилей и, соответственно, выпрямленное напряжение и коэффициент мощности преобразователя зависят от состояния тиристорного ключа и сопротивления X_{HP} неуправляемого реактора.

Действующее значение основной гармоники сетевого тока определяется по известной формуле [7]:

$$I'_{1(1)\rho} = \sqrt{\left(\frac{K_{CX} I_d}{K_\rho}\right)^2 + (I'_{m\rho})^2 + 2 \frac{K_{CX} I_d}{K_\rho} I'_{m\rho} \cos\left(90 - \frac{2}{3}\gamma\right)}. \quad (2.34)$$

Значение коэффициента сдвига $\cos \varphi_{1(1)}$ определяется по формуле:

$$\cos \varphi_{1(1)} = \frac{P_1}{S_{1(1)}}, \quad (2.35)$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая преобразовательным агрегатом из питающей сети, Вт;

$S_{1(1)}$ – полная мощность, потребляемая преобразовательных агрегатом из питающей сети, ВА.

Полная мощность, потребляемая из сети одной фазой преобразовательного трансформатора в составе преобразовательного агрегата с ТРПУ равна:

$$S_{1(1)\rho} = (U_C - I'_{1(1)\rho} X_C) I'_{1(1)\rho} \cdot 10^{-3}, \quad (2.36)$$

где U_C – напряжение питающей сети, В;

X_C – сопротивление питающей сети, Ом.

Полная мощность, потребляемая из сети преобразовательным агрегатом с ТРПУ:

$$S_{1(1)} = N_{\text{ОТК}} S_{1(1)\beta} + N_{\text{ЗАКР}} S_{1(1)(\beta+\alpha)}, \quad (2.37)$$

где $S_{1(1)\beta}, S_{1(1)(\beta+\alpha)}$ – полная мощность, потребляемая одной фазой преобразовательного трансформатора в составе преобразовательного агрегата с ТРПУ в режиме работы ТРПУ с открытыми и закрытыми тиристорными ключами ТК соответственно, рассчитанная по формуле (2.36), ВА.

Активная мощность P_1 , потребляемая преобразовательным агрегатом из сети, определяется по формуле:

$$P_1 = (U_d + \Delta U_B + \Delta U_{CY}) I_d \cdot 10^{-3} + \Delta P_{0\rho} + \frac{I_d}{I_{dH}} (\Delta P_{K\rho}) + \Delta P_{\text{ТРИУ}\rho} + \Delta P_{\text{ОХ}} + \Delta P_{\text{У}}, \quad (2.38)$$

где $\Delta P_{\text{ОХ}}, \Delta P_{\text{У}}$ – активные потери мощности на охлаждение и управление, Вт.

Из формул (2.21), (2.22), (2.32), (2.33) следует, что максимальный коэффициент мощности преобразователя с регулированием выпрямленного напряжения ТРПУ наблюдается при минимальных значениях сопротивления $(1-\rho)R_{\text{ТК}}$.

Однако с уменьшением $(1-\rho)R_{\text{ТК}}$ при малых нагрузках преобразователя наблюдается снижение косинуса фи $\cos \varphi_{1(1)}$. Такое снижение вызвано увеличением потерь реактивной мощности за счет наличия в контуре регулировочной обмотки и неуправляемого реактора циркулирующего тока $I_{\text{Ц}}$.

Чем меньше сопротивление $(1-\rho)R_{\text{ТК}}$, тем больше намагничивающий ток трансформатора и тем меньше $\cos \varphi_{1(1)}$. Снижение $\cos \varphi_{1(1)}$ существует также у преобразователей с трансформаторами обычной конструкции. Максимальное значение $\cos \varphi_{1(1)}$ у таких трансформаторов наблюдается при нагрузках 0,3–0,5 от номинальной и снижается относительно этого максимума как при уменьшении, так и

при увеличении тока нагрузки преобразователя. С ростом нагрузки преобразователя $\cos \varphi_{1(1)}$ снижается из-за возрастания угла коммутации. Для рассматриваемого преобразователя наибольший $\cos \varphi_{1(1)}$ обеспечивается значениями сопротивлений X_{HP} , R_{TK} , при которых намагничивающий ток и угол коммутации минимальны. В первом режиме работы вентилей $\cos \varphi_{1(1)}$ будет наибольшим при максимальном значении X_{HP} и одновременно минимальной величине $(1-\rho)$.

Методика расчета рациональной по $\cos \varphi_{1(1)}$ (а значит и по коэффициенту мощности μ), величины сопротивления неуправляемого реактора X_{HP} произведен с использованием решения задач теории оптимального управления на основании последовательного перебора возможных вариантов поведения системы.

В методике для каждой точки внешней естественной характеристики перебираются различные значения сопротивлений. Вид предполагаемых естественных внешних характеристик преобразовательного агрегата с разрабатываемым ТРПУ к преобразовательному трансформатору ТРСНП-12500/10 показан на рисунке 2.12.

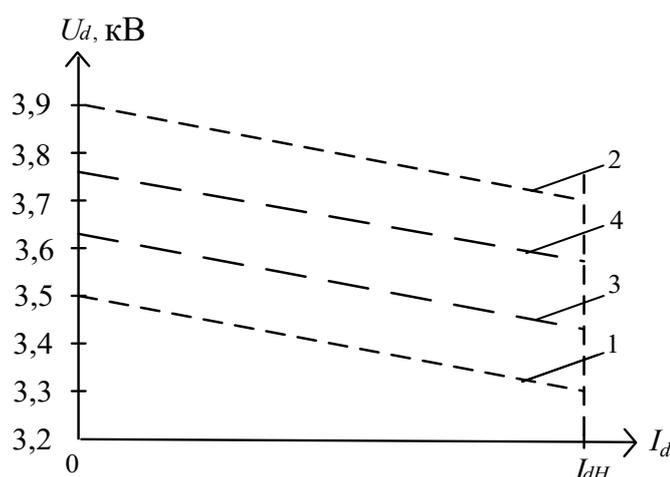


Рисунок 2.12 – Предполагаемые естественные внешние характеристики ПА с разрабатываемым ТРПУ к преобразовательному трансформатору ТРСНП–12500/10

В расчетах 1, 2, 3, 4 диапазон изменения тока нагрузки I_d преобразовательного агрегата принимается равным от 0 до номинального значения преобразовательного агрегата $I_{dH} = 3150$ А с шагом $\Delta I_d = 500$ А.

Диапазон изменения сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ принимается равным от 1 до 3 Ом с шагом $\Delta X_{HP} = 0,5$ Ом.

Минимальное предельное значение диапазона изменения сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ определяется исходя из величины циркулирующего тока $I_{Ц}$, которая не должна превышать значение номинального тока нагрузки преобразовательного трансформатора I_{IH} . В соответствии с формулой (2.9), для преобразовательного трансформатора ТРСНП–12500/10, величина циркулирующего тока $I_{Ц}$ не превышает номинальное значение тока первичной обмотки трансформатора $I_{IH} = 626$ А при сопротивлении HP $X_{HP} \geq 1,2$ Ом.

Максимальное предельное значение диапазона изменения сопротивления неуправляемого реактора не ограничено и определяется исходя из предполагаемого рационального значения сопротивления реактора.

Принятые шаги изменения тока нагрузки преобразовательного агрегата ΔI_d и сопротивления неуправляемого реактора ΔX_{HP} ТРПУ определены исходя из опыта проведения аналогичных расчетов, и уменьшение шага приведет к незначительному увеличению точности полученных результатов, однако значительно увеличит время и объем расчетов.

Методика расчета рационального по коэффициенту мощности значения сопротивления неуправляемого реактора включает в себя три этапа.

На первом этапе производится расчет внешних предельных естественных характеристик 1 и 2 (U_{dMIN} и U_{dMAKS}) (рисунок 2.12) симметричных режимов работы ТРПУ, а также действующего значения основной гармоники сетевого тока $I'_{1(1)\rho}$ и полной мощности $S_{1(1)\rho}$, потребляемой из сети одной фазой преобразовательного

трансформатора в составе преобразовательного агрегата с ТРПУ, при различных сопротивлениях неуправляемого реактора.

Схема алгоритма расчета внешних предельных естественных характеристик 1 и 2, действующего значения основной гармоники сетевого тока $I'_{1(1)\rho}$ и полной мощности $S_{1(1)\rho}$ при различных значениях сопротивления неуправляемого реактора представлена на рисунке 2.13.

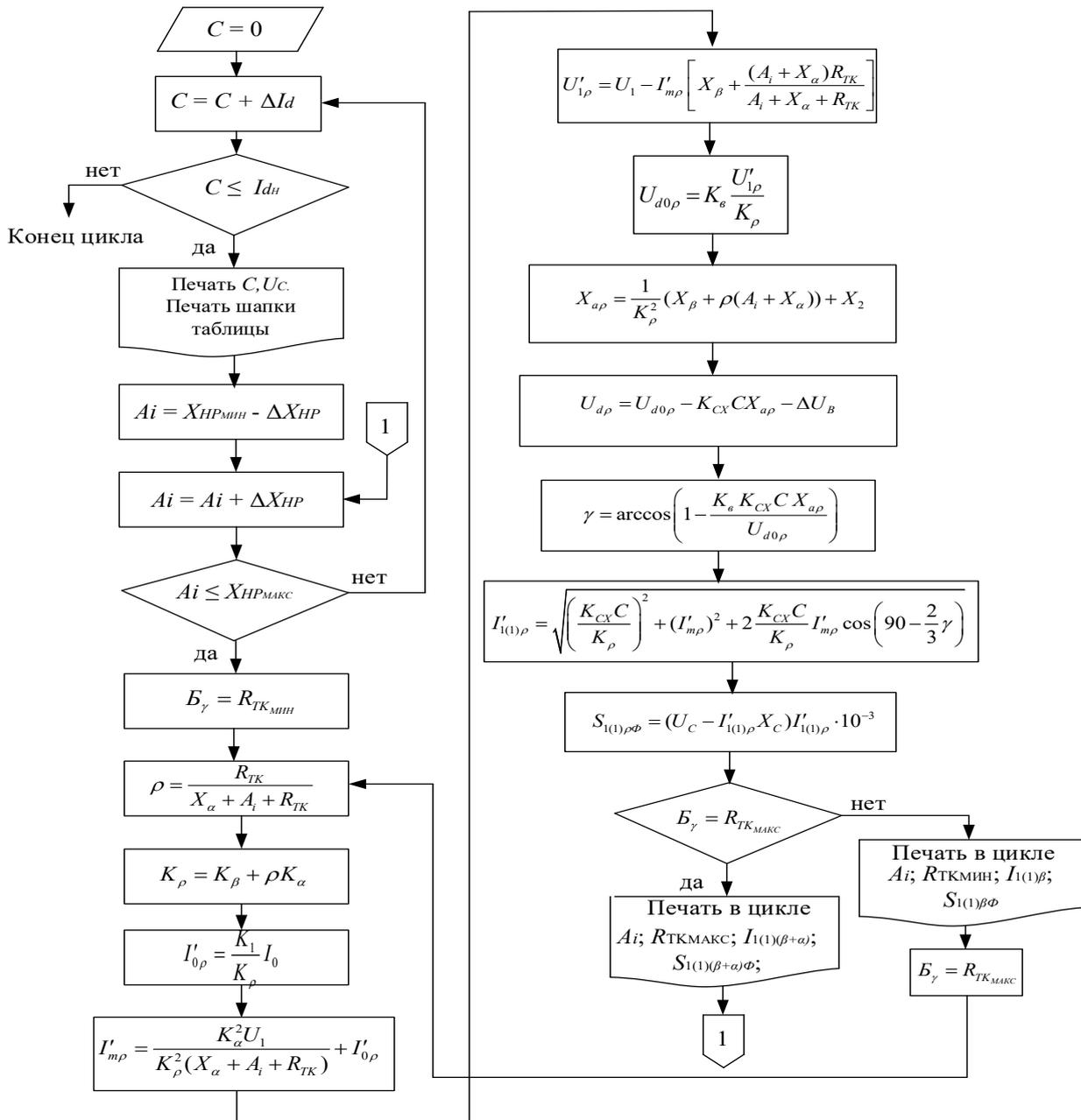


Рисунок 2.13 – Схема алгоритма первого этапа методики расчета рационального по коэффициенту мощности значения сопротивления неуправляемого реактора

В результате проведенных расчетов на первом этапе методики, получаем семейство графиков зависимости выпрямленного напряжения $U_{di} = f(I_d)$ от тока нагрузки преобразовательного агрегата, определяемое сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ, для внешних характеристик 1 и 2 и которые представлены на рисунке 2.14.

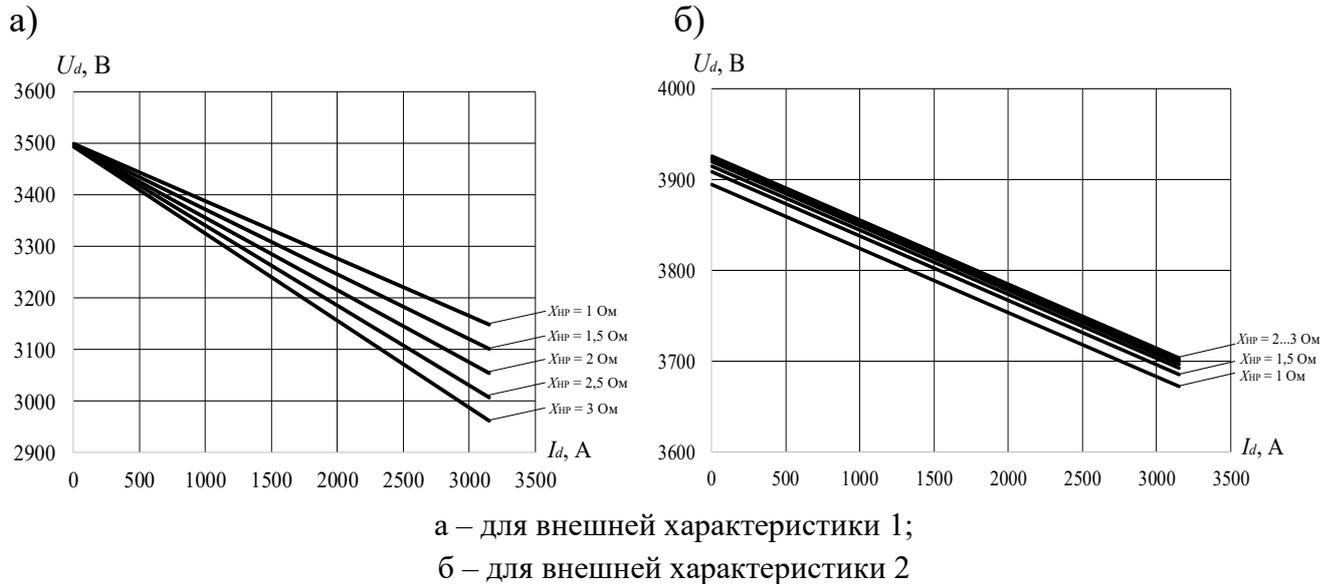


Рисунок 2.14 – Семейство графиков зависимости выпрямленного напряжения $U_{di} = f(I_d)$ от тока нагрузки преобразовательного агрегата, определяемое сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ

В соответствии с представленным алгоритмом (рисунок 2.13) производится расчет зависимостей действующего значения основной гармоники сетевого тока $I'_{1(1)p} = f(I_d)$, а затем и полной мощности $S_{1(1)p} = f(I_d)$ от тока нагрузки преобразовательного агрегата для семейств $I'_{1(1)pi} = f(I_d)$, $S_{1(1)pi} = f(I_d)$, которые определяются сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ.

На основании полученных на первом этапе результатов расчетов для семейств $U_{di} = f(I_d)$, $I'_{1(1)pi} = f(I_d)$, $S_{1(1)pi} = f(I_d)$, на втором этапе производится расчет внешних промежуточных естественных характеристик 3 и 4 (рисунок 2.12) – несимметричных режимов работы ТРПУ, и соответствующих им значений $\cos \varphi_{1(1)}$ при различных сопротивлениях неуправляемого реактора.

Схема алгоритма расчета внешних промежуточных естественных характеристик 3 и 4, и $\cos \varphi_{1(1)}$ представлена на рисунке 2.15.

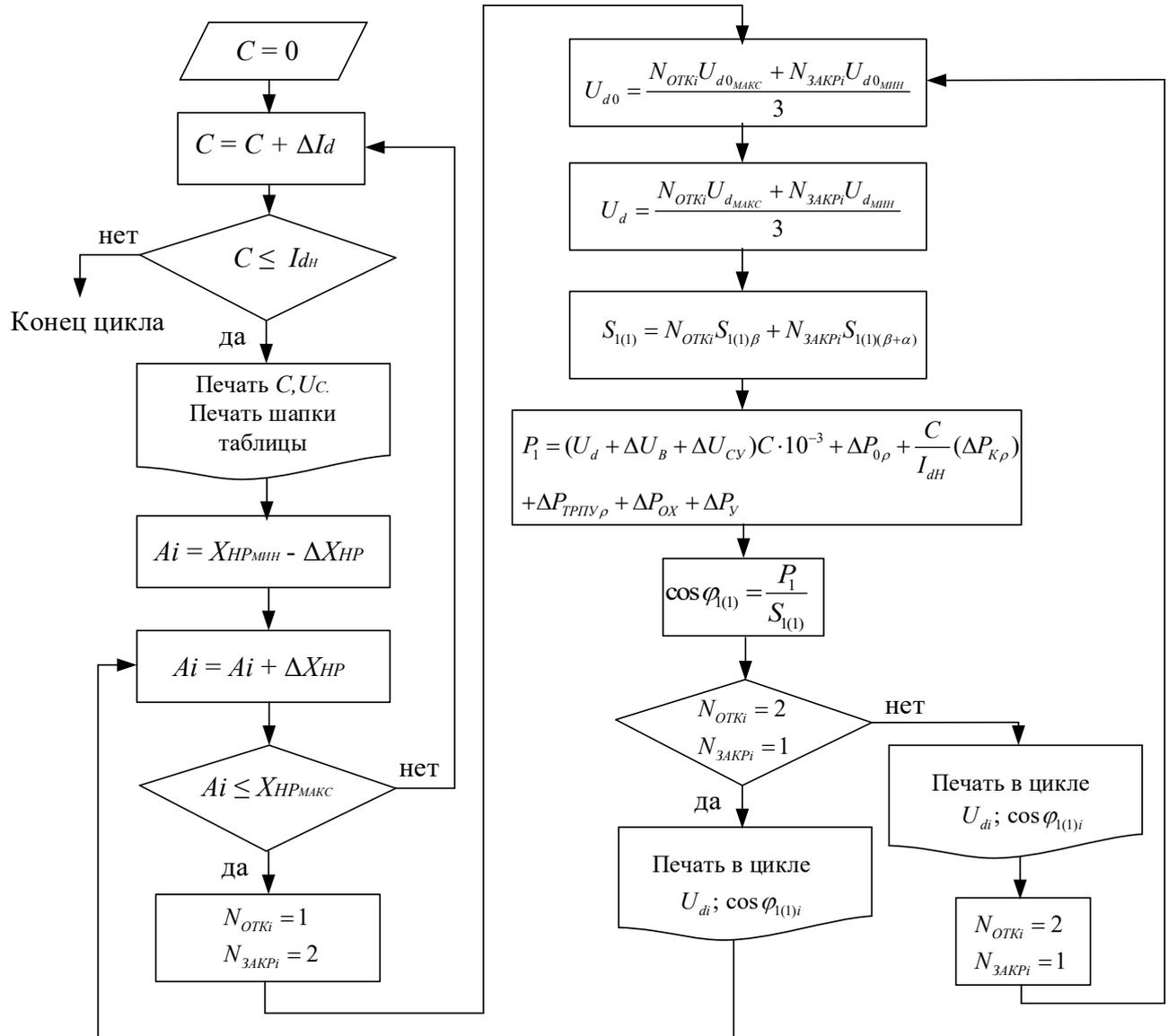
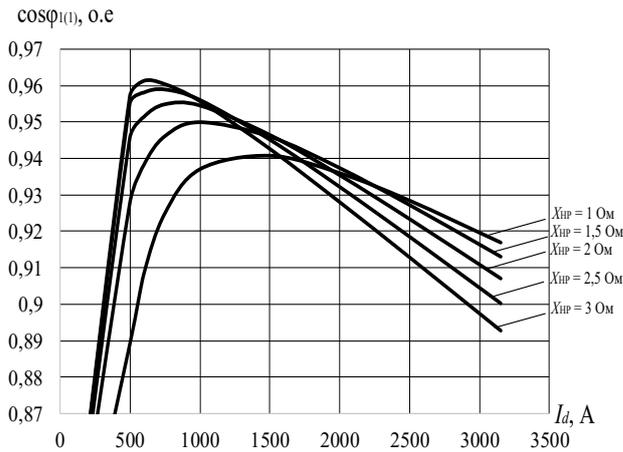


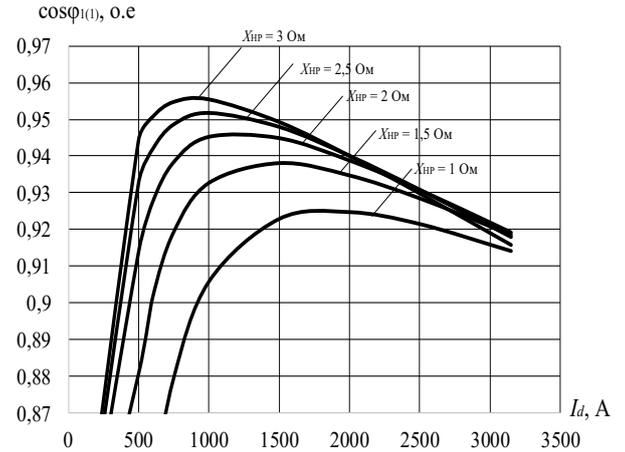
Рисунок 2.15 – Схема алгоритма расчета внешних промежуточных естественных характеристик 3 и 4, и $\cos \varphi_{1(1)}$

В результате проведенных расчетов на втором этапе методики, получаем семейство графиков зависимости косинуса фи $\cos \varphi_{1(1)} = f(I_d)$ от тока нагрузки преобразовательного агрегата, определяемое сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ для внешних характеристик 3 и 4 и которые представлены на рисунках 2.16.

а)



б)



а – для внешней характеристики 3;

б – для внешней характеристики 4

Рисунок 2.16 – Семейство графиков зависимости косинуса фи $\cos \varphi_{1(1)} = f(I_d)$ от тока нагрузки преобразовательного агрегата, определяемое сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ

Как уже было сказано ранее, в режиме работы ТРПУ с закрытыми тиристорными ключами, рациональная величина сопротивления неуправляемого реактора стремится к нулю ($X_{HP} = 0$), а при открытых тиристорных ключах – к бесконечности ($X_{HP} = \infty$). Соответственно, для определения рационального значения, будет достаточно выполнить расчет коэффициента мощности только для несимметричных режимов работы ТРПУ – характеристик 3 и 4 (рисунок 2.12).

На третьем этапе, на основании полученных результатов расчетов на втором этапе в виде семейства графиков $\cos \varphi_{1(1)i} = f(I_d)$, из всего множества значений $\cos \varphi_{1(1)i}$ определяется среднее $\cos \varphi_{1(1)CP}$ в рамках рассматриваемого диапазона для внешних характеристик 3 и 4 по формуле:

$$\cos \varphi_{1(1)CP} = \frac{\sum_{i=I_{d.3}}^{I_{dH}} \cos \varphi_{1(1)i}}{INT \left(\frac{I_{dH} - I_{d.3}}{\Delta I_d} \right) + 1}, \quad (2.39)$$

где ΔI_d – шаг изменения выпрямленного тока I_d в представленном алгоритме, А;

INT – функция, определяющая целую часть выражения в скобках.

Результаты проведенных расчетов $\cos \varphi_{1(1)CP}$ внешних характеристик 3 и 4 преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 и ТРПУ при различных значениях сопротивления неуправляемого реактора представлены на рисунке 2.17.

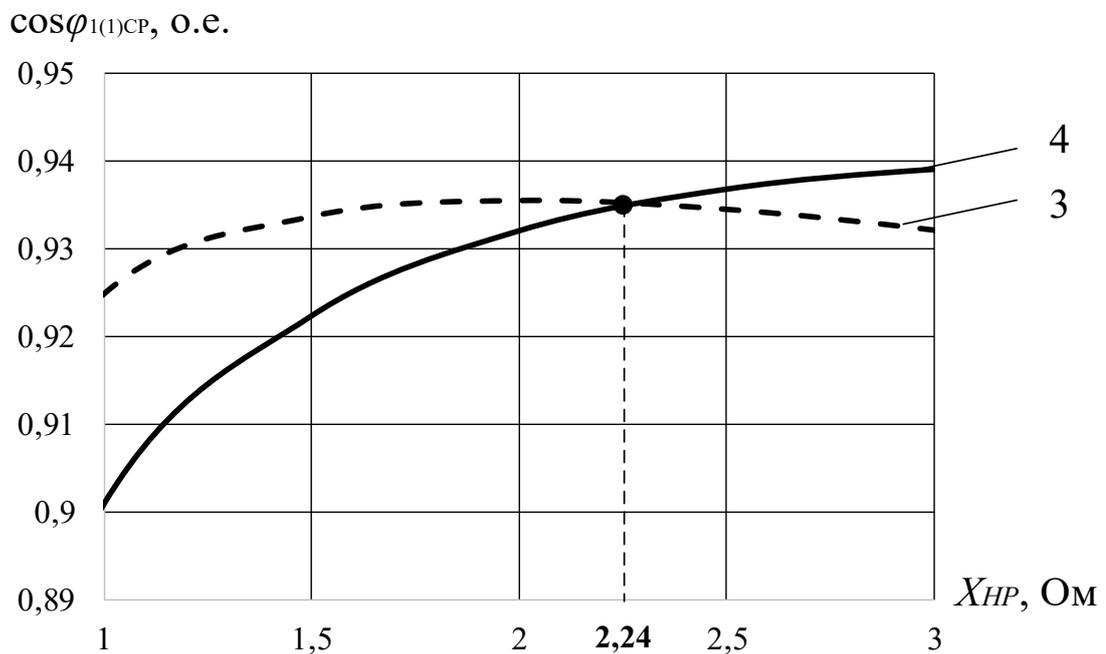


Рисунок 2.17 – График зависимости $\cos \varphi_{1(1)CP} = f(X_{HP})$ внешних характеристик 3 и 4 преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 и ТРПУ

Значение сопротивления неуправляемого реактора $X_{HP} = 2,24$ Ом, которому соответствует точка пересечения графиков зависимости $\cos \varphi_{1(1)CP} = f(X_{HP})$ характеристик 3 и 4, является рациональным для ТРПУ в составе преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП-12500/10.

2.3.3 Методика расчета рационального по потерям мощности значения сопротивления неуправляемого реактора

Определить рациональное значения сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ возможно, путем расчета потерь мощности (коэффициента полезного действия η) преобразовательного агрегата с ТРПУ.

Коэффициент полезного действия η преобразовательного агрегата с ТРПУ характеризует отношение активной мощности P_d , отдаваемой нагрузке к активной мощности, потребляемой из сети P_1 и определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_d}{P_1} 100 = \left(1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1} \right) 100, \quad (2.40)$$

где $\sum \Delta P$ – суммарные потери мощности в преобразовательном агрегате с ТРПУ, Вт.

Суммарные потери мощности в преобразовательном агрегате с ТРПУ можно определить по следующему выражению:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{T\rho} + \Delta P_B + \Delta P_{CY} + \Delta P_{ТРПУ\rho} + \Delta P_{OX} + \Delta P_Y, \quad (2.41)$$

где ΔP_B – потери мощности в выпрямительном блоке преобразователя, Вт.

Активная мощность P_1 преобразовательного агрегата с ТРПУ, потребляемая из сети, определяется по формуле (2.38).

Из формул (2.22), (2.38), (2.41) следует, что наименьшие потери мощности преобразовательного агрегата с ТРПУ обеспечиваются значениями сопротивлений X_{HP} и R_{TK} . При работе ТРПУ с минимальным значением R_{TK} , наибольшие потери мощности получаются при минимальном значении X_{HP} и наименьшие при максимальном значении X_{HP} , что связано с изменением величины циркулирующего тока $I_{Ц}$ в контуре регулировочной обмотки и неуправляемого реактора.

При максимальном значении R_{TK} , ток нагрузки трансформатора I_1 протекает через неуправляемый реактор, соответственно наибольшие потери мощности будут при максимальном значении X_{HP} и наименьшие при минимальном X_{HP} .

Методика расчета рациональной по потерям мощности величины сопротивления неуправляемого реактора X_{HP} произведен с использованием решения задач теории оптимального управления на основании последовательного перебора возможных вариантов поведения системы и включает в себя два этапа.

В расчетах диапазон изменения тока нагрузки I_d и сопротивлений неуправляемого реактора X_{HP} принимается равными значениям, рассмотренных в разделе 2.3.2.

На первом этапе производится расчет коэффициента полезного действия для внешних предельных естественных характеристик 1 и 2 (рисунок 2.12) при различных сопротивлениях неуправляемого реактора.

Схема алгоритма расчета коэффициента полезного действия для внешних предельных естественных характеристик 1 и 2 представлена на рисунке 2.18.

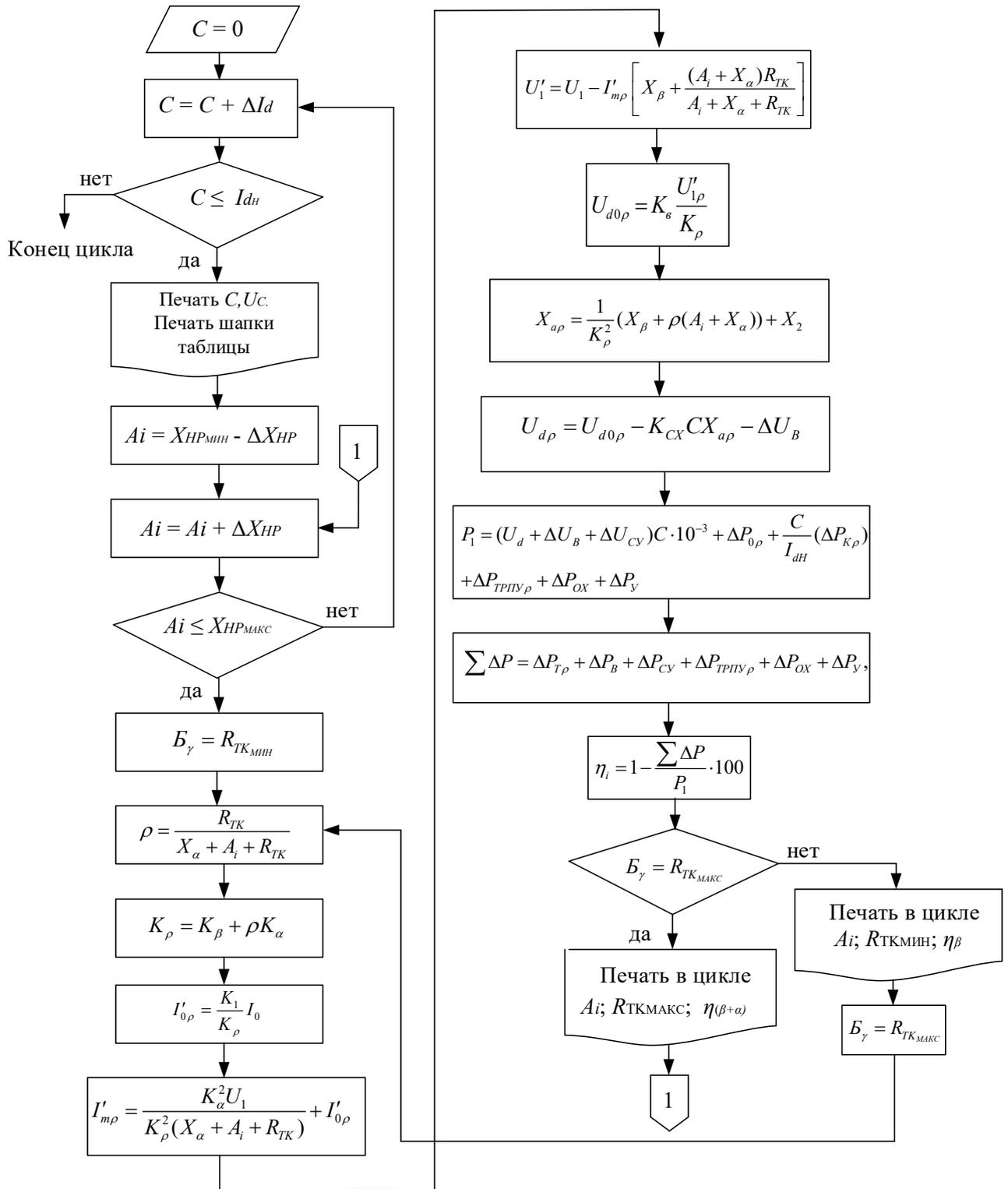


Рисунок 2.18 – Схема алгоритма расчета коэффициента полезного действия η преобразовательного агрегата с ТРПУ

В результате проведенных расчетов получаем семейство графиков зависимости коэффициента полезного действия $\eta_i = f(I_d)$ от тока нагрузки преобразовательного агрегата, определяемое сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ для внешних характеристик 1 и 2, и которые представлены на рисунках 2.19.

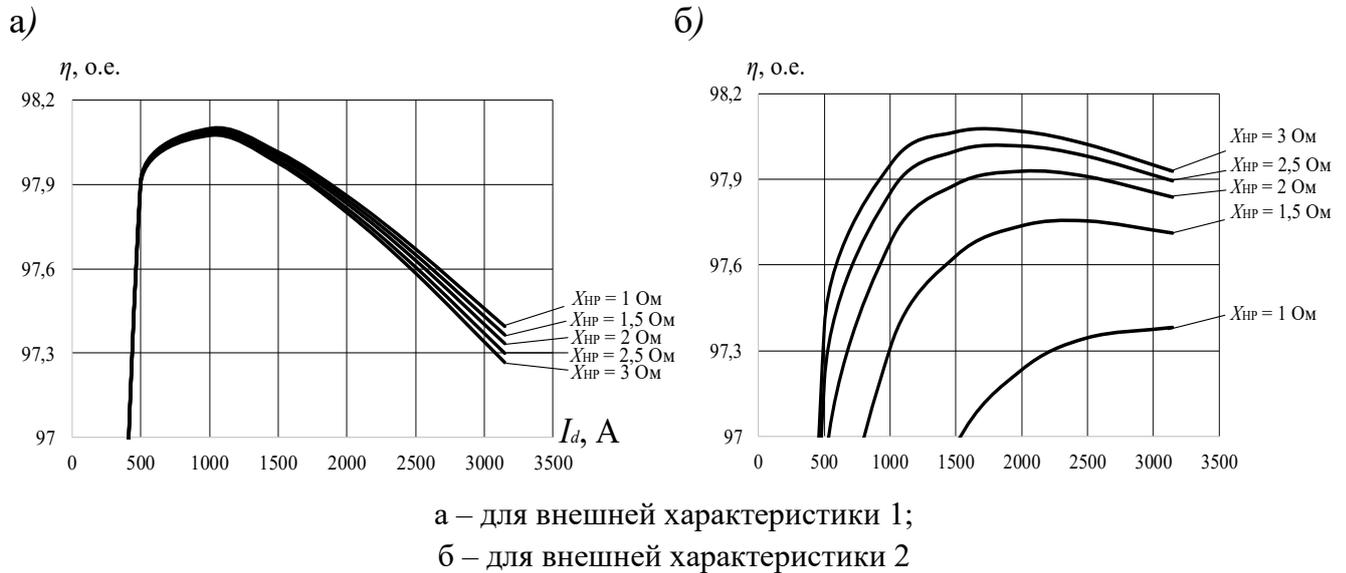


Рисунок 2.19 – Семейство графиков зависимости коэффициента полезного действия $\eta_i = f(I_d)$ от тока нагрузки преобразовательного агрегата, определяемых сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ

На втором этапе, независимо от числа промежуточных внешних характеристик преобразовательного агрегата, для определения рационального значения сопротивления неуправляемого реактора будет достаточно выполнить расчет коэффициента полезного действия только для предельных характеристик 1 и 2 (рисунок 2.12).

На втором этапе, на основании полученных результатов расчетов на первом этапе для семейства $\eta_i = f(I_d)$, из всего множества значений η_i определяется среднее η_{CP} для каждого значения сопротивления неуправляемого реактора в рамках рассматриваемого диапазона для внешних характеристик 1 и 2 по формуле:

$$\eta_{\text{CP}} = \frac{\sum_{i=I_{d.3}}^{I_{dH}} \eta_i}{\text{INT} \left(\frac{I_{dH} - I_{d.3}}{\Delta I_d} \right) + 1}. \quad (2.42)$$

На основании проведенных расчетов η_{CP} , строится зависимость потерь мощности преобразовательного агрегата с ТРПУ от сопротивления неуправляемого реактора $\eta_{\text{CP}} = f(X_{\text{HP}})$ для внешних характеристик 1 и 2:

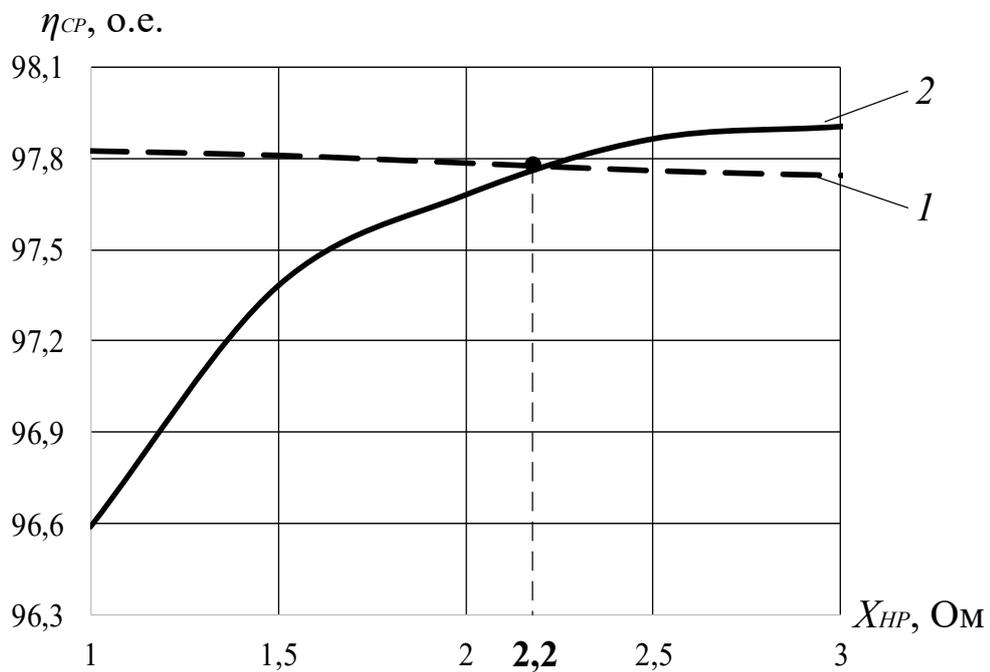


Рисунок 2.20 – График зависимости $\eta_{\text{CP}} = f(X_{\text{HP}})$ преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 и ТРПУ для внешних характеристик 1 и 2

Значение сопротивления неуправляемого реактора $X_{\text{HP}} = 2,2$ Ом, которому соответствует точка пересечения графиков зависимости $\eta_{\text{CP}} = f(X_{\text{HP}})$ характеристик 1 и 2, является рациональным для ТРПУ в составе преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10.

2.3.4 Проверка достоверности методик расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ

Значения сопротивления неуправляемого реактора $X_{НР} = 2,2 \text{ Ом}$ и $X_{НР} = 2,24 \text{ Ом}$ ТРПУ для преобразовательного агрегата с трансформатором ТРСНП–12500/10, полученные по результатам расчетов по представленным в разделах 2.3.2 и 2.3.3 методикам совпадают с учетом допустимой погрешности 5%. В дальнейшем, округлив до десятых, в качестве рационального значения принимается величина $X_{НР} = 2,2 \text{ Ом}$.

На рисунке 2.21 представлены расчетные естественные внешние характеристики преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП-12500/10 и ТРПУ с сопротивлением неуправляемого реактора $X_{НР} = 2,2 \text{ Ом}$.

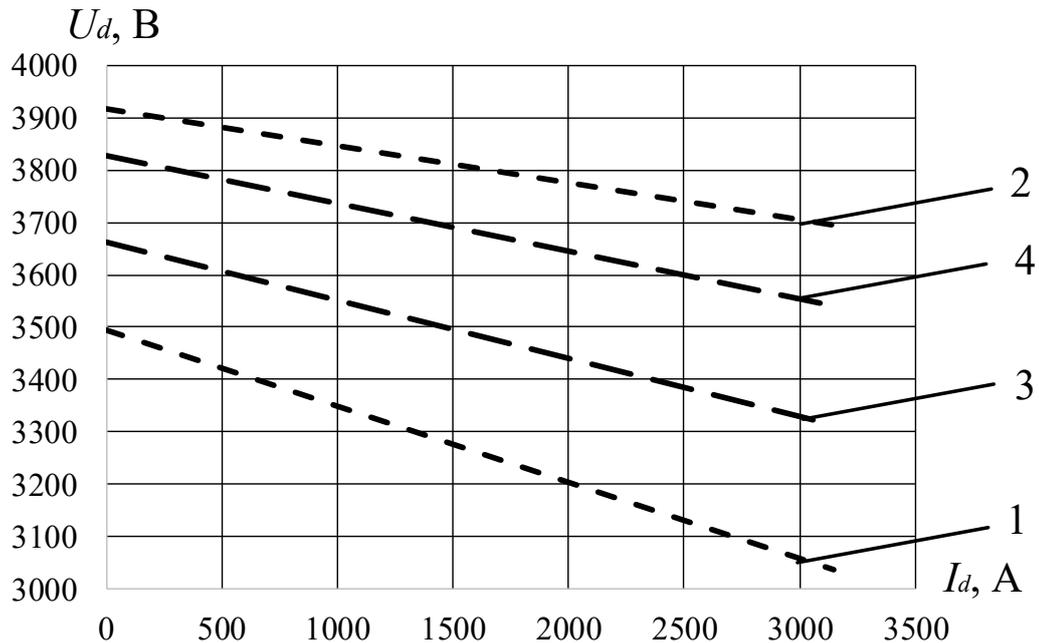


Рисунок 2.21 – Расчетные внешние характеристики ПА с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 при сопротивлении неуправляемого реактора равном 2,2 Ом

Проверка достоверности результатов расчетов, полученных по разработанной методике (см. разделы 2.3.2 и 2.3.3) была произведена на физической модели

преобразовательного агрегата с ТРПУ с 12-пульсовым выпрямительным блоком, с трансформатором мощностью 30 кВА и линейным первичным напряжением 380 В. Физическая модель ТРПУ имеет два значениями сопротивления неуправляемого реактора 2,4 Ом и 2,8 Ом. Проверка производилась путем сравнения $\cos \varphi_{1(1)CP}$ и η_{CP} , полученных экспериментально на физической модели, и аналитически, рассчитанные в соответствии с рассмотренными методиками расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ.

Экспериментальная проверка проводилась для обоих значений сопротивлений неуправляемого реактора – 2,4 Ом и 2,8 Ом, и для четырех режимов работы ТРПУ: двух симметричных – с открытыми (режим 1) и закрытыми (режим 4) тиристорными ключами во всех фазах ТРПУ; двух несимметричных – открыт тиристорный ключ только в одной фазе (режим 2); и открыты тиристорные ключи только в двух фазах (режим 3).

В таблице 2.2 представлены расчетные и экспериментальные значения $\cos \varphi_{1(1)CP}$ и η_{CP} физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ.

Таблица 2.2 – Расчетные и экспериментальные значения $\cos \varphi_{1(1)CP}$ и η_{CP} физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ

Сопротивление X_{HP} , Ом	Режим работы ТРПУ	Значение $\cos \varphi_{1(1)CP}$, о.е.		Значение η_{CP} , %	
		Расчетное	Экспериментальное	Расчетное	Экспериментальное
2,4	Режим 1	0,93	0,939	92,78	91,5
	Режим 2	0,958	0,948	92,99	92,23
	Режим 3	0,938	0,932	92,8	91,8
	Режим 4	0,955	0,945	92,95	92,05
2,8	Режим 1	0,922	0,915	92,76	91,5
	Режим 2	0,962	0,955	93,1	92,3
	Режим 3	0,942	0,934	92,82	91,7
	Режим 4	0,956	0,95	92,9	92,1

Из анализа результатов из таблицы 2.1 следует, что значения $\cos \varphi_{1(1)CP}$ и η_{CP} преобразовательного агрегата с ТРПУ, рассчитанные в соответствии с представленными методиками отличаются от экспериментальных незначительно, погрешность составляет не более 2 %.

Достаточно точное совпадение результатов расчетов $\cos \varphi_{1(1)CP}$ и η_{CP} полученных экспериментально и аналитически, а также достаточно точное совпадение результатов расчетов рационального сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ преобразовательного агрегата с трансформатором ТРСНП–12500/10, проведенных обеими методиками, доказывает их достоверность.

2.4 Определение основных параметров тиристорно-реакторного переключающего устройства

2.4.1 Общие положения

Основные электрические, тепловые, механические и другие свойства тиристорных определяют параметрами и их характеристиками.

Предельно допустимые параметры тиристорных по напряжению, прикладываемому к тиристорному ключу, определяются из следующих расчетных режимов:

- 1) Рабочего режима работы.
- 2) Режимы повторяющихся перенапряжений.
- 3) Режимы неповторяющихся перенапряжений.

Для указанных режимов, по известной методике [108-110], рассчитываются обратные напряжения, прикладываемые к тиристорному ключу ТК от РО преобразовательного трансформатора и НР. После этого выбирается класс тиристора и определяются его допустимые импульсные обратные напряжения: рабочее U_{RWM} , повторяющееся U_{RRM} и неповторяющееся U_{RSM} .

Предельно допустимые параметры тиристоров по току определяются для следующих расчетных режимов:

- 1) Режима номинальной нагрузки.
- 2) Режима перегрузки.
- 3) Аварийного режима.

Для указанных режимов, по известной методике [108-110], учитывая значение номинального тока I_{1H} преобразовательного трансформатора ТРСНП-12500/10 с числом витком w_β , определяется максимально допустимый средний прямой ток тиристора I_{FAVm} и амплитуда максимально допустимого прямого тока I_{FM} .

Из режима перегрузки определяется амплитуда допустимого среднего тока перегрузки тиристора $I_{F(OV)}$, для определения которой [108-110], необходимо знать величину тока через тиристорный ключ при перегрузке, возникающей в результате изменения режимов работы ТРПУ, и которая определяется по формуле:

$$I_{TK\ ПЕР} = K_{ПЕР} I_{1H}, \quad (2.43)$$

где $K_{ПЕР}$ – коэффициент перегрузки, о.е.;

I_{1H} – величина номинального тока первичной обмотки преобразовательного трансформатора с числом витков w_β , для трансформатора ТРСНП-12500/10 $I_{1H} = 677$ А.

Из аварийного режима определяется амплитуда ударного неповторяющегося прямого тока тиристора I_{FSM} , для определения которой [108-110] необходимо знать величину ударного тока, протекающего через тиристорный ключ при аварийном режиме:

$$i_{yD} = 255 \frac{I_{1H}}{u_K}, \quad (2.44)$$

где u_K – полное значение напряжения КЗ цепи коммутации, %.

Как показали результаты исследований работы ТРПУ, при изменении режимов работы возникают значительные токовые перегрузки тиристоров, связанные с

разрядом накопленной электрической энергии в индуктивных элементах цепи коммутации, и в большей степени в НР ТРПУ. В связи с чем, для определения значения коэффициента $K_{\text{ПЕР}}$ необходимо исследовать переходные процессы в ТРПУ, возникающие при изменении режимов его работы.

Исследование переходных процессов производилось аналитически и экспериментально на имитационной модели преобразовательного агрегата с ТРПУ и лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с трехфазным преобразовательным трансформатором мощностью 30 кВА с линейным первичным напряжением 380 В.

2.4.2 Разработка имитационной модели преобразовательного агрегата с ТРПУ

Для моделирования электротехнических устройств применяется система динамического моделирования *Matlab Simulink* с пакетом расширения *SimPowerSystem* [20, 114-119]. В качестве математического аппарата использован метод имитационного моделирования.

Для анализа переходных процессов в ТРПУ в данном разделе представлена имитационная модель преобразовательного агрегата с ТРПУ.

Принципиальная электрическая схема преобразовательного агрегата с ТРПУ показана на рисунке 2.22. Модель преобразовательного агрегата с ТРПУ, соответствующая схеме на рисунке 2.22, созданная из элементов библиотеки *Simulink-SimPowerSystem*, показана на рисунке 2.23.

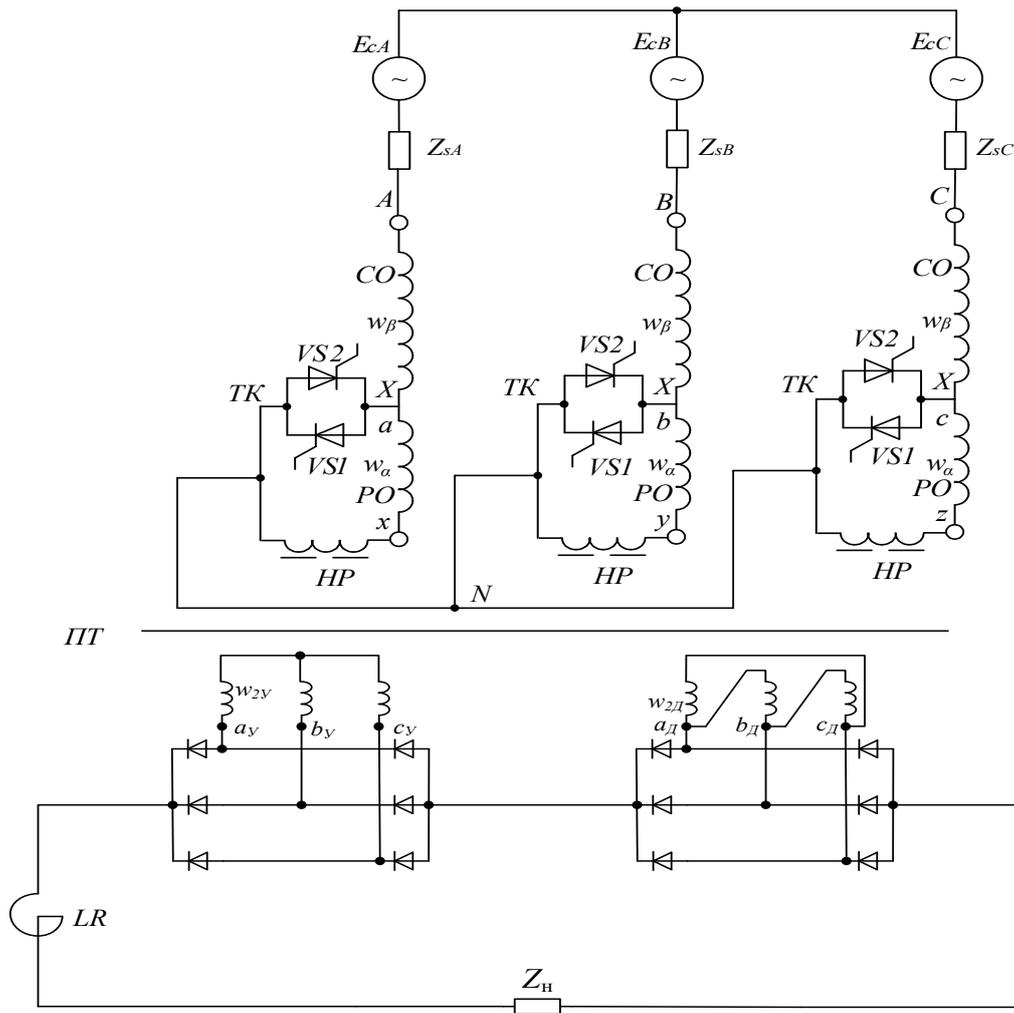
Модель включает в себя преобразовательный трансформатор ПТ, неуправляемый реактор НР, тиристорные ключи ТК, систему управления тиристорами *Control System*, выпрямительный блок *VD*, сглаживающий реактор *LR* и нагрузку $Z_{\text{Н}}$.

Модель преобразовательного трансформатора включает в себя три четырехобмоточных однофазных трансформатора Т. Выводы 1+ и 1 трансформатора Т соответствуют началу и концу СО, выводы 2+ и 2 – началу и концу РО, выводы 3+ и 3 – началу и концу вторичной обмотки со схемой соединения «треугольник» (Д),

выводы 4+ и 4 – началу и концу вторичной обмотки со схемой соединения «звезда» (У).

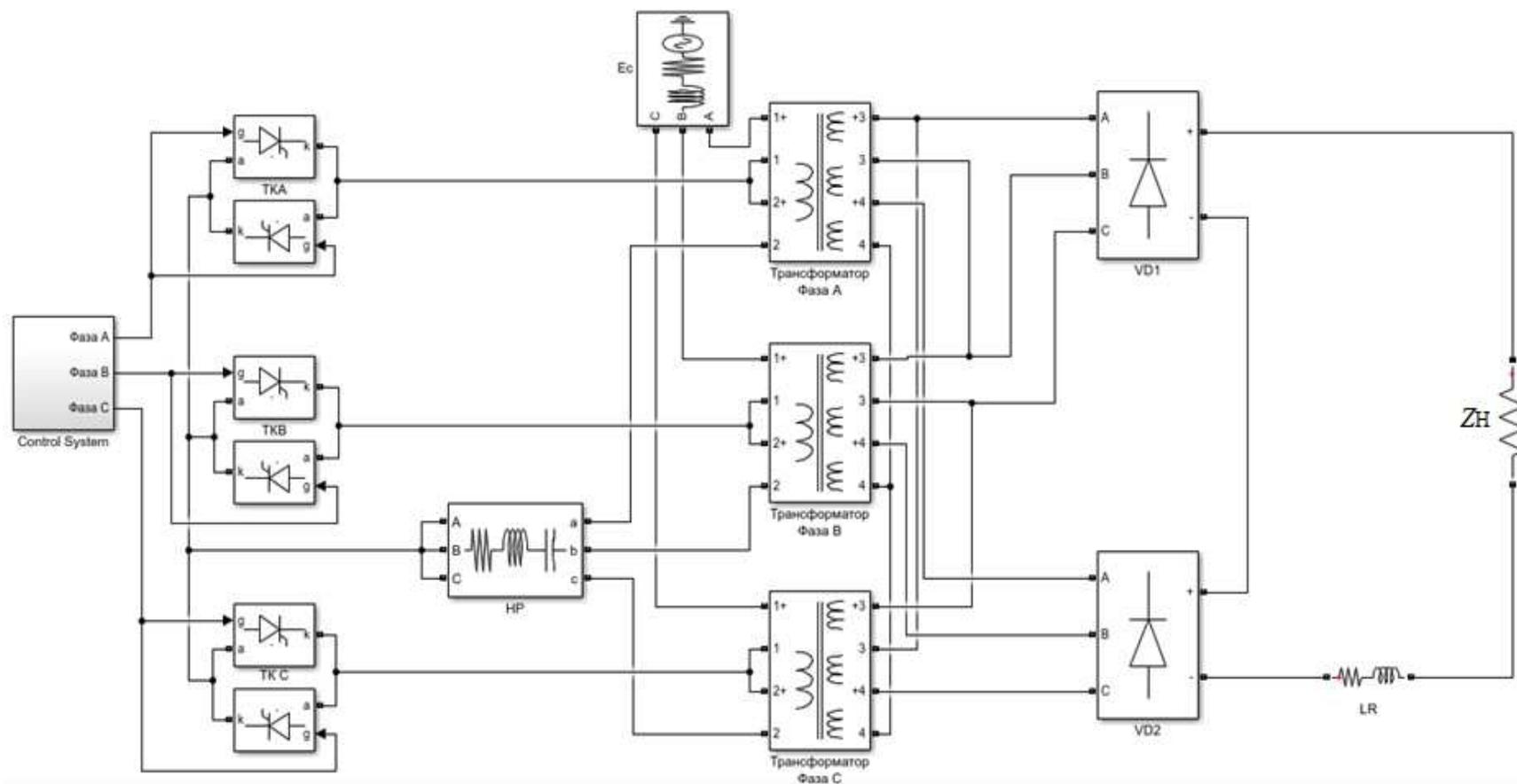
На первичную обмотку трансформатора с ТРПУ подается переменное фазное напряжение $E_C = 6069$ В.

В качестве выпрямительного блока применяется диодный выпрямитель с двенадцатипульсовой мостовой последовательной схемой выпрямления.



w_{2y} – число витков вторичной обмотки трансформатора, соединенной по схеме «звезда»;
 $w_{2д}$ – число витков вторичной обмотки трансформатора, соединенной по схеме «треугольник»;
 Z_s – сопротивление питающей сети

Рисунок 2.22 – Принципиальная электрическая схема преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключющим устройством



$VD1, VD2$ – выпрямительные блоки с шестипульсовой мостовой схемами выпрямления;
 LR – сглаживающий реактор;
 Z_H – сопротивление нагрузки

Рисунок 2.23 – Модель преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключающим устройством

При использовании модели трансформатора приняты следующие допущения:

- не учитываются емкостные связи между элементами обмоток, между обмотками и заземляющими частями магнитопровода, а также токи утечки изоляции;
- в качестве моделей трехфазного и преобразовательного трансформатора используются три модели однофазных трансформаторов *Saturable Transformer*.

Сопротивление питающей сети может изменяться в широких пределах, в зависимости от мощности короткого замыкания. В расчетах мощность короткого замыкания питающей сети $S_{кз}$ принимается равной 1000 кВА.

Для моделирования тиристорных ключей ТРПУ применяется модель тиристора – *Detalied Thyristor*. Схема замещения модели *Detalied Thyristor* показана на рисунке 2.24.

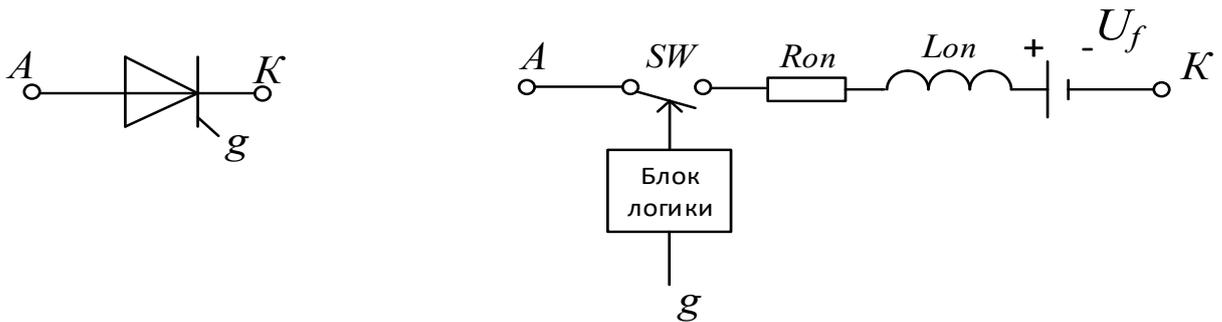


Рисунок 2.24 – Схема замещения модели *Detalied Thyristor*

Модель тиристора *Detalied Thyristor* состоит из последовательно включенных резистора R_{on} , индуктивности L_{on} , источника постоянного напряжения U_f и ключа SW . Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на тиристоре U_{ak} и наличии положительного сигнала на управляющем электроде g происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток I_{ak} . Размыкание ключа (отключение тиристора) выполняется при снижении тока, протекающего через тиристор, до нуля.

В модели приняты следующие параметры тиристорov:

- сопротивление тиристорov при обратном включении 10^5 Ом;
- динамическое сопротивление тиристорov 10^{-3} Ом;

– пороговые напряжения тиристоров при прямом включении равно 2 В.

Особенностью НР в ТРПУ является наличие в его магнитопроводе воздушного зазора с целью линейризации его вольтамперной характеристики. В связи с чем, для моделирования НР применяется модель *Series RLC Branch*, включающая в себя последовательно соединенные резистор (активное сопротивление) и индуктивность. Параметры модели НР, сопротивление которого равно 2,2 Ом, принимаются равными $R_{НР} = 0,041$ Ом, $L_{НР} = 0,007$ Гн.

При моделировании преобразовательного трансформатора взяты параметры трансформатора ТРСНП–12500/10, которые представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры преобразовательного трансформатора ТРСНП–12500/10

Параметр	Значение
Номинальная мощность трансформатора S_H , кВА	12530/11400*
Номинальная частота сети f , Гц	50
Напряжение короткого замыкания $U_K\%$, %	8,5/9,5*
Потери короткого замыкания ΔP_K , кВт	64
Потери холостого хода ΔP_0 , кВт	14,5
Ток холостого хода $I_0\%$, %	0,5
Число фаз m	3

Примечание: * - с введенной РО

Формулы для вычисления параметров имитационной модели преобразовательного трансформатора [116], приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Формулы для вычисления параметров имитационной модели трансформатора

Наименование величины	Расчетное выражение
Активное сопротивление обмоток	$\text{CO+PO: } R_1 = R_2 = \frac{\Delta P_K U_{1\Phi}^2}{2S_H}$ $\text{CO: } R_\beta = R_1 \frac{w_\beta}{w_\alpha + w_\beta}$ $\text{PO: } R_\alpha = R_1 - R_\beta$

Окончание таблица 2.4

Наименование величины	Расчетное выражение
Полное сопротивление обмоток	$\text{CO+PO: } Z_1 = Z_2 = \frac{U_{\text{к}} \% \cdot U_{1\Phi}^2}{100 \cdot 2 \cdot S_{\text{H}}}$ $\text{CO: } Z_{\beta} = Z_1 \frac{w_{\beta}}{w_{\alpha} + w_{\beta}}$ $\text{PO: } Z_{\alpha} = Z_1 - Z_{\beta}$
Индуктивное сопротивление обмоток	$\text{CO+PO: } X_1 = X_2 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2}$ $\text{CO: } X_{\beta} = \sqrt{Z_{\beta}^2 - R_{\beta}^2}$ $\text{PO: } X_{\alpha} = \sqrt{Z_{\alpha}^2 - R_{\alpha}^2}$
Индуктивность обмоток	$\text{CO+PO: } L_1 = L_2 = \frac{X_1}{2\pi f}$ $\text{CO: } L_{\beta} = \frac{X_{\beta}}{2\pi f}$ $\text{PO: } L_{\alpha} = \frac{X_{\alpha}}{2\pi f}$
Полные потери мощности в режиме холостого хода	$\Delta S_0 = \frac{I_0 \%}{100} S_{\text{H}}$
Намагничивающая мощность трансформатора	$Q_0 = \sqrt{\Delta S_0^2 - \Delta P_0^2}$
Активное сопротивление цепи намагничивания	$R_0 = \frac{3U_{1\Phi}^2}{\Delta P_0}$
Индуктивное сопротивление цепи намагничивания	$X_0 = \frac{3U_{1\Phi}^2}{\Delta Q_0}$
Индуктивность цепи намагничивания	$L_0 = \frac{X_0}{2\pi f}$

Результаты расчета параметров для вычисления имитационной модели трансформатора ТРСН–12500/10, представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчета параметров для вычисления имитационной модели трансформатора ТРСНП–12500/10

Параметры СО и РО						
Параметры СО			Параметры РО			
R_β , Ом	X_β , Ом	L_β , Гн	U_α , В	R_α , Ом	X_α , Ом	L_α , Гн
0,0195	0,374	0,0012	760	0,0031	0,0084	0,00027
Параметры вторичной обмотки						
U_2 , В	R_2 , Ом	X_2 , Ом	L_2 , Гн			
1342	0,0226	0,459	0,00146			
Параметры намагничивающего контура						
R_0 , Ом	X_0 , Ом		L_0 , Гн			
48333	5454		17,37			

Модель двенадцатипульсового выпрямительного блока выполнена из двух последовательно соединенных блоков *Universal Bridge* (шестипульсовый диодный мост). В модели приняты следующие параметры:

- динамическое сопротивление диодов при прямом включении 0,01 Ом;
- пороговое напряжение на диодах при прямом включении 0,8 В;
- сопротивление диодов при обратном включении 2000 Ом.

В качестве сглаживающего реактора, используется блок *Series RLC Branch* (последовательная *RLC* цепь), включающая в себя последовательно соединенные резистор (активное сопротивление) и индуктивность. Значения индуктивности и активного сопротивления реактора соответствуют параметрам реактора РБФА–У–6500/3250 [117].

На рисунке 2.25 показаны внешние естественные характеристики ПА с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10, полученные расчетным путем (см. раздел 2.3) и экспериментальным на имитационной модели системы ПА с ТРПУ.

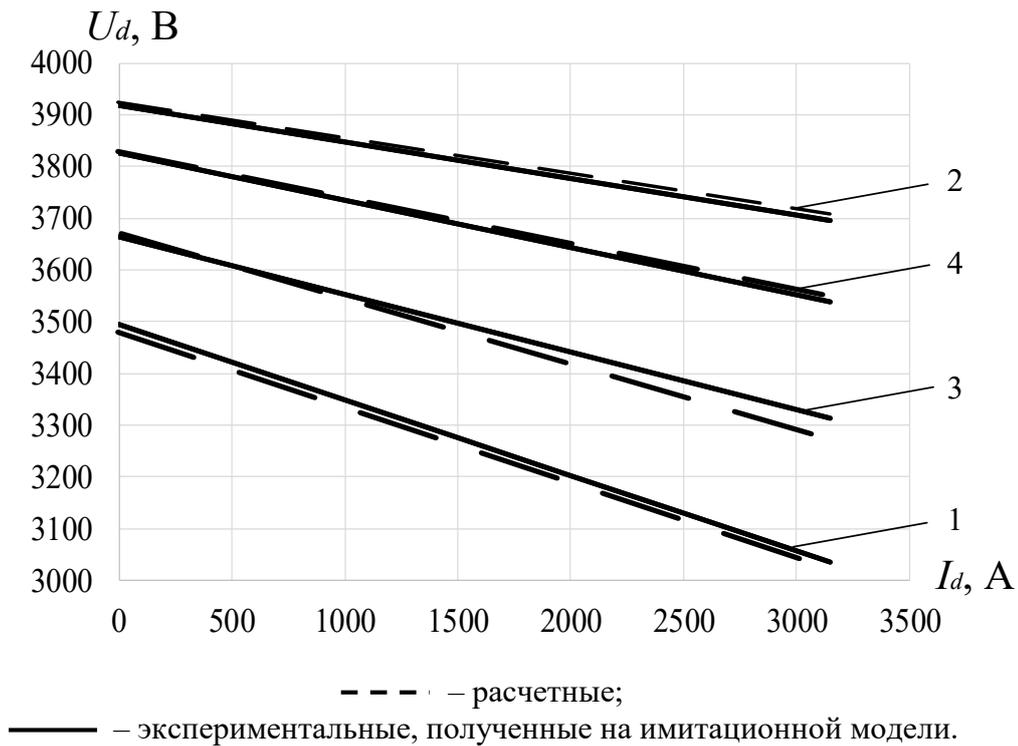


Рисунок 2.25 – Внешние характеристики ПА с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10

На рисунке 2.25 видно, что внешние естественных характеристики ПА с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10, полученные расчетным путем и экспериментальным на имитационной модели совпадают с учетом погрешности 5 %.

2.4.3 Исследование переходных процессов в тиристорно-реакторном переключающем устройстве ТРПУ

Для детального анализа переходных процессов в ТРПУ, необходимо определить возможные состояния тиристорных тиристорного ключа ТК.

Далее представлены переходные процессы, возникающие в имитационной модели ПА с ТРПУ при переключении режимов работы ТРПУ только в одной фазе, так как в двух других фазах, процессы проходят аналогично с фазовым сдвигом 120 электрических градусов.

Пусть в исходном состоянии ТРПУ работает в режиме с закрытым тиристорным ключом ТК.

На рисунке 2.26 показаны переходные процессы в трансформаторе с ТРПУ при повышении ($t = 0,02$ с.) и понижении ($t = 0,12$ с.) напряжения.

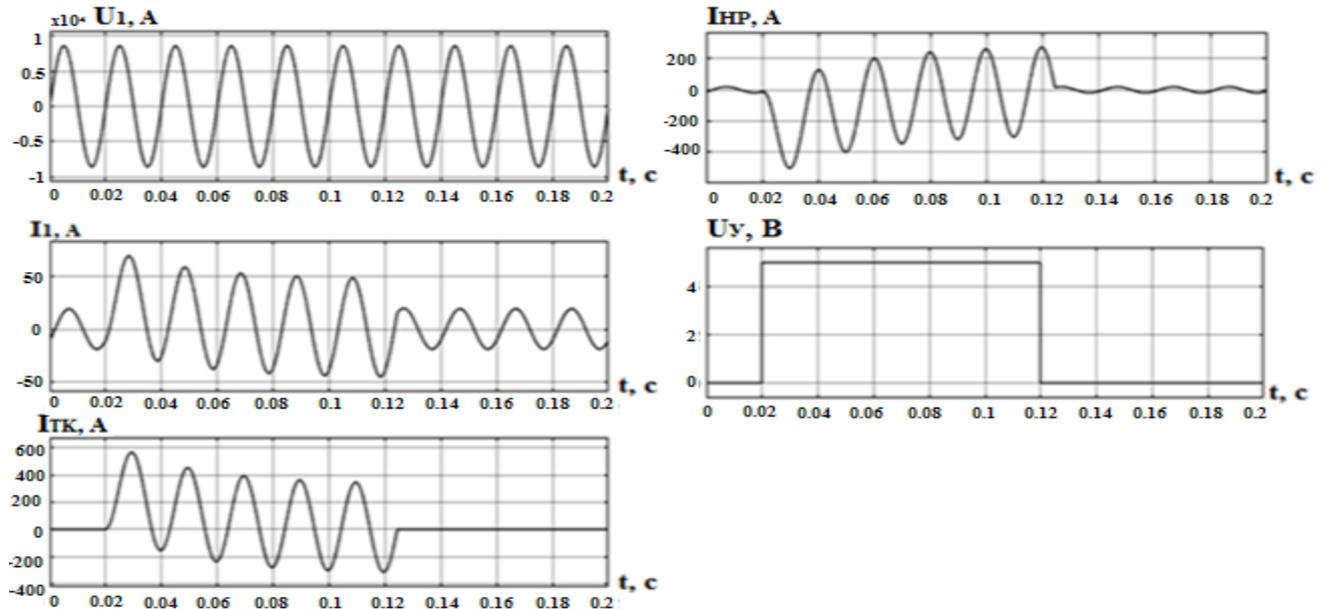


Рисунок 2.26 – Переходные процессы в трансформаторе с ТРПУ при повышении и понижении напряжения

При повышении напряжения в момент времени $t = 0,02$ с. подается импульс U_y на электроды управления тиристоров $VS1$ и $VS2$. Под действием ЭДС РО открывается тиристор $VS1$ и через него начинает протекать циркулирующий ток $I_{Ц}$, ток разряда запасенной в НР энергии $I_{разр}$ и ток нагрузки I_l (рисунок 2.27, а). В первый полупериод коммутационного процесса ток разряда НР $I_{разр}$ складывается с циркулирующим током $I_{Ц}$ и током нагрузки I_l , тем самым увеличивая амплитуду тока, протекающего через тиристор $VS1$. В следующий полупериод питающего напряжения циркулирующий ток $I_{Ц}$ и ток нагрузки I_l меняют свое направление и начинают протекать навстречу току разряда НР (рисунок 2.27, б).

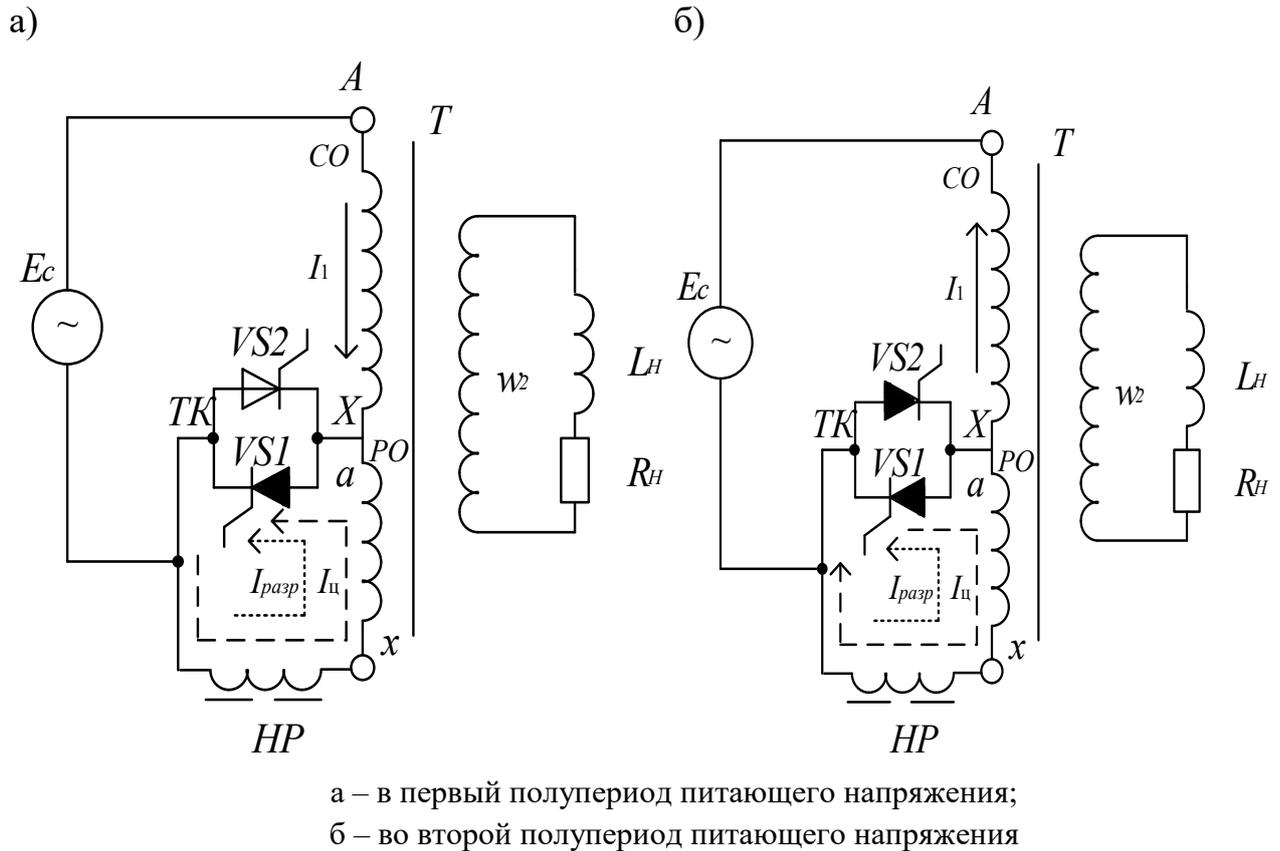


Рисунок 2.27 – Переходный процесс в трансформаторе с ТРПУ при повышении напряжения в момент перехода из отрицательной в положительную полуволну питающего напряжения

Величина тока разряда больше номинального значения циркулирующего тока $I_{ц}$, поэтому при смене полярности напряжения тиристор $VS1$ не закрывается в течение первого периода питающего напряжения. Такой режим называется срывом коммутации тиристорного ключа ТК. По мере разряда HP величина тока разряда уменьшается, амплитуда тока, протекающего в контуре HP – тиристорный ключ ТК – РО трансформатора уменьшается, коммутация тиристоров $VS1$ и $VS2$ ключа ТК нормализуется.

При понижении напряжения момент времени $t = 0,12$ с. (рисунок 2.26) импульсы управления U_{γ} снимаются с тиристоров $VS1$ и $VS2$ и тиристор $VS1$ закрывается под действием ЭДС РО. Ток нагрузки I_l начинает протекать через СО и РО трансформатора и HP. При этом бросков тока и напряжения не наблюдается.

При рассмотрении переходного процесса при повышении напряжения в момент перехода из положительной в отрицательную полуволну питающего напряжения наблюдается аналогичный процесс, однако срыв коммутации будет уже у тиристора $VS2$.

В соответствии с вышесказанным можно сделать вывод, что при проектировании ТРПУ при выборе тиристорov, необходимо определить величину коэффициента $K_{\text{ПЕР}}$ тока перегрузки $I_{\text{ТК ПЕР}}$, протекающего через тиристор тиристорного ключа ТК при переходном процессе в момент повышения напряжения. Расчет $K_{\text{ПЕР}}$ основан на классическом методе [118] расчета переходных процессов.

В момент времени до коммутации ($t = 0_-$), ТРПУ работает в режиме с закрытыми тиристорными ключами. Структурная схема трансформатора с ТРПУ в момент времени до коммутации $t = (0_-)$ показана на рисунке 2.28.

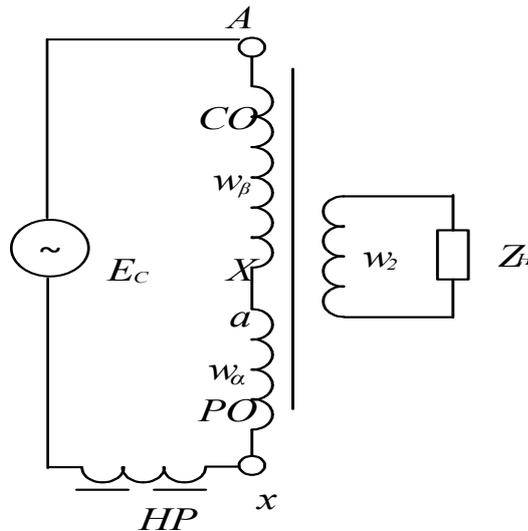


Рисунок 2.28 – Структурная схема трансформатора с ТРПУ в момент времени до коммутации $t = (0_-)$

Схема замещения трансформатора с ТРПУ в режиме с закрытым тиристорным ключом, соответствующая структурной схеме на рисунке 2.28, показана на рисунке 2.29.

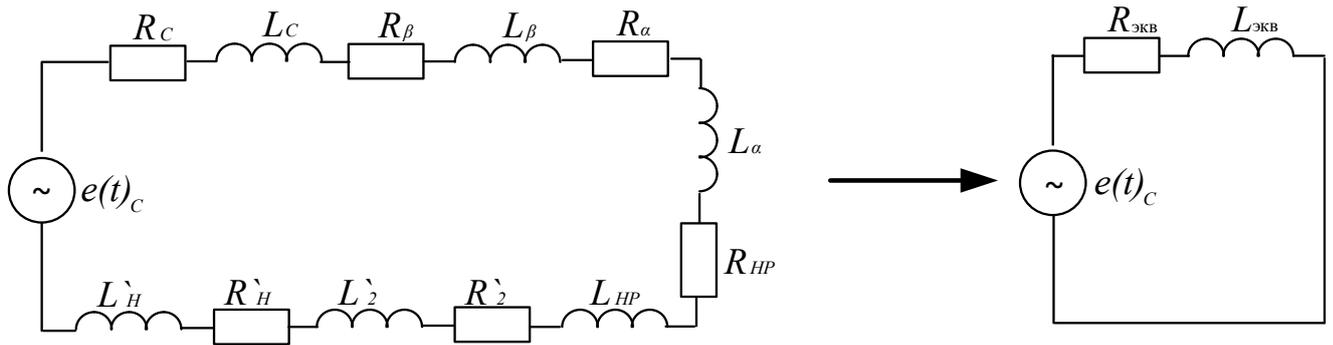


Рисунок 2.29 – Схема замещения трансформатора с ТРПУ в режиме с закрытым тиристорным ключом в момент времени до коммутации $t = (0_-)$

В соответствии с рисунком 2.29, комплексная величина тока в цепи будет равна:

$$i(0_-) = \frac{e_c(t)}{R_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}}} = \frac{E_C e^{j(\psi)}}{\sqrt{R_{\text{экв}}^2 + (\omega L_{\text{экв}})^2} e^{j \arctg \frac{\omega L_{\text{экв}}}{R_{\text{экв}}}}} = I_1 e^{j(\psi - \varphi)}, \quad (2.45)$$

где $R_{\text{экв}} = R_C + R_\beta + R_\alpha + R_{HP} + K_{\rho_{\max}}^2 R_2 + K_{\rho_{\max}}^2 R_H$;

$$L_{\text{экв}} = j\omega(L_C + L_\beta + L_\alpha + L_{HP} + K_{\rho_{\max}}^2 L_2 + K_{\rho_{\max}}^2 L_H).$$

В соответствии с первым законом коммутации [118], величина тока до коммутации, равна величине тока после коммутации:

$$i(0_-) = i(0_+) = I_1 e^{j(\psi_1 - \varphi_1)}. \quad (2.46)$$

После коммутации $t = (0_+)$ (открытия тиристорного ключа ТК), структурная схема трансформатора с ТРПУ будет иметь вид:

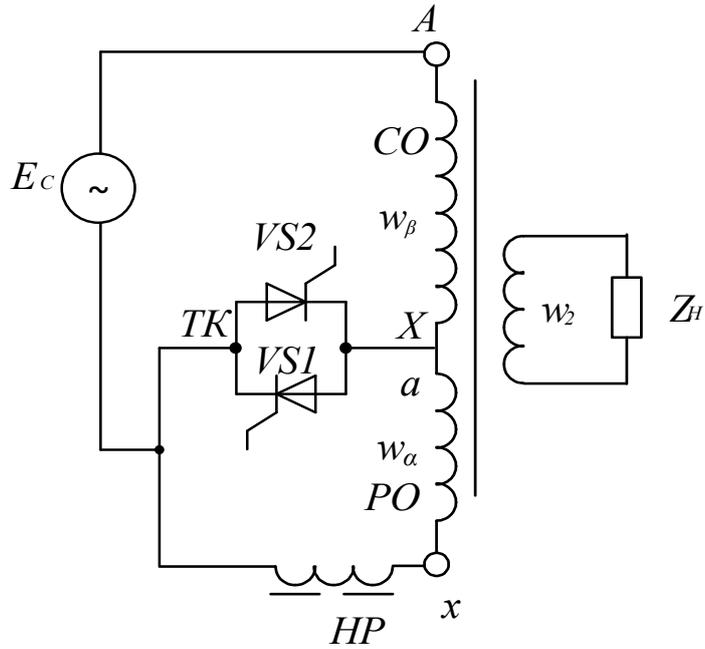


Рисунок 2.30 – Структурная схема трансформатора с ТРПУ в момент времени после коммутации $t = (0+)$

Как уже было рассмотрено в разделе 2.2, в момент открытия тиристорного ключа ТК, в установившемся режиме через него протекает ток нагрузки трансформатора I_1 и циркулирующий ток $I_{ц}$. Следовательно, для исследования величины тока, протекающего через тиристорный ключ ТК во время переходного процесса, следует рассмотреть контуры протекания обоих токов отдельно.

Первый контур соответствует пути протеканию тока нагрузки I_1 трансформатора при работе ТРПУ в режиме с открытым тиристорным ключом ТК.

Схема замещения первого контура трансформатора с ТРПУ в момент времени после коммутации $t = (0+)$ показана на рисунке 2.31, а.

Второй контур соответствует пути протеканию циркулирующего тока $I_{ц}$ трансформатора, при работе ТРПУ в режиме с открытым тиристорным ключом ТК. Схема замещения второго контура трансформатора с ТРПУ в момент времени после коммутации $t = (0+)$, показан на рисунке 2.31, б.

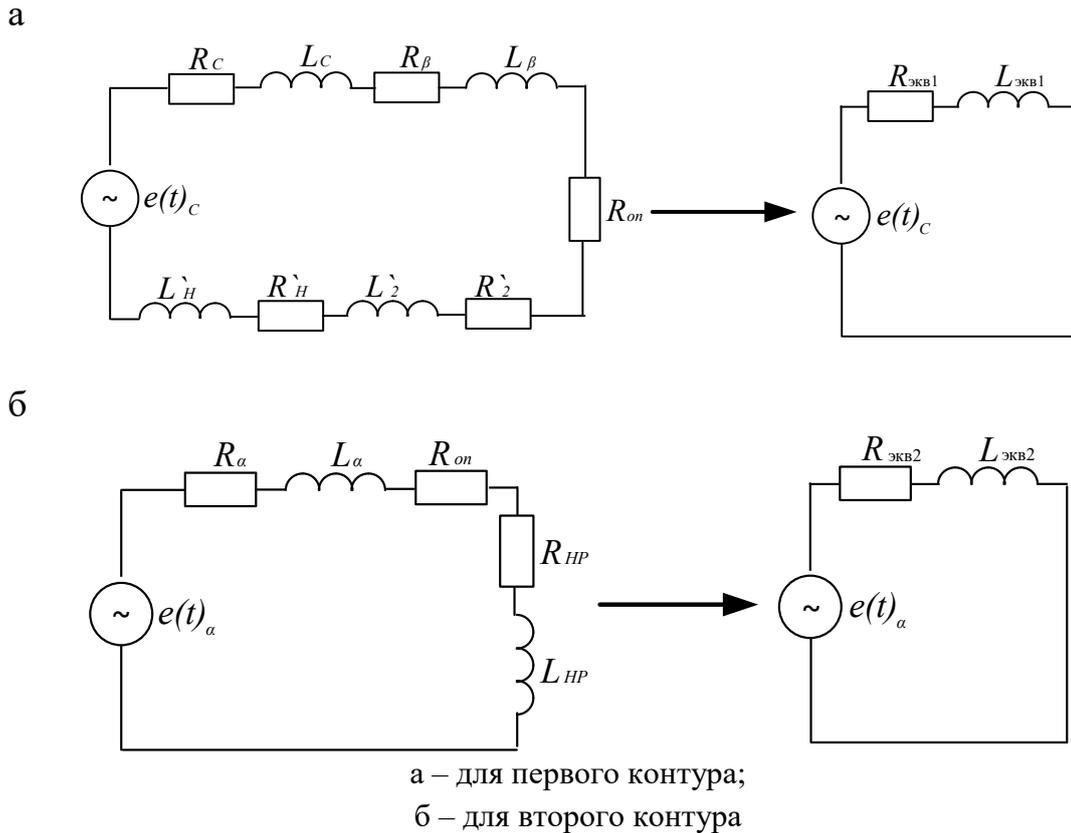


Рисунок 2.31 – Схемы замещения трансформатора с ТРПУ в момент времени после коммутации $t = (0+)$

Для схемы на рисунке 2.31, а в установившемся режиме после коммутации $t = (0+)$ принужденная составляющая тока равна:

$$i_{np1}(t) = \frac{e(t)_c}{R_{\text{эKB1}} + jL_{\text{эKB1}}} = \frac{E_C e^{j(\psi)}}{\sqrt{R_{\text{эKB1}}^2 + (\omega L_{\text{эKB1}})^2} e^{j \arctg \frac{\omega L_{\text{эKB1}}}{R_{\text{эKB1}}}}} = \frac{E_C e^{j(\psi)}}{Z_{\text{эKB1}} e^{j(\varphi_1)}} = I_{np1} e^{j(\psi - \varphi_1)}, \quad (2.47)$$

где $R_{\text{эKB1}} = R_C + R_\beta + R_{on} + K_{\rho_{\max}}^2 R_2 + K_{\rho_{\max}}^2 R_H$;

$$L_{\text{эKB1}} = j\omega(L_C + L_\beta + K_{\rho_{\max}}^2 L_2 + K_{\rho_{\max}}^2 L_H).$$

R_{on} – сопротивление тиристора тиристорного ключа ТК в открытом состоянии
 φ_1 – угол сдвига фаз между принужденной составляющей тока i в после ком-

мутационном режиме и ЭДС питающей сети i , $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Характеристическое уравнение для схемы 2.31, а, где $j\omega$ заменяется на p .
Таким образом:

$$Z_{\text{экв1}} = R_{\text{экв1}} + pL_{\text{экв1}} = 0, \quad (2.48)$$

откуда корень $p = -\frac{R_{\text{экв1}}}{L_{\text{экв1}}}$ и продолжительность переходного процесса $\tau = \frac{L_{\text{экв1}}}{R_{\text{экв1}}}$.

Общий вид свободной составляющей тока, равен:

$$i_{\text{св1}}(t) = A_1 e^{pt} = A_1 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2.49)$$

где A — постоянная интегрирования.

Величина тока трансформатора с ТРПУ при переходном процессе для первого контура (рисунок 2.31, а), в общем виде;

$$i_{1-K}(t) = i_{\text{нп1}}(t) + i_{\text{св1}}(t) = I_{\text{нп}} e^{j(\psi-\varphi_1)} + A_1 e^{-\left(\frac{R_{\text{экв1}}}{L_{\text{экв1}}}\right)t}. \quad (2.50)$$

Для момента времени $t = (0+)$:

$$i(0+) = I_{\text{нп1}} e^{j(\psi-\varphi_1)} + A_1. \quad (2.51)$$

Получаем постоянную интегрирования:

$$A_1 = I_1 e^{j(\psi-\varphi_1)} - I_{\text{нп1}} e^{j(\psi-\varphi_1)}. \quad (2.52)$$

Таким образом, подставляя (2.52) в (2.50), получаем ток в цепи в переходном процессе для схемы на рисунке 2.31, а:

$$i_{1-K}(t) = I_{\text{нп1}} e^{j(\psi-\varphi_1)} + (I_1 e^{j(\psi-\varphi_1)} - I_{\text{нп1}} e^{j(\psi-\varphi_1)}) e^{-\left(\frac{R_{\text{экв1}}}{L_{\text{экв1}}}\right)t} =$$

$$\frac{E_C e^{j(\psi)}}{\sqrt{R_{\text{экв1}}^2 + (\omega L_{\text{экв1}})^2} e^{j \arctg \frac{\omega L_{\text{экв1}}}{R_{\text{экв1}}}}} + (I_1 e^{j(\psi-\varphi_1)} - \frac{E_C e^{j(\psi)}}{\sqrt{R_{\text{экв1}}^2 + (\omega L_{\text{экв1}})^2} e^{j \arctg \frac{\omega L_{\text{экв1}}}{R_{\text{экв1}}}}}) e^{-\left(\frac{R_{\text{экв1}}}{L_{\text{экв1}}}\right)t}. \quad (2.53)$$

Для схемы на рисунке 2.31, б в установившемся режиме после коммутации $t = (0+)$ принужденная составляющая тока равна:

$$i_{np2}(t) = \frac{e(t)_\alpha}{R_{\text{экв}2} + j\omega L_{\text{экв}2}} = \frac{E_\alpha e^{j(\psi+180)}}{\sqrt{R_{\text{экв}2}^2 + (\omega L_{\text{экв}2})^2} e^{j \arctg \frac{\omega L_{\text{экв}2}}{R_{\text{экв}2}}}} = I_{np2} e^{j(\psi+180-\varphi_2)}, \quad (2.54)$$

где $R_{\text{экв}2} = R_\alpha + R_{on} + R_{HP}$;
 $L_{\text{экв}2} = j\omega(L_\alpha + L_{HP})$.

Характеристическое уравнение для схемы 2.31, б, где $j\omega$ заменяется на p :

$$Z_{\text{экв}2} = R_{\text{экв}2} + pL_{\text{экв}2} = 0, \quad (2.55)$$

откуда корень $p = -\frac{R_{\text{экв}2}}{L_{\text{экв}2}}$ и продолжительность переходного процесса $\tau = \frac{L_{\text{экв}2}}{R_{\text{экв}2}}$.

$$i_{2-K}(t) = i_{np2} + i_{св2} = I_\psi e^{j(\psi+180-\varphi_2)} + A_2 e^{-\left(\frac{R_{\text{экв}2}}{L_{\text{экв}2}}\right)t} \quad (2.56)$$

Для момента времени $t = (0+)$:

$$i(0+) = I_\psi e^{j(\psi+180-\varphi_2)} + A_2. \quad (2.57)$$

Получаем постоянную интегрирования:

$$A_2 = I_1 e^{j(\psi-\varphi)} - I_{np2} e^{j(\psi+180-\varphi_2)}. \quad (2.58)$$

Таким образом, подставляя (2.58) в (2.56), получаем ток в цепи в переходном процессе для схемы на рисунке 2.31, б:

$$i_{2-K}(t) = I_{np2} e^{j(\psi+180-\varphi_2)} + (I_1 e^{j(\psi-\varphi)} - I_{np2} e^{j(\psi-\varphi_2)}) e^{-\left(\frac{R_{\text{экв}2}}{L_{\text{экв}2}}\right)t} =$$

$$\frac{E_\alpha e^{j(\psi+180)}}{\sqrt{R_{\text{экв}2}^2 + (\omega L_{\text{экв}2})^2} e^{j \arctg \frac{\omega L_{\text{экв}2}}{R_{\text{экв}2}}}} + (I_1 e^{j(\psi-\varphi)} - \frac{E_\alpha e^{j(\psi+180)}}{\sqrt{R_{\text{экв}2}^2 + (\omega L_{\text{экв}2})^2} e^{j \arctg \frac{\omega L_{\text{экв}2}}{R_{\text{экв}2}}}}) e^{-\left(\frac{R_{\text{экв}2}}{L_{\text{экв}2}}\right)t}. \quad (2.59)$$

Применяя первый закон Кирхгофа [118], возможно определить величину тока, протекающего через тиристорный ключ ТК во время переходного процесса

при повышении напряжения трансформатора. Складывая значения токов первого и второго контуров, получим:

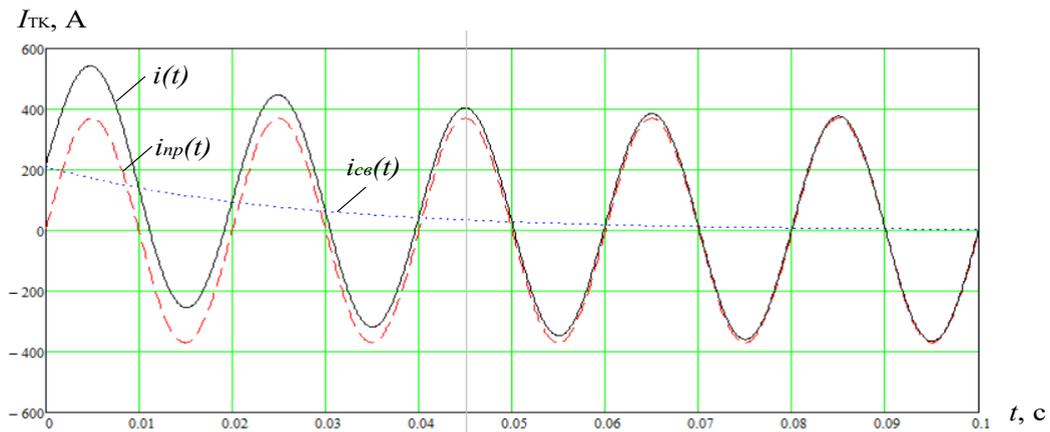
$$i_{\text{н.п.}}(t) = i_{1-K}(t) + i_{2-K}(t). \quad (2.60)$$

Подставляя в уравнение (2.60) уравнения (2.53) и (2.59), а также расчетные значения из таблицы 2.5 получаем уравнение переходного процесса в ТРПУ при повышении напряжении преобразовательного трансформатора ТРСНП–12500/10:

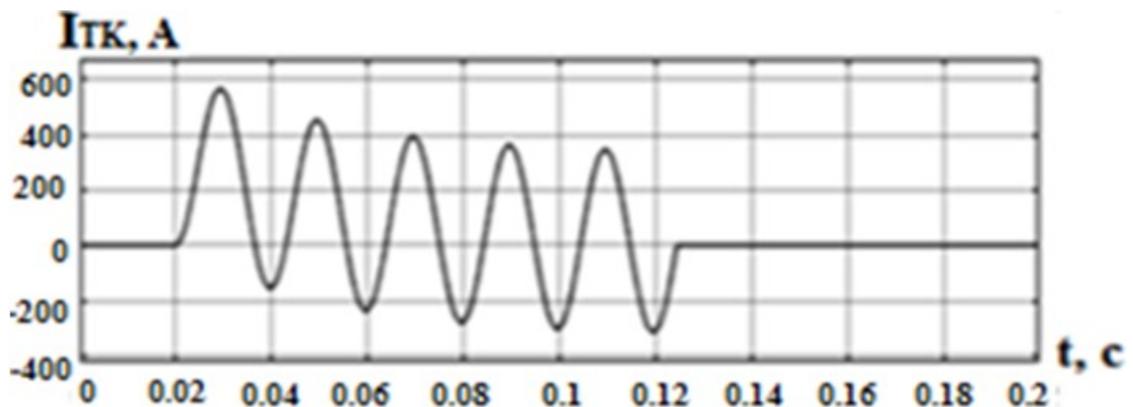
$$i_{\text{н.п.}}(t) = i_{\text{нп}}(t) + i_{\text{св}}(t) = 370 \sin(\omega t) + 210e^{-\frac{t}{0.028}}.$$

График, построенный по данной функции, показан на рисунке 2.32, а.

а



б



а – полученный расчетным путем;

б – полученный опытным путем на имитационной модели ПА с ТРПУ

Рисунок 2.32 – Ток тиристорного ключа $I_{\text{ТК}}$ при переходном процессе в момент повышения напряжения

При анализе рисунков 2.32, а и 2.32, б можно сделать вывод, что расчетная кривая тока через тиристорный ключ ТК ТРПУ при переходном процессе при повышении напряжения достаточно точно повторяет кривую тока, полученную опытным путем на имитационной модели преобразовательного агрегата с ТРПУ

Из кривых на рисунках 2.32 видно, что наибольшая амплитуда тока перегрузки $I_{TK ПЕР}$ через тиристор тиристорного ключа ТК наблюдается в первый полупериод переходного процесса. Для определения значения амплитуды тока в первый полупериод питающего напряжения достаточно сложить амплитуды принужденной $i_{np}(t)$ и свободной $i_{св}(t)$ составляющих тока $i_{н.п.}(t)$ переходного процесса.

Коэффициент $K_{ПЕР}$ показывает, во сколько раз величина тока в первый полупериод питающего напряжения $I_{TK ПЕР}$ (тока перегрузки), после открытия тиристорного ключа ТК, превышает номинальное значение тока нагрузки трансформатора I_{IH} , и который определяется по формуле:

$$K_{ПЕР} = \frac{I_{TK ПЕР}}{I_{IH}}. \quad (2.61)$$

Как показали результаты исследований, величина тока $I_{TK ПЕР}$ и продолжительность переходного процесса, главным образом, зависят от индуктивности НР ТРПУ, так как значение индуктивности реактора значительно превышает значения индуктивности других элементов контура протекания тока нагрузки трансформатора. В свою очередь известно [118], что индуктивность НР имеет линейную зависимость от его сопротивления $X_{НР}$.

График зависимости $K_{ПЕР}$ от величины сопротивления НР $X_{НР}$ ТРПУ с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 показана на рисунке 2.33.

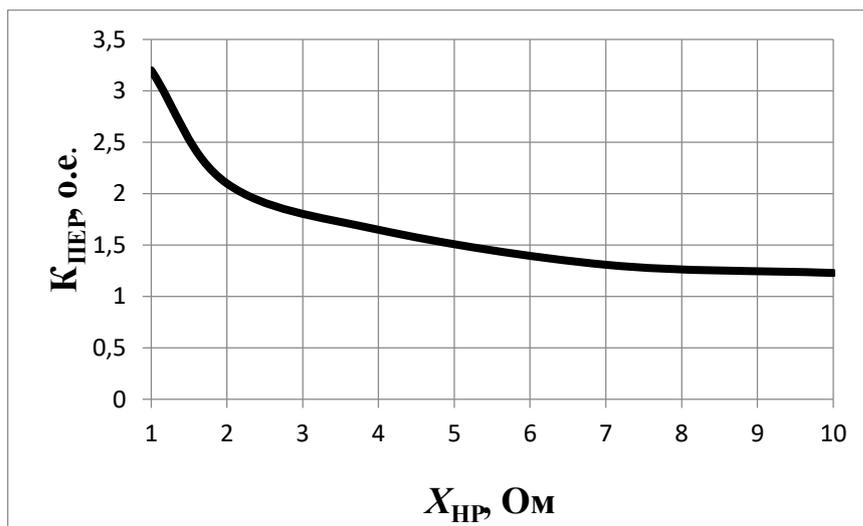


Рисунок 2.33 – График зависимости $K_{ПЕР}$ от величины сопротивления НР $X_{НР}$ ТРПУ с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10

Из графика 2.33 видно, что с увеличением сопротивления НР $X_{НР}$, значение $K_{ПЕР}$ уменьшается, что объясняется снижением тока нагрузки трансформатора в режиме до коммутации.

В соответствии с графиком на рисунке 2.33, для выбранного в разделе 2.3 рационального значения сопротивления НР ТРПУ с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 $X_{НР} = 2,2$ Ом, коэффициент $K_{ПЕР} = 2$.

На основании полученных результатов расчетов, а также в соответствии с известной методикой расчета предельно допустимых параметров и характеристик тиристоров [108-110], проведен расчет предельно допустимых значений токов и напряжений тиристоров ТРПУ в составе ПА с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10, результаты которого представлены в таблице 2.66.

Таблица 2.6 – Основные предельно допустимые токи и напряжения тиристорных ТРПУ

Параметр	Значение
Допустимое импульсное обратное рабочее напряжение U_{RWM} , В	8 584
Повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} , В	12 811
Неповторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RSM} , В	14 861
Класс тиристора К	128
Максимально допустимый средний прямой ток I_{FAVm} , А	305
Амплитуда максимально допустимого прямого тока тиристора I_{FM} , А	958
Средний ток перегрузки тиристора $I_{F(OV)}$, А	610
Ударный неповторяющийся прямой ток тиристора I_{FSM} , кА	21

2.4.4 Исследование переходных процессов в ТРПУ на лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ

С целью подтверждения результатов расчета переходного процесса в ТРПУ при повышении напряжения преобразовательного трансформатора (а значит и ПА), произведен расчет переходного процесса на лабораторной физической модели и сравнение результатов с осциллограммами, полученных на ней экспериментально. Основные параметры устройств, применяемых в лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключающим устройством представлены в Приложение В.

В соответствии со схемой замещения трансформатора с ТРПУ (рисунок 2.29) произведен расчет эквивалентного активного $R_{\text{экв}} = 5,81$ Ом и реактивного $X_{\text{экв}} = 4,75$ Ом сопротивлений схемы.

Полное эквивалентное сопротивление цепи будет равно:

$$Z_{\text{экв}} = \sqrt{5,81 + 4,75} = 7,5 \text{ Ом.}$$

Комплексное значение амплитуды тока в цепи до коммутации определяется по формуле (2.45) и будет равна:

$$i(0_-) = \frac{220}{7,5e^{j \arctg \frac{4,75}{5,8}}} = \frac{220}{7,5e^{j39}} = 29,3e^{-j39} \text{ А.}$$

В соответствии с первым законом коммутации, величина тока в цепи до коммутации равна величине тока в первый момент после коммутации, тогда в соответствии с формулой (2.46):

$$i(0_-) = i(0_+) = 29,3e^{-j39} \text{ А.}$$

В соответствии со схемой замещения трансформатора с ТРПУ (рисунок 2.31, а) произведен расчет эквивалентного активного $R_{\text{экв1}} = 5,76$ Ом и реактивного $X_{\text{экв1}} = 1,48$ сопротивлений схемы.

Полное эквивалентное сопротивление цепи равно $Z_{\text{экв1}} = 5,95$ Ом.

Для схемы на рисунке 2.31, а в установившемся режиме после коммутации $t = (0_+)$, в соответствии с формулой (2.47), принужденная составляющая тока равна:

$$i_{np1}(t) = \frac{220}{5,95e^{j \arctg \frac{1,48}{5,76}}} = \frac{220}{5,95e^{j14}} = 37e^{-j14} \text{ А.}$$

По формуле (2.52) определяется постоянная интегрирования A_1 :

$$A_1 = 29,3e^{-j39} - 37e^{-j14} = 16,2e^{-j144}.$$

Величина тока трансформатора с ТРПУ при переходном процессе для первого контура (рисунок 2.31, а), в соответствии с формулой (2.50), равна:

$$i_{1-к}(t) = 37e^{-j14} + 16,2e^{-j144} e^{-\frac{t}{0,0026}} \text{ А.}$$

В соответствии со схемой замещения трансформатора с ТРПУ (рисунок 2.31, б) произведем расчет эквивалентного активного $R_{\text{экв2}} = 0,0137$ Ом и реактивного $X_{\text{экв2}} = 3,3$ Ом сопротивлений схемы.

Для схемы на рисунке 2.31, б в установившемся режиме после коммутации $t = (0+)$, в соответствии с формулой (2.54), принужденная составляющая тока равна:

$$i_{np2}(t) = \frac{20e^{j180}}{3,3e^{j \arctg \frac{3,3}{0,0137}}} = \frac{20e^{j180}}{3,3e^{j9}} = 6e^{j91} \text{ А.}$$

Постоянная интегрирования A_2 :

$$A_2 = 29,3e^{-j39} - 6e^{j91} = 33,5e^{-j77}.$$

Величина тока трансформатора с ТРПУ при переходном процессе для второго контура (рисунок 2.31, б), в соответствии с формулой (2.56), равна:

$$i_{2-к}(t) = 6e^{j91} + 33,5e^{-j77} e^{-\frac{t}{0,06}} \text{ А.}$$

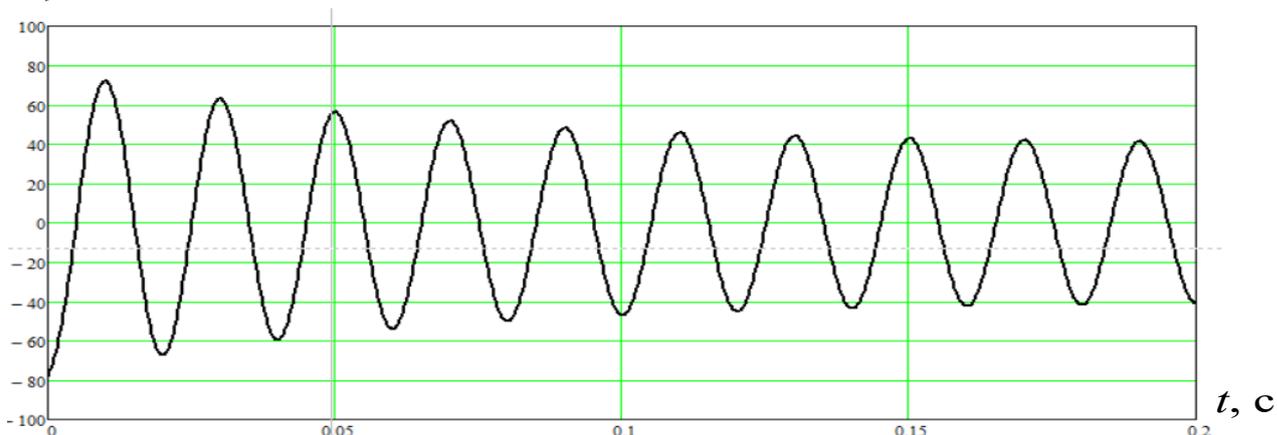
Величина тока трансформатора с ТРПУ при переходном процессе для обоих контуров, в соответствии с формулой (2.60), равна:

$$i_{п.п.}(t) = 35,92e^{-j5} + 16,2e^{-j44} e^{-\frac{t}{0,0026}} + 33,5e^{-j77} e^{-\frac{t}{0,06}}.$$

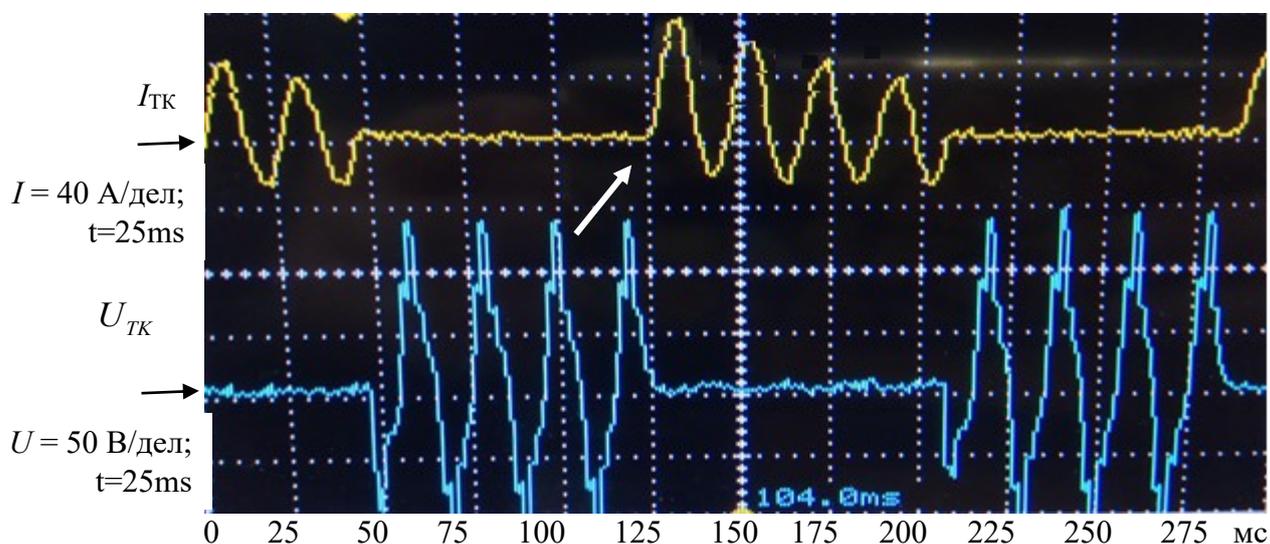
На рисунке 2.34 показаны осциллограммы тока тиристорного ключа $I_{ТК}$ при переходном процессе в момент повышения напряжения лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ, полученные аналитически и экспериментально, методом осциллографирования лабораторной физической модели.

На рисунке 2.34, а видно, что продолжительность переходного процесса составляет около 90 мс, а амплитуда тока протекающего через тиристорный ключ ТК в первый полупериод после его открытия равна, примерно, 72 А. Из рисунка 2.34, б видно, что при открывании тиристорного ключа ТК в момент времени $t = 125$ мс, начинается переходный в результате разряда запасенной в НР энергии.

а)

 I_{TK}, A 

б)



а – полученный расчетным путем;

б – полученный экспериментально на лабораторной физической модели

Рисунок 2.34 – Ток тиристорного ключа I_{TK} при переходном процессе в момент повышения напряжения лабораторной модели преобразовательного агрегата с ТРПУ

Продолжительность переходного процесса составляет 85 мс, причем амплитуда тока, протекающего через тиристорный ключ ТК в первый полупериод после его открытия, превышает амплитуду тока установившегося режима, примерно, в 1,9 раз и равна 76 А. Сравнивая результаты расчета переходного процесса в момент повышения напряжения и результаты, полученные экспериментально на лабораторной физической модели ПА с ТРПУ, можно сделать вывод, что они совпадают, с учетом погрешности 5 %.

Исследования, проведенные аналитически и экспериментально на имитационной и лабораторной физической моделях показали, что основное влияние на амплитуду тока через тиристорный ключ ТК при переходном процессе при повышении напряжения трансформатора влияет сопротивление НР.

2.5 Выводы по второй главе

1) Разработана функциональная схема системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения трансформатора преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключающим устройством ТРПУ.

2) Представлена принципиальная электрическая схема соединения исполнительного регулируемого тиристорно-реакторного переключающего устройства с первичными обмотками трехфазного трансформатора, рассмотрены симметричные и несимметричные режимы его работы, а также определены основные соотношения параметров преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключающим устройством.

3) Разработана методика расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора исполнительного регулируемого тиристорно-реакторного переключающего устройства, где рациональное значение может быть получено в первом варианте при расчете коэффициента мощности и во втором варианте – при расчете потерь мощности преобразовательного агрегата.

4) С учетом разработанной методики произведен расчет основных параметров неуправляемого реактора исполнительного регулируемого тиристорно-реакторного переключающего устройства в составе преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10.

5) Проверка разработанной методики расчета рационального значения сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ произведена путем сравнения

результатов, полученных экспериментально на лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ с 12-пульсовым выпрямительным блоком, с трансформатором мощностью 30 кВА и линейным первичным напряжением 380 В, и аналитически, рассчитанные в соответствии с рассмотренными методиками. Погрешность составляет не более 2 %.

б) Разработана имитационная модель преобразовательного агрегата с ТРПУ, созданная в программном комплексе *Matlab Simulink*, на которой, совместно с лабораторной физической моделью, произведены экспериментальные исследования переходных процессов в ТРПУ, результаты которых соответствуют результатам аналитических исследований с учетом погрешности 5 % и на основании которых определены основные параметры тиристорно-реакторного переключающего устройства.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ТРПУ В СИСТЕМЕ БЕСКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

3.1 Общие положения

Режим работы ТРПУ при регулировании напряжения трансформатора определяется тиристорными ключами ТК устройства ТРПУ, которые могут находиться в закрытом или открытом состояниях, управление которыми может осуществляться в ручном или в автоматическом режимах.

В ручном режиме в систему не вводятся выходная регулируемая величина и возмущающее воздействие, которое в режиме автоматического управления в зависимости от вводимых величин образуют разомкнутую, замкнутую и комбинированную системы автоматического регулирования напряжения.

Разрабатываемое тиристорно-реакторное переключающее устройство регулирования напряжения трехфазного трансформатора, являясь, как и любая динамическая система, в системе автоматического регулирования напряжения, соответственно, и автоматического управления состоянием тиристорных ключей ТК устройства ТРПУ, может находиться в одном из двух режимов – стационарном (установившемся) и переходном [100, 119].

В работе рассматривается стационарный (установившийся) режим, который кроме того, подразделяется на стационарный статический и стационарный динамический режимы.

Стационарный статический (или статика) – это режим, при котором система находится в состоянии покоя, т.е. когда все внешние воздействия и параметры самой системы не меняются во времени. Это идеальный режим, которого при работе трансформатора, особенно в преобразовательном агрегате электрифицированных железных дорог практически не существует, так как все, в том числе основные

внешние воздействия, такие как напряжение питающей сети и тяговая нагрузка, изменяются во времени.

Поэтому для преобразовательного трансформатора с ТРПУ стационарный статический режим (статика) может рассматриваться как система управления состоянием тиристорных ключей в ручном режиме управления, соответствующему режиму регулирования напряжения «без возбуждения» ПБВ. При этом при изменении состояния тиристорных ключей получаем естественные внешние характеристики преобразовательного агрегата, полученные в результате расчетов в разделе 2.3, с разными уровнями напряжения холостого хода, представленные на рисунке 3.1.

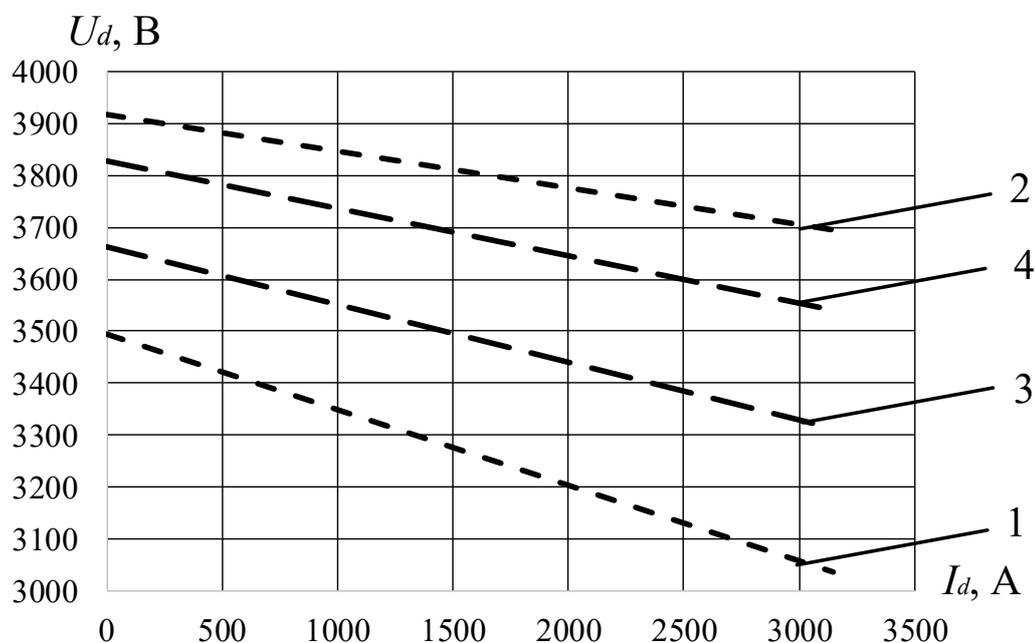


Рисунок 3.1 – Расчетные внешние характеристики ПА с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 при сопротивлении неуправляемого реактора 2,2 Ом

Расчетные внешние характеристики преобразовательного агрегата с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 получены в зависимости от состояния тиристорных ключей ТРПУ и при сопротивлении неуправляемого реактора 2,2 Ом.

В режиме работы ТРПУ с закрытых тиристорными ключами (см. раздел 2.2), имеем нижнюю ограничительную внешнюю характеристику 1 (рисунок 3.1); при

открытых тиристорных ключах в 3-х фазах – верхнюю ограничительную внешнюю характеристику 2. Между характеристиками 1 и 2 находится регулировочная зона с диапазоном регулирования:

$$d\% = \frac{U_{d_{\text{МАКС}}} - U_{d_{\text{МИН}}}}{U_{d_{\text{МИН}}}} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

внутри которой располагаются промежуточные внешние характеристики 3 и 4, при которых фазы трансформатора работают в несимметричном режиме, в отличие от симметричного режима при режимах 1 и 2. Увеличение наклона внешних характеристик от 4-ой до 1-ой вызвано участием в получении характеристик сопротивления неуправляемого реактора. При получении характеристики 1 в схеме участвуют только неуправляемые реакторы.

В преобразовательном агрегате с учетом двух промежуточных характеристик несимметричного режима работы трансформатора с ТРПУ имеем в одном диапазоне регулирования напряжения 4 внешних естественных характеристики и, соответственно, 3 ступени регулирования d_n . Значение величины 2-й и 3-й ступеней с приближением к верхней ограничительной внешней характеристике уменьшается, что соответствует теории пофазного регулирования напряжения, рассмотренного в [35].

Стационарные динамические режимы – это режимы, определяемые характером внешнего воздействия и подразделяются на стационарный динамический детерминированный режим, при котором на систему действуют детерминированное (регулярное) стационарное воздействие, примером которого является установившийся гармонический с различной частотой режим. При другом виде воздействия, представляющего собой случайные, но стационарные функции времени, система работает в стационарном динамическом случайном режиме. Примером такого режима является режим работы системы автоматического регулирования напряжения преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором с ТРПУ.

Для компенсации воздействия тяговой нагрузки используют системы автоматического регулирования напряжения трансформаторов, причем доказано [6, 101], что наиболее приемлемой для электрических железных дорог являются релейные системы автоматического регулирования с амплитудной модуляцией. В этом случае в нагрузку поступает постоянная составляющая, соответствующая напряжению питающей сети, приложенного к сетевой обмотке с числом витков w_β первичной обмотки трансформатора и переменная составляющая, появляющаяся за счет переключений между двумя регулировочными отводами трансформатора, тем самым добавляя и убирая к виткам сетевой обмотки с числом w_β витки регулировочной обмотки с числом w_α .

Изменяется также в допустимых пределах $\pm 10\%$ от номинального значения напряжение питающей сети, воздействием которого на замкнутую [8] систему автоматической стабилизации напряжения пренебрегаем с учетом наличия ПБВ головных понизительных трансформаторов тяговых подстанций.

Системы автоматического регулирования напряжения трансформаторов с амплитудной модуляцией можно разделить на релейные с модуляцией по амплитуде, фиксирующие:

1) Знак отклонения регулировочной величины (выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата).

2) Величину и (или) время отклонения регулировочной величины.

Однако, известно [120–124], что на электрифицированной железной дороге происходит непрерывное изменение расположения, числа и величин нагрузок. Поэтому токи тяговой подстанции и связанные с ними пропорциональной зависимостью напряжения на различных элементах системы электроснабжения (шинах РУ 3,3 кВ, контактной сети), носят случайный характер и в системе электроснабжения рассматриваются как случайная величина [120], описываемая, например, нормальным законом:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3.2)$$

где x – значение случайной величины;

$f(x)$ – плотность вероятности этой величины;

m – среднее значение;

σ – среднее квадратичное отклонение случайной величины, В.

При нормальном распределении, имеющим два параметра – среднее значение и среднее квадратичное отклонение, в стационарном режиме в системе автоматического управления состоянием тиристорных ключей необходимо использовать среднее значение тяговой нагрузки, которое должно приниматься в системе автоматического регулирования напряжения за основное внешнее воздействие.

В связи с чем, использование релейной системы автоматического регулирования напряжения трансформаторов с модуляцией по амплитуде, фиксирующей знак отклонения регулировочной величины (мгновенное значение выпрямленного напряжения), становится недопустимым.

С помощью систем автоматического регулирования напряжения с амплитудной модуляцией, фиксирующих величину и время отклонения регулировочной величины возможно реализовать плавное и ступенчатое регулирование выпрямленного напряжения.

3.2 Принцип реализации плавного бесконтактного автоматического регулирования выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с ТРПУ

Релейные системы автоматического регулирования с модуляцией по амплитуде, фиксирующие величину и (или) время отклонения регулировочной величины называются также системами с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), которые

способны работать на основной частоте, соответствующей частоте питающей сети $f = 50$ Гц, а также на высоких ($f > 50$ Гц) и низких ($f < 50$ Гц) частотах.

Так как регулирование выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с помощью ТРПУ осуществляется на первичной стороне преобразовательного трансформатора, поэтому использование системы БАРН с ШИМ на высокой частоте сопровождалось бы «резкой» синусоиды, а значит и ухудшением гармонического состава питающего напряжения, что недопустимо.

Получение автоматических внешних характеристик преобразовательного агрегата в системе БАРН с ТРПУ и ШИМ осуществляется путем переключения между естественными внешними характеристиками 1, 2, 3, 4 (рисунок 3.1).

При этом точность регулирования будет зависеть от частоты подачи сигнала управления на электроды управления тиристоров ТРПУ. Частота, при которой обеспечивается наименьшая погрешность регулирования, является рациональной.

Таким образом, частота сигнала управления будет зависеть от времени цикла регулирования $T_{ц}$:

$$f_{cy} = \frac{1}{T_{ц}}, \quad (3.3)$$

где $T_{ц} = NT$ – 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:

$$C_N^m = C_N^{m_0} + 3C_N^{m_1} + 3C_N^{m_2} + \dots + 3C_N^{m_n}, \quad (3.4)$$

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

3 – число фаз ТРПУ.

Например, при $N = 1$, число состояний будет равно:

$$C_N^m = C_1^0 + 3C_1^1.$$

Первый член C_1^0 соответствует симметричному режиму работы ТРПУ с закрытыми тиристорными ключами ТК (см. раздел 2.2) в течение одного периода T цикла регулирования $T_{ц}$. 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 фазе ТРПУ, а в двух других закрыт или открыт в двух фазах ТРПУ, в третьей закрыт (первый и второй несимметричные режимы) (см. раздел 2.2); или открыты во всех фазах ТРПУ (симметричный режим работы ТРПУ). Таким образом, при времени цикла регулирования, равном $T_{ц} = 1T$, возможны четыре состояния работы ТРПУ, а значит и четыре внешние естественные характеристики преобразовательного агрегата с ТРПУ.

Система БАРН с ТРПУ и временем цикла регулирования $T_{ц} = 1T$ соответствует работе на основной частоте. При моделировании работы системы с временем цикла регулирования $T_{ц} = 1T$, сигнал управления на электроды управления тиристорных тиристорных ключей ТК представляется в виде числа с двоичным кодом, где логическая единица соответствует подаче сигнала на электроды управления тиристорных тиристорного ключа ТК ТРПУ в течение времени равному одному периоду T . При логическом нуле сигнал управления на электроды управления тиристорных не подается и тиристорный ключ ТК закрыт также в течение времени T .

Таким образом, для внешних естественных характеристик 1-4 (рисунок 3.1) в системе БАРН с ТРПУ и ШИМ на основной частоте сигналы управления тиристорными ключами ТК представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Номера уровней напряжения холостого хода и соответствующие им сигналы управления тиристорными ключами ТК в системе БАРН с ТРПУ и ШИМ на основной частоте

Уровень выпрямленного напряжения холостого хода ПА U_{d0} , В	Номер уровня U_{d0} внешней естественной характеристики ПА	Сигнал управления
3500	1	0-0-0
3660	3	1-0-0
3820	4	1-1-0
3910	2	1-1-1

Работа системы БАРН с ТРПУ и ШИМ на низкой частоте осуществляется при времени цикла регулирования $T_{\text{ц}} > 1T$. Например, при времени цикла $T_{\text{ц}} = 2T$ число состояний тиристорных ключей ТК определяется соотношением:

$$C_N^m = C_2^0 + 3C_2^1 + 3C_2^2.$$

К двум коэффициентам C_1^0 и C_1^1 , рассмотренных ранее, добавляется C_2^2 . Коэффициент C_2^2 соответствует открытому состоянию тиристорного ключа ТК в течение двух периодов T цикла регулирования $T_{\text{ц}}$, причем тиристорный ключ ТК может быть открыт только в одной фазе ТРПУ, а в двух других закрыт; открыт в двух фазах, в третьей закрыт; или открыты во всех фазах ТРПУ.

Таким образом, при времени цикла регулирования, равном $T_{\text{ц}} = 2T$, получаем $C_N^m = 7$, а значит и семь внешних естественные характеристики преобразовательного агрегата с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10, показанных на рисунке 3.2.

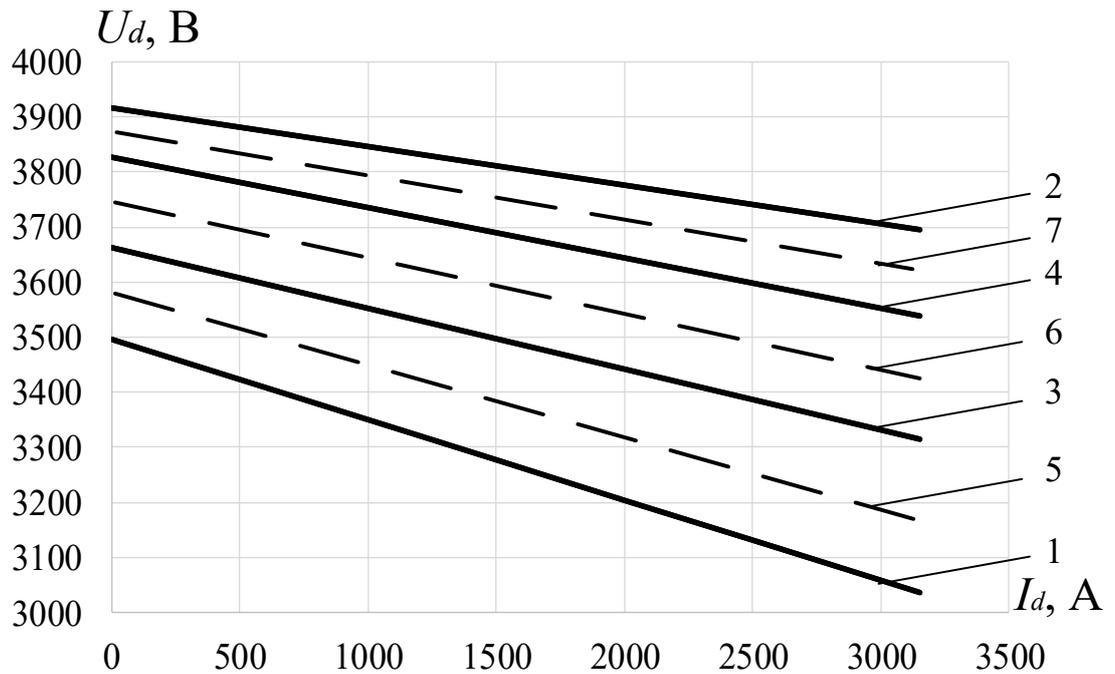


Рисунок 3.2 – Расчетные внешние характеристики преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП-12500/10 в системе БАРН с ТРПУ и ШИМ на низкой частоте с временем цикла регулирования $T_{ц} = 2T$

Внешние характеристик 1, 2, 3, 4 можно определить, как основные, ввиду того, что получаются в результате изменения режимов работы ТРПУ (переключения регулировочных отводов обмоток трансформатора), а характеристики 5, 6, 7 как дополнительные – появившиеся в результате изменения скважности работы тиристорных ключей ТК.

Таким образом для внешних естественных характеристик 1-7 (рисунок 3.2) система БАРН с ТРПУ и ШИМ при времени цикла регулирования, равном $T_{ц} = 2T$, сигналы управления тиристорными ключами ТК ТРПУ представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Номера уровней напряжения холостого хода и соответствующие им сигналы управления тиристорными ключами ТК в системе БАРН с ТРПУ и ШИМ на низкой частоте с $T_{ц} = 2T$

Уровень выпрямленного напряжения холостого хода ПА U_{d0} , В	Номер уровня U_{d0} внешней естественной характеристики ПА	Сигнал управления
3500	1	00-00-00
3580	5	10-00-00
3660	3	11-00-00
3740	6	11-10-00
3820	4	11-11-00
3880	7	11-11-10
3910	2	11-11-11

Например, за время $T_{ц} = 2T$, подача цикла сигнала управления для каждой фазы (цикла регулирования) в ТРПУ осуществляется в течение двух периодов T , причем соотношение периодов состояния в цикле регулирования:

1 уровень: 00 – 00 – 00 – соответствует симметричному режиму работы ТРПУ с закрытыми тиристорными ключами ТК в течение всего цикла регулирования $T_{ц}$;

5 уровень: 10 – 00 – 00 – в течение первого периода цикла регулирования $T_{ц}$ ТРПУ будет работать в несимметричном режиме, когда в одной из фаз ТРПУ тиристорный ключ ТК открыт, в двух других закрыты; а во втором периоде ТРПУ будет в симметричном режиме с закрытыми тиристорными ключами ТК во всех фазах;

3 уровень: 11 – 00 – 00 – в течение обоих периодов цикла регулирования $T_{ц}$ ТРПУ будет работать в несимметричном режиме, когда в одной из фаз ТРПУ тиристорный ключ ТК открыт, в двух других закрыты;

6 уровень: 11 – 10 – 00 – в течение первого периода цикла регулирования $T_{ц}$ ТРПУ будет работать в несимметричном режиме, когда в двух фазах ТРПУ тиристорные ключи ТК открыты, в одной закрыты; а во втором периоде ТРПУ будет в

несимметричном режиме - в одной из фаз ТРПУ тиристорный ключ ТК открыт, в двух других закрыты;

4 уровень: 11 – 11 – 00 – в течение всего периода цикла регулирования $T_{ц}$ ТРПУ будет работать в несимметричном режиме, когда в двух фазах ТРПУ тиристорные ключи ТК открыты, в одной закрыт;

7 уровень: 11 – 11 – 10 – в течение первого периода цикла регулирования $T_{ц}$ ТРПУ будет работать в симметричном режиме с открытыми тиристорными ключами ТК; а во втором периоде ТРПУ будет в несимметричном режиме, когда в двух фазах ТРПУ тиристорные ключи ТК открыты, в одной закрыт;

2 уровень: 11 – 11 – 11 – соответствует симметричному режиму работы ТРПУ с открытыми тиристорными ключами ТК в течение всего цикла регулирования $T_{ц}$.

Возможность плавного регулирования выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с ТРПУ в соответствии с рассмотренным способом управления тиристорными ключами ТК, аналогичному [125], была подтверждена на лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ с преобразовательным трансформатором мощностью 30 кВА и линейным первичным напряжением $U_{1Н} = 380$ В. В результате проведенных испытаний погрешность регулирования не превысила 2 %, что говорит о работоспособности рассмотренного способа [126].

Выбор рационального значения частоты $f_{сy}$ подачи сигнала управления тиристорными ключами ТК ТРПУ является сложной задачей, решить которую аналитически возможно только путем создания масштабной имитационной модели участка системы тягового электроснабжения (СТЭ), которая учитывала бы индуктивность контура протекания тока нагрузки, непрерывное изменение расположения, числа и величины нагрузок, а также инерционность движения самого поезда. Определить рациональное значение частоты $f_{сy}$ возможно также эксперимен-

тально, путем создания физической модели и проведения ряда испытаний на реальной тяговой подстанции с различными значениями частот $f_{\text{СУ}}$, где за критерий рациональности принималась бы погрешность регулирования.

3.3 Принцип реализации ступенчатого бесконтактного автоматического регулирования выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с ТРПУ

Эффективным средством поддержания необходимого уровня напряжения в контактной сети электрифицированных железных дорог являются ступенчатые САР напряжения.

Графический алгоритм работы ступенчатой САР напряжения под нагрузкой известен [43] и схематически показан на рисунке 3.3.

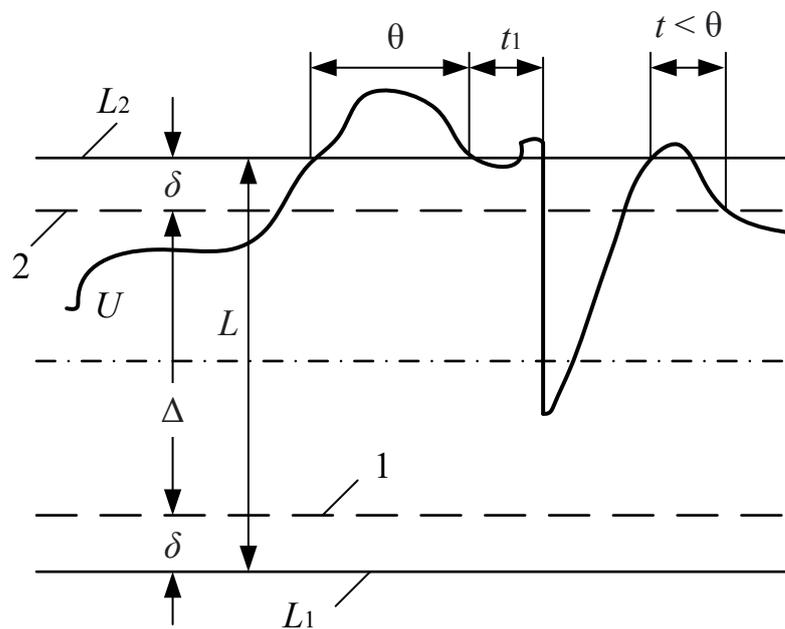
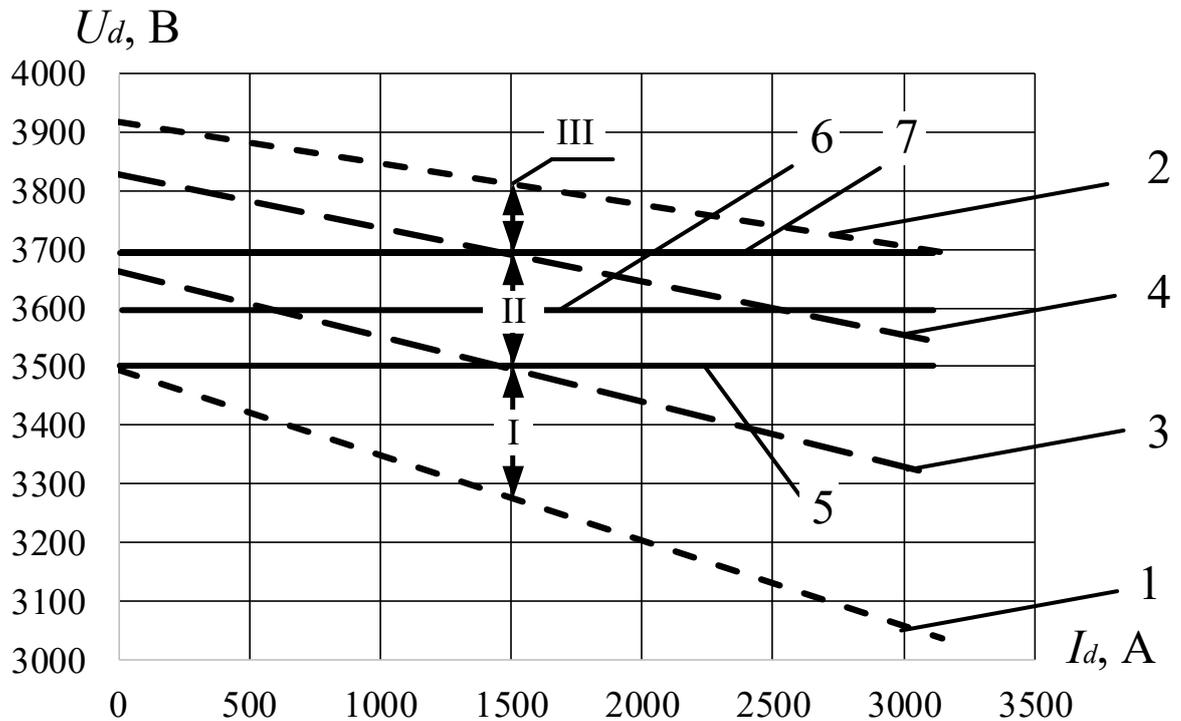


Рисунок 3.3 – Графический алгоритм работы ступенчатой САР напряжения под нагрузкой тяговых подстанций

Если в процессе своего изменения напряжения на шинах подстанции U превысило некоторый уровень L_2 и в течение времени θ остается выше уровня L , переключатель приходит в действие и через собственное время работы t_1 производит

переключение. Если продолжительность «выброса» напряжения t меньше времени θ , называемой выдержкой времени, то переключение не происходит [43]. Во избежание явления «качания» зона нечувствительности L берется шире диапазона регулирования Δ на 2δ [43]. Горизонтальные прямые L_1 или L_2 являются предельными значениями зоны нечувствительности L .

Естественные 1, 2, 3, 4 и автоматические 5, 6, 7 внешние характеристики преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ представлены на рисунке 3.4. Процесс получения автоматических характеристик 5, 6, 7 осуществляется ступенчато, путем переключения между естественными внешними характеристиками 1, 2, 3, 4.



1, 2, 3, 4 – естественные внешние характеристики; 5, 6, 7 – автоматические внешние характеристики; I, II, III – номера ступеней регулирования

Рисунок 3.4 – Внешние характеристики преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП-12500/10 в системе БАРН с ТРПУ

В ступенчатых контакторных устройствах РПН для переключения отводов трансформатора используют специальные привода, а после выполнения определен-

ного числа переключений появляется необходимость в замене контакторов, которые изнашиваются в результате горения электрической дуги, а также в замене трансформаторного масла в баке контакторов, что значительно снижает срок службы и надежность переключателя [43].

Исходя из рассмотренных в разделе 2.2 режимов работы ТРПУ, переключение отводов первичной обмотки трансформатора с помощью ТРПУ осуществляется бесконтактно с помощью тиристорных ключей ТК. Откуда следует, что недостатки, которые относятся к контакторным переключателям, связанные с износом контакторов, заменой масла и использованием приводом отсутствуют, что значительно увеличивает срок службы устройства. Другими словами, срок службы ТРПУ зависит от износа самих тиристорных ключей ТК. В свою очередь износ тиристорных ключей ТК зависит от естественной коммутации тиристорных ключей ТК [127], которая происходит в установленном режиме работы ТРПУ с открытыми тиристорными ключами ТК, и в большей степени от переключения режимов работы ТРПУ, и в следствии чего, возникающих коммутационных процессов.

С увеличением зоны нечувствительности L или выдержки времени θ , уменьшается число переключений ТРПУ, а значит снижается качество регулирования, но при этом увеличиваются срок службы ТРПУ и сроки между ревизиями устройства. С уменьшением зоны нечувствительности L или выдержки времени θ наблюдается противоположный результат. Таким образом встает задача определения рациональных значений зоны нечувствительности L и выдержки времени θ для каждой ступени регулирования так, чтобы получить наибольшую точность регулирования при наименьшем числе срабатываний переключателя.

Для определения количественных характеристик переключателя (числа переключений) выпрямленное напряжение необходимо рассматривать как случайную функцию времени, т.е. учитывать возникновение различных значений напряжения. При решении данной задачи применяется математический аппарат для исследования выбросов случайных функций [128]. Под выбросом случайной функции напря-

жения за заданный уровень понимается пересечение графиком функции горизонтальной прямой L_1 или L_2 , которые являются предельными значениями зоны нечувствительности L .

Таким образом, при решении задачи об определении числа переключений ТРПУ необходимо знать число и продолжительность «выбросов» (рисунок 3.3) выпрямленного напряжения за заданный уровень в течение заданного времени. Задача осложняется тем, что получить детерминированные зависимости напряжения на шинах тяговой подстанций от времени практически невозможно [129], ввиду его изменения в широких пределах в результате непрерывного изменения расположения, числа и величины нагрузок. Решение данного вопроса стало возможным при рассмотрении напряжения как случайной функции времени [129, 130], а при оценке режимов работы СТЭ – использование статистико-вероятностных методов.

Сказанное свидетельствует о том, что для описания напряжения в виде стационарной функции (в том числе и для оценки качества регулируемого напряжения), необходимо знать вероятностные характеристики выпрямленного напряжения, математическое ожидание и корреляционную функцию, которые могут быть определены экспериментально, исходя из результатов измерения самопишущих приборов.

3.4 Методика определения числа переключений тиристорных ключей ТРПУ в системе бесконтактного автоматического ступенчатого регулирования напряжения

3.4.1 Общие положения

При решении задачи об определении числа переключений тиристорных ключей ТК ТРПУ в системе БАРН за основу взяты существующие методики

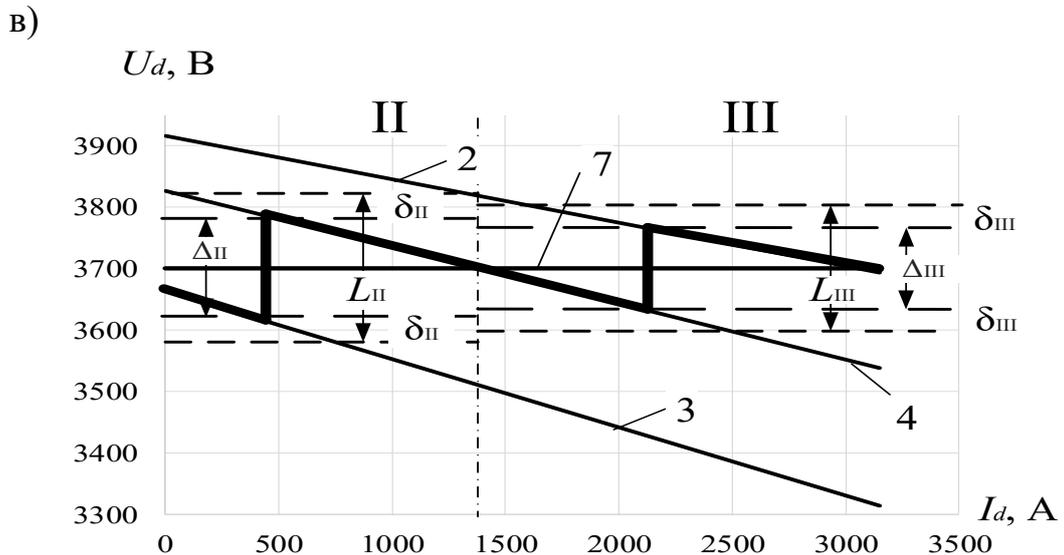
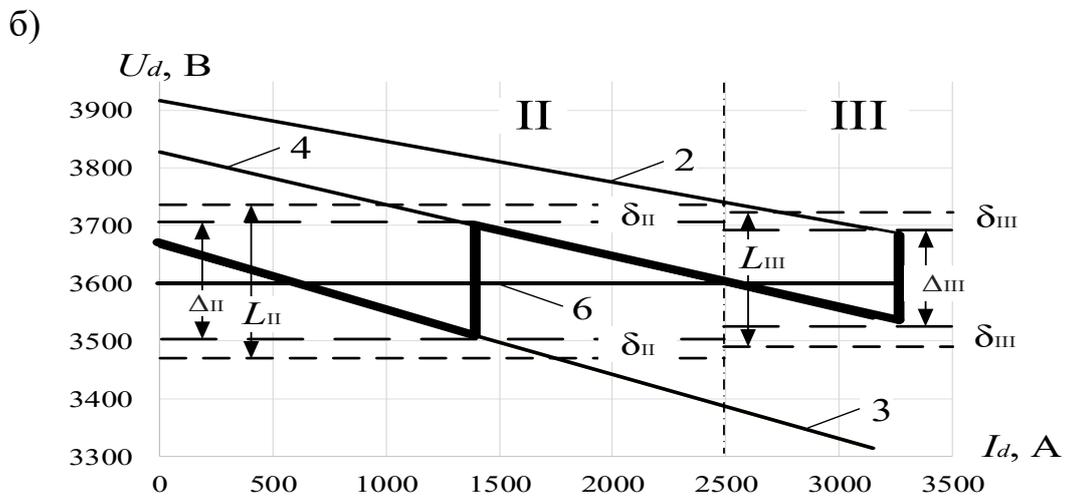
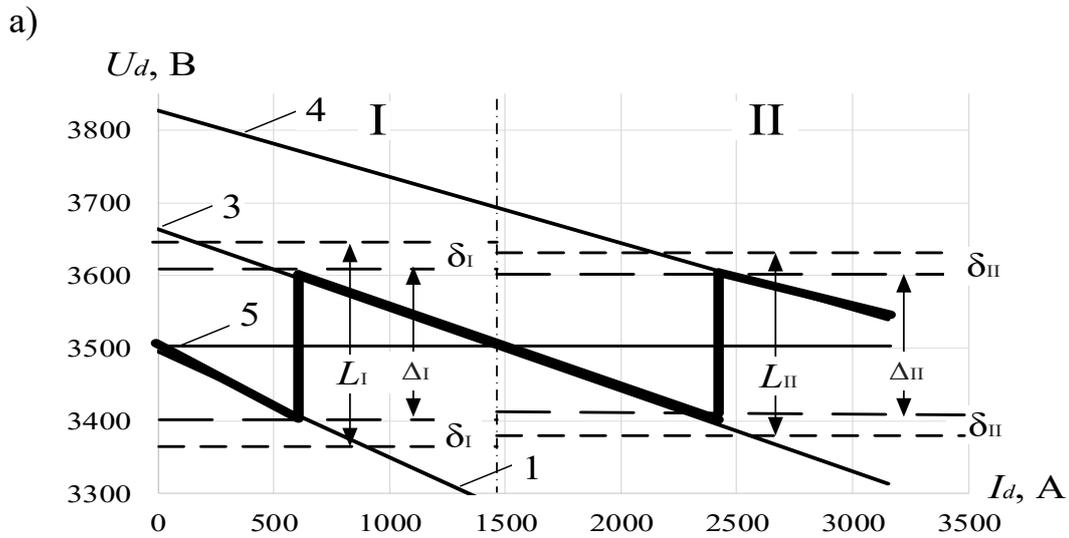
[120, 131], в которых производится исследование выбросов случайных стационарных функций.

Описание методики определения числа переключений будет рассмотрено на примере преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ.

На рисунке 3.5 представлен процесс ступенчатого регулирования выпрямленного напряжения путем переключения между естественными внешними характеристиками 1, 2, 3, 4 (рисунок 3.4) с возможными значениями зоны нечувствительности L и диапазоном регулирования Δ при реализации автоматических внешних характеристик 5, 6, 7 (рисунок 3.4) преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ.

В соответствии с представленным рисунком 3.5, для получения автоматической характеристики 5, осуществляется переключение между естественными характеристиками 1, 3 и 4; автоматической характеристики 6 – между естественными характеристиками 3, 4 и 2. автоматической характеристики 7 – между естественными характеристиками 3, 4 и 2.

Особенностью рассматриваемой ступенчатой системы БАРН с ТРПУ является уменьшение величины d_n II и III ступеней регулирования с приближением к верхней ограничительной внешней характеристике, что соответствует теории пофазного регулирования [35], а значит и число переключений ТРПУ, которое бы обеспечивало необходимое качество регулирования напряжения, будет различно для каждой автоматической характеристики 5, 6, 7.



а – характеристики 5; б – характеристики 6; в – характеристики 7

Рисунок 3.5 – Процесс ступенчатого регулирования выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ при реализации автоматических внешних характеристик

Величину напряжения каждой из трех I, II, III (рисунок 3.4, рисунок 3.5) ступеней регулирования можно определить по формуле:

$$d_n = U_{d0n_{\text{МАКС}}} - U_{d0n_{\text{МИН}}} . \quad (3.5)$$

где n – номер ступени регулирования, равный I, II или III;

$U_{d0n_{\text{МАКС}}}, U_{d0n_{\text{МИН}}}$ – средние значения выпрямленного напряжения холостого хода преобразовательного агрегата с ТРПУ, соответствующие предельным значениям ступени n (I, II, III).

Из рисунка 3.5 видно, что автоматические характеристики могут пересекать сразу несколько ступеней регулирования I, II, III. В случае рассматриваемой системы БАРН с ТРПУ автоматическая характеристика 5 пересекает ступени I и II (рисунок 3.5, а), а значит величина зоны нечувствительности будет принимать значения L_I , с предельными значениями L_{1-I} и L_{2-I} , и L_{II} , с предельными значениями L_{1-II} и L_{2-II} , а диапазоны регулирования Δ_I и Δ_{II} будут равны соответствующим значениям ступеней регулирования d_I и d_{II} . Аналогично автоматические внешние характеристики 6 и 7 пересекает ступени II и III (рисунок 3.5, б, в), а значит величина зоны нечувствительности будет принимать значения L_{II} , с предельными значениями L_{1-II} и L_{2-II} , и L_{III} , с предельными значениями L_{1-III} и L_{2-III} , а диапазоны регулирования Δ_{II} и Δ_{III} будут равны соответствующим значениям ступеней регулирования d_{II} и d_{III} .

В соответствии с вышесказанным, методику определения числа переключений ТРПУ в ступенчатой системе БАРН при пофазном регулировании выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата можно разделить на два этапа.

3.2.2 Расчет внешних естественных характеристик преобразовательного агрегата с ТРПУ

Целью первого этапа является расчет зоны нечувствительности L и ее предельных значений L_1 или L_2 для каждой автоматической характеристики 5, 6, 7 (рисунок 3.4).

Для этого необходимо произвести расчет внешних естественных характеристик 1, 2, 3, 4 (рисунок 3.4) преобразовательного агрегата с ТРПУ. Алгоритм расчета внешних характеристик представлена на рисунке 3.6.

На основании результатов расчетов внешних естественных характеристик 1, 2, 3, 4, производится расчет зоны нечувствительности L_n каждой из трех ступеней регулирования I, II, III по формуле:

$$L_n = L_{2-n} - L_{1-n}, \quad (3.6)$$

где

$$L_{1-n} = U_{d.з} - \left(\frac{\Delta_n}{2} + \delta_n \right), \quad (3.7)$$

$$L_{2-n} = U_{d.з} + \left(\frac{\Delta_n}{2} + \delta_n \right) \quad (3.8)$$

где $U_{d.з}$ – заданное среднее значение выпрямленного напряжения, равное значению рассматриваемой автоматической характеристики 5, 6, 7.

В соответствии с опытом практической эксплуатации ступенчатых устройств автоматического регулирования напряжения, «...зона нечувствительности L_n берется на 20-40% процентов шире диапазона регулирования Δ_n » [131].

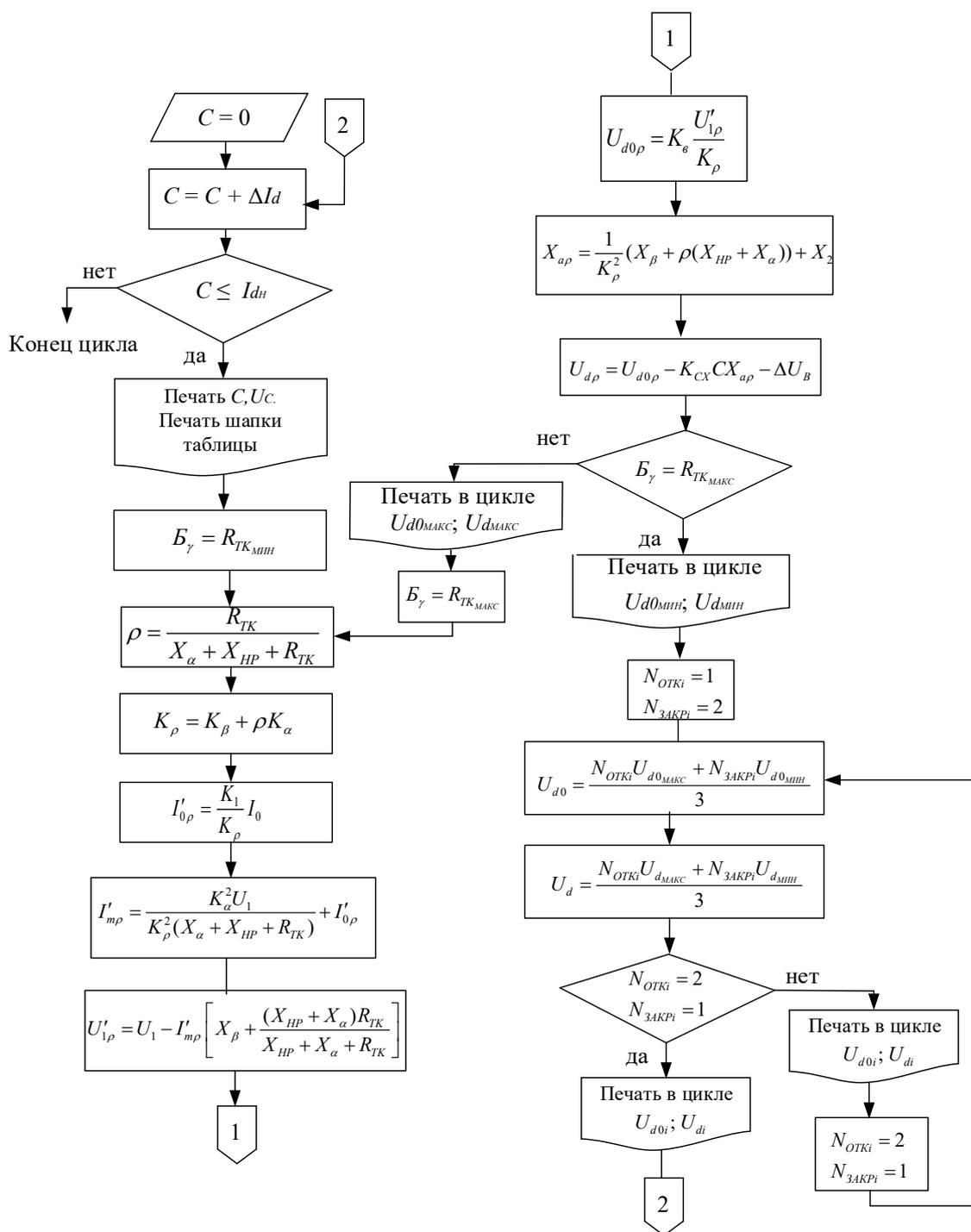


Рисунок 3.6 – Схема алгоритма расчета внешних естественных характеристик 1, 2, 3, 4 преобразовательного агрегата с ТРПУ

На основании рассчитанных внешних естественных характеристик преобразовательного агрегата в системе БАРН с ТРПУ определяются места перехода автоматической внешней характеристики с одной ступени регулирования на другую и рассчитывается среднее значение напряжения диапазона регулирования Δ_{CP} и

среднее значение зоны нечувствительности L_{CP} для каждой автоматической внешней характеристики по формулам:

$$\Delta_{CP} = \frac{\Delta_n I_{dP-n} + \Delta_{n+1} (I_{dP-(n+1)} - I_{dP-n}) + \dots + \Delta_k (I_{dH} - I_{dP-(k-1)})}{I_{dH}}, \quad (3.9)$$

где I_{dP} – величина тока нагрузки преобразовательного агрегата, определяемая в результате расчетов внешних характеристик преобразовательного агрегата с ТРПУ, при которой происходит переход автоматической внешней характеристики с одной ступени регулирования на другую;

k – номер последней ступени, через которую проходит автоматическая внешняя характеристика.

$$L_{CP} = \frac{L_n I_{dP-n} + L_{n+1} (I_{dP-(n+1)} - I_{dP-n}) + \dots + L_k (I_{dH} - I_{dP-(k-1)})}{I_{dH}}, \quad (3.10)$$

Для преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ из рисунка 3.5 видно, что автоматическая характеристика 5 пересекает две ступени I и II в точке раздела при токе $I_{dP} = 1450$ А, тогда:

– формула (3.9) примет вид:

$$\Delta_{CP-5} = \frac{\Delta_I I_{dP} + \Delta_{II} (I_{dH} - I_{dP})}{I_{dH}};$$

– формула (3.10) примет вид:

$$L_{CP-5} = \frac{L_I I_{dP} + L_{II} (I_{dH} - I_{dP})}{I_{dH}}.$$

Автоматические характеристик 6 и 7 пересекают две ступени II и III в точках раздела при токе $I_{dP} = 2500$ А и $I_{dP} = 1400$ А соответственно, тогда средние значения напряжения диапазона регулирования Δ_{CP} можно найти по формуле:

$$\Delta_{CP-6,7} = \frac{\Delta_{II} I_{dP} + \Delta_{III} (I_{dH} - I_{dP})}{I_{dH}}.$$

Среднее значение зоны нечувствительности L_{CP} равно:

$$L_{CP-6,7} = \frac{L_I I_{dP} + L_{II} (I_{dH} - I_{dP})}{I_{dH}}.$$

Алгоритм расчета среднего значения напряжения диапазона регулирования Δ_{CP} и среднего значения зоны нечувствительности L_{CP} выбранной автоматической внешней характеристики преобразовательного агрегата в системе БАРН с ТРПУ показан на рисунке 3.7.

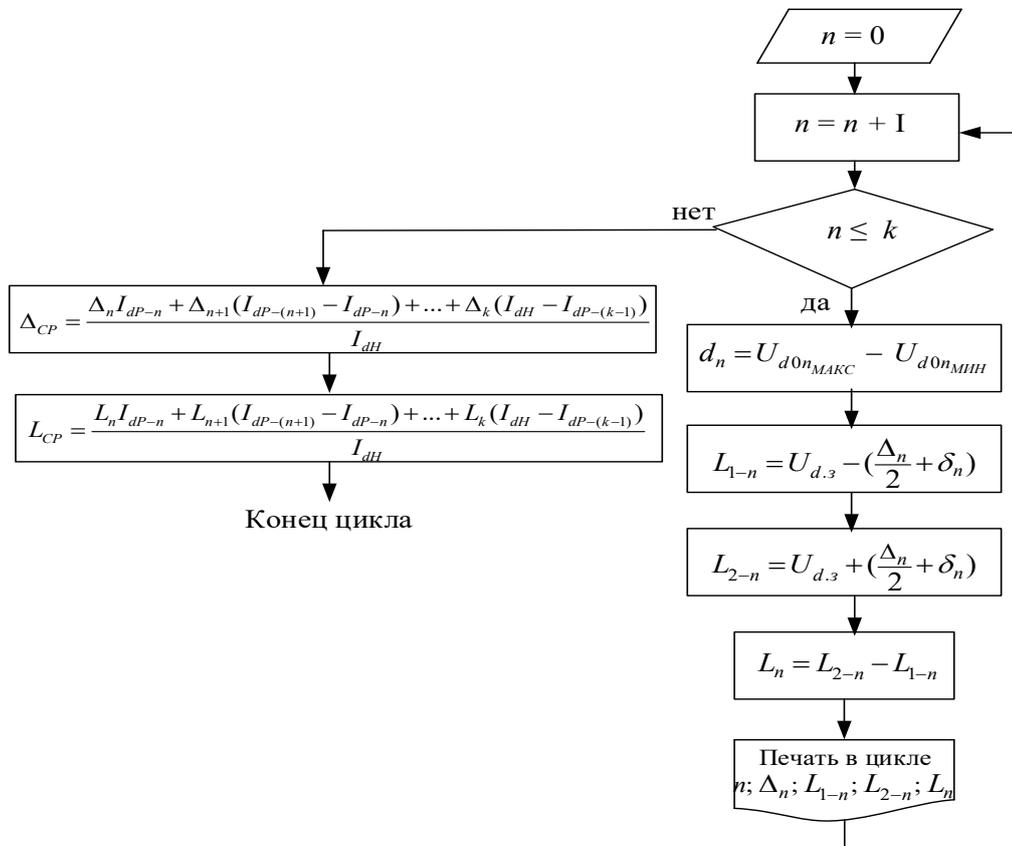


Рисунок 3.7 – Схема алгоритма расчета среднего значения напряжения диапазона регулирования Δ_{CP} и среднего значения зоны нечувствительности L_{CP}

В соответствии с представленным алгоритмом (рисунок 3.7), произведен расчет зон нечувствительности ступеней регулирования I, II, III преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ, результат которого представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета зон нечувствительности ступеней регулирования I, II, III преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ

Номер внешней автоматической характеристики	Номер ступени регулирования	Напряжение ступени регулирования d_n , В	Величина зоны нечувствительности L_n , В	Меньшее предельное значение L_{1-n} , В	Большее предельное значение L_{2-n} , В
5	I	168	201	3400	3600
	II	160	192	3404	3596
6	II	160	192	3504	3696
	III	91	109	3545	3654
7	II	160	192	3604	3796
	III	91	109	3645	3754

Результаты расчета среднего значения напряжения диапазона регулирования Δ_{CP} и среднего значения зоны нечувствительности L_{CP} преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты расчета среднего значения напряжения диапазона регулирования Δ_{CP} и среднего значения зоны нечувствительности L_{CP}

Номер внешней автоматической характеристики	Номер ступени регулирования	Среднее значение напряжения диапазона регулирования Δ_{CP} , В	Среднее значение зоны нечувствительности L_{CP}	Предельное значение L_{1-CP} , В	Предельное значение L_{2-CP} , В
5	I	164	196	3402	3598
	II				
6	II	146	175	3512	3687
	III				
7	II	122	146	3627	3773
	III				

3.2.3 Определение числа переключений тиристорных ключей ТРПУ

На основании результатов расчетов, представленных в таблице 3.4, на втором этапе методики производится уже непосредственно определение числа переключений ТРПУ.

При решении задачи об определении числа переключений ТРПУ определяется число и продолжительность «выбросов» выпрямленного напряжения за заданный уровень L_{1-CP} и L_{2-CP} .

Среднее суточное число «выбросов» напряжения (срабатываний ТРПУ) с нулевой выдержкой времени, определяется по известной формуле [131]:

$$N = \frac{T\sigma_v}{2\pi\sigma} \left\{ \sum_{j=0}^{j=l} \exp \left[-\frac{(L_{2-CP} + j\Delta_{CP} - \bar{u})^2}{2\sigma^2} \right] + \sum_{j=0}^{j=m} \exp \left[-\frac{(L_{1-CP} - j\Delta_{CP} - \bar{u})^2}{2\sigma^2} \right] \right\}, \quad (3.11)$$

- T – период наблюдения, принимается равным 1440 мин.;
- σ_v – среднеквадратичное отклонение скорости нарастания выпрямленного напряжения;
- σ – среднеквадратичное отклонение выпрямленного напряжения относительно оценки математического ожидания \bar{u} ;
- σ^2 – дисперсия выпрямленного напряжения относительно оценки математического ожидания \bar{u} ;
- l – число ступеней регулирования на повышение напряжения, расположенных выше верхнего предела зоны нечувствительности L_{2-CP} ;
- m – число ступеней регулирования на понижение напряжения, расположенных ниже нижнего предела зоны нечувствительности L_{1-CP} .

Для преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ для заданного уровня напряжения, соответствующего автоматической характеристике 5 и зоной нечувствительности,

превышающей на 20% процентов величину диапазона регулирования Δ_{CP} , по формуле (3.11) произведен расчет зависимости среднего суточного числа «выбросов» напряжения с нулевой выдержкой времени $N = f(\sigma)$ от среднеквадратичного отклонения выпрямленного напряжения. На рисунке 3.8 представлено семейство графиков зависимости среднего суточного числа «выбросов» напряжения с нулевой выдержкой времени $N = f(\sigma)$ от среднеквадратичного отклонения выпрямленного напряжения, определяемое среднеквадратичным отклонением скорости нарастания выпрямленного напряжения σ_v .

Из рисунка видно, что число «выбросов» напряжения N , а значит и число переключений ТРПУ, линейно зависит и увеличивается с повышением σ и σ_v .

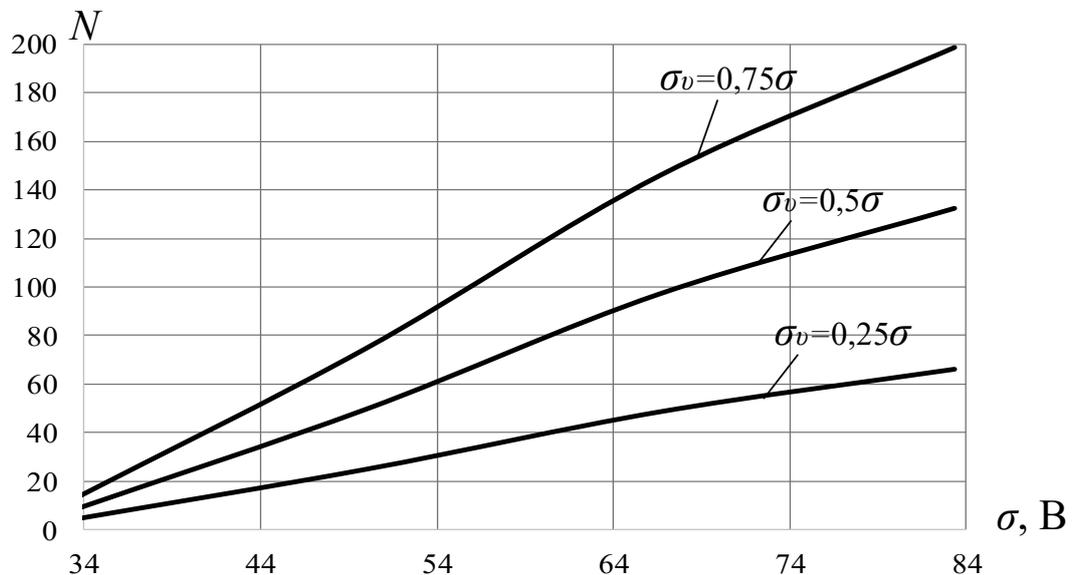
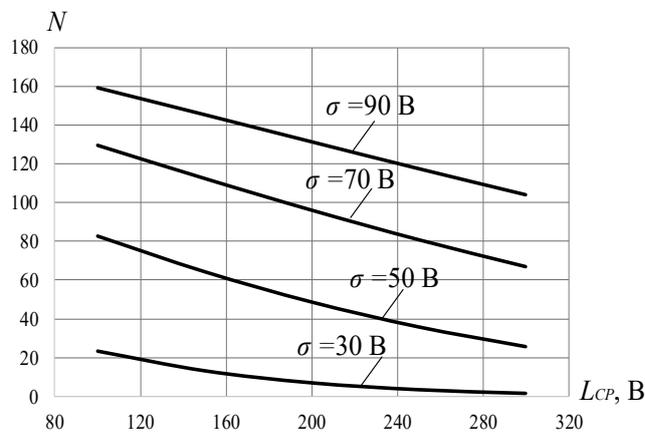


Рисунок 3.8 – Графики зависимости среднего суточного числа «выбросов» напряжения с нулевой выдержкой времени $N = f(\sigma)$ от среднеквадратичного отклонения выпрямленного напряжения

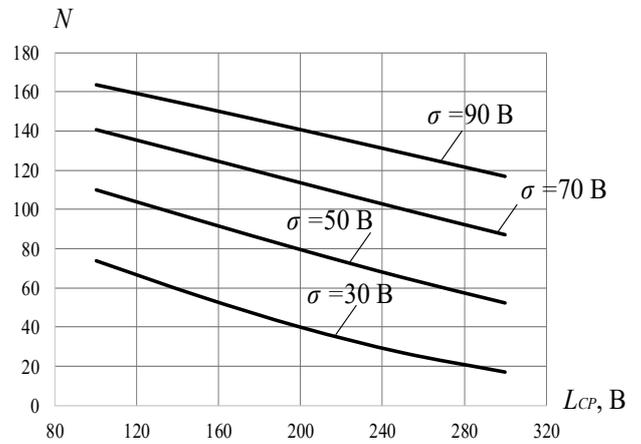
На рисунке 3.9 показано семейство графиков зависимости среднего суточного числа «выбросов» напряжения с нулевой выдержкой времени $N = f(L_{CP})$ от среднего значения зоны нечувствительности преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ, определяемое среднеквадратичным отклонением выпрямленного напряжения. При

проведении расчетов среднее квадратичное отклонение скорости нарастания выпрямленного напряжения принимаем равным $\frac{\sigma_v}{\sigma} = 0,5$, $U_{d.3} = \bar{u}$.

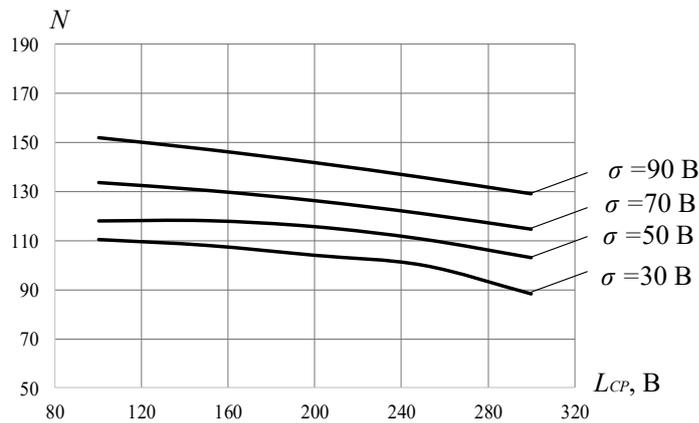
а)



б)



в)



а – соответствующего автоматической характеристике 5;

б – соответствующего автоматической характеристике 6;

в – соответствующего автоматической характеристике 7

Рисунок 3.9 – Графики зависимости среднего суточного числа «выбросов» напряжения с нулевой выдержкой времени $N = f(L_{CP})$ от среднего значения зоны нечувствительности для заданного уровня напряжения

Из рисунка 3.9 видно заметное уменьшение числа переключений ТРПУ с увеличением зоны нечувствительности.

Для определения числа переключений ТРПУ с различными выдержками времени необходимо знать среднее время пребывания случайной функции выше за-

данного уровня \bar{T}_a , исходя из которого и известного числа «выбросов» за этот уровень определяется средняя продолжительность «выброса» [131]. Тогда для нормальных случайных функций [128], где заданный уровень принимает:

– значение L_{1-n} получим:

$$\bar{\tau}_1 = 2\pi \frac{\sigma}{\sigma_v} \exp\left[\frac{(L_{1-CP} - \bar{u})^2}{2\sigma^2}\right] \left[1 - \Phi\left(\frac{(L_{1-CP} - \bar{u})}{\sigma}\right)\right]; \quad (3.12)$$

– значение L_{2-n} получим:

$$\bar{\tau}_2 = 2\pi \frac{\sigma}{\sigma_v} \exp\left[\frac{(L_{2-CP} - \bar{u})^2}{2\sigma^2}\right] \left[1 - \Phi\left(\frac{(L_{2-CP} - \bar{u})}{\sigma}\right)\right], \quad (3.13)$$

где $\Phi\left(\frac{(a - \bar{u})}{\sigma}\right) = \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du$ – табулированная функция [128];

a – предельные значения зоны нечувствительности – L_{1-CP} и L_{2-CP} .

Тогда общее значение продолжительности «выбросов» за уровни L_{1-CP} и L_{2-CP} будет равно их сумме:

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_1 + \bar{\tau}_2. \quad (3.14)$$

На основании проведенных расчетов для преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ по формулам (3.12-3.14) на рисунке 3.10 показана зависимость средней продолжительности «выброса» $\bar{\tau} = f(\sigma)$ от среднеквадратичного отклонения выпрямленного напряжения. В расчетах принималось $\frac{\sigma}{\sigma_v} = 2$, $U_{d.3} = \bar{u}$, L_{CP} принималась на 20% шире диапазона регулирования Δ_{CP} .

Из рисунка 3.10 можно сделать вывод, что при увеличении среднеквадратичного отклонения σ выпрямленного напряжения продолжительность выброса $\bar{\tau}$ уменьшается.

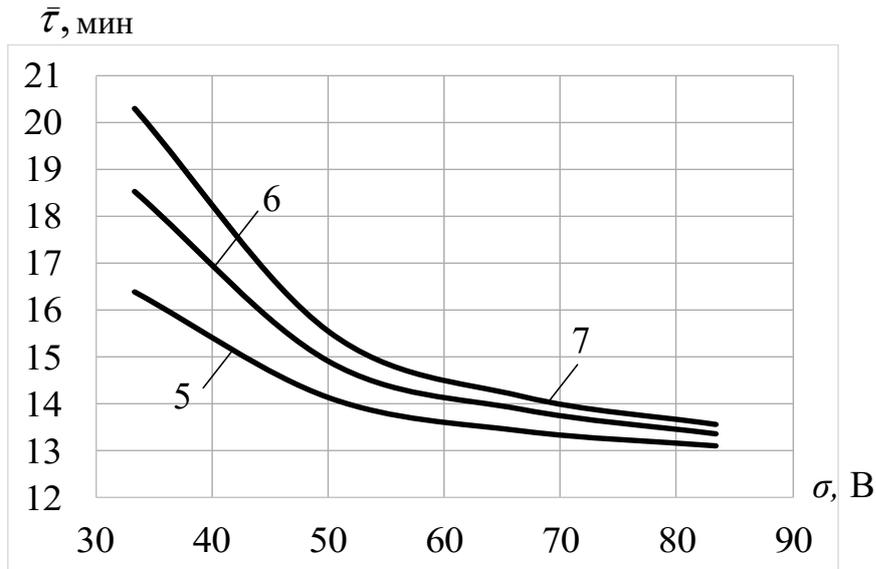


Рисунок 3.10 – Графики зависимости средней продолжительности «выброса» $\bar{\tau} = f(\sigma)$ от среднеквадратичного отклонения выпрямленного напряжения автоматических характеристик 5, 6, 7

Если ввести в систему выдержку времени для срабатывания ТРПУ θ , тогда если длительность «выброса» за определенный уровень будет менее θ , то система регулирования не сработает и переключающее устройство останется на прежней позиции.

Допуская, что длительность «выбросов» напряжения за заданный уровень распределена по экспоненциальному закону [133], то вероятность «выброса» напряжения, длительностью больше θ найдется из следующего выражения [131]:

$$P(t > \theta) = 1 - \int_0^{\theta} \lambda \exp[-\lambda t] dt = \exp[-\lambda \theta], \quad (3.15)$$

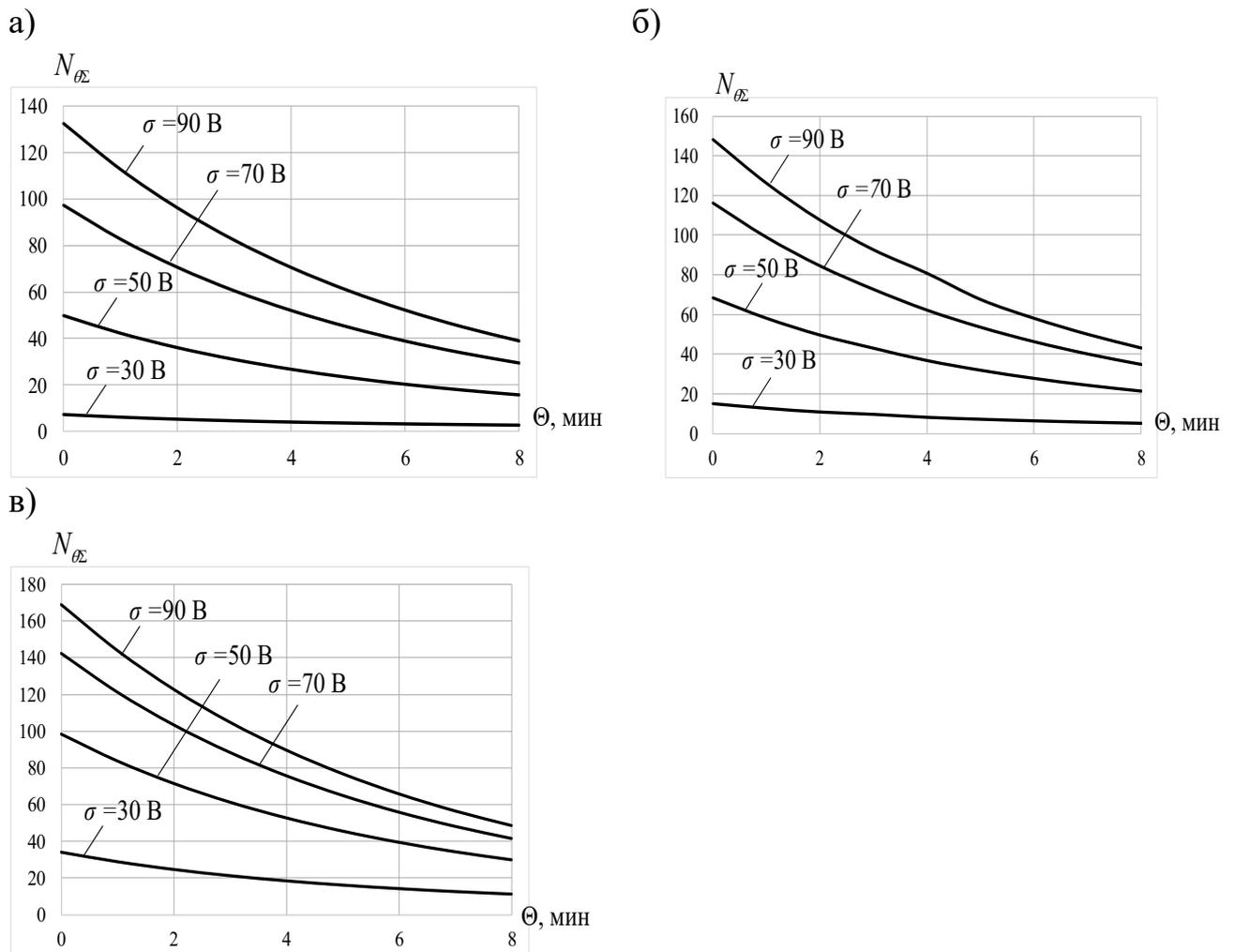
где $\lambda = 1/\bar{\tau}$.

Таким образом, число срабатываний ТРПУ можно определить по следующей формуле [127]:

$$N_{\theta\Sigma} = \frac{T\sigma_v}{2\pi\sigma} \left\{ \sum_{j=0}^{j=l} P_{L_2+j\Delta}(t > \theta) \exp\left[-\frac{(L_{2-CP} + j\Delta_{CP} - \bar{u})^2}{2\sigma^2}\right] + \sum_{j=0}^{j=m} P_{L_1-j\Delta}(t > \theta) \exp\left[-\frac{(L_{1-CP} - j\Delta_{CP} - \bar{u})^2}{2\sigma^2}\right] \right\}. \quad (3.16)$$

В соответствии с представленной формулой, произведен расчет числа срабатываний ТРПУ для преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ. В расчетах принималось $\frac{\sigma_v}{\sigma} = 0,5$, $U_{d.3} = \bar{u}$, L_{CP} принималась на 20% шире диапазона регулирования Δ_{CP} .

На рисунке 3.11 показано семейство графиков зависимости числа срабатываний ТРПУ $N_{\theta\Sigma} = f(\theta)$ от выдержки времени, определяемое среднеквадратичным отклонением выпрямленного напряжения.



в)

- а – соответствующий автоматической характеристике 5;
 б – соответствующий автоматической характеристике 6;
 в – соответствующий автоматической характеристике 7

Рисунок 3.11– Графики зависимости числа срабатываний ТРПУ $N_{\theta\Sigma} = f(\theta)$ от выдержки времени для заданного уровня напряжения

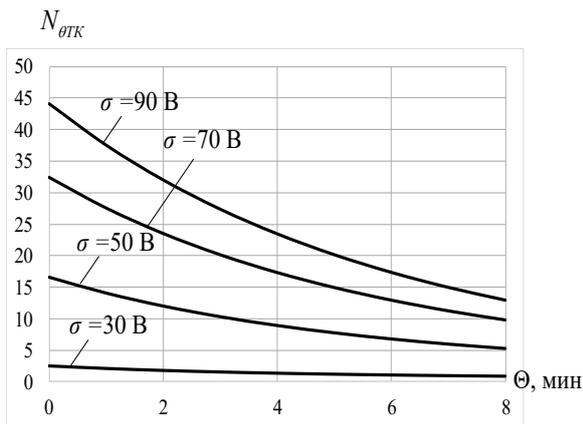
Исходя из пофазного принципа работы ТРПУ, под срабатыванием ТРПУ (рисунок 3.11) понимается коммутация тиристорного ключа только в одной фазе устройства, в других их состояние остается без изменения. При проектировании системы БАРН с ТРПУ следует учитывать количество переключений каждого тиристорного ключа в отдельности с целью обеспечения равномерности их износа. Например, при регулировании напряжения, происходит переключение между внешними естественными характеристиками 1 и 3 (рисунок 3.4), т.е. происходит коммутация только одного тиристорного ключа (например, фазы А), а тиристоры ключа фаз В и С остаются без изменения (закрыты). При достижении определенного числа переключений тиристорный ключ фазы А закроется и его место займет ключ фазы В, который будет участвовать в коммутации, а тиристоры ключей фаз А и С будут закрыты и т.д.

Тогда при равномерном использовании тиристорных ключей всех фаз, число переключений тиристорных ключей ТК $N_{отк}$ будет в 3 раза меньше, чем рассчитанное по формуле (3.16) число срабатываний ТРПУ $N_{ср}$.

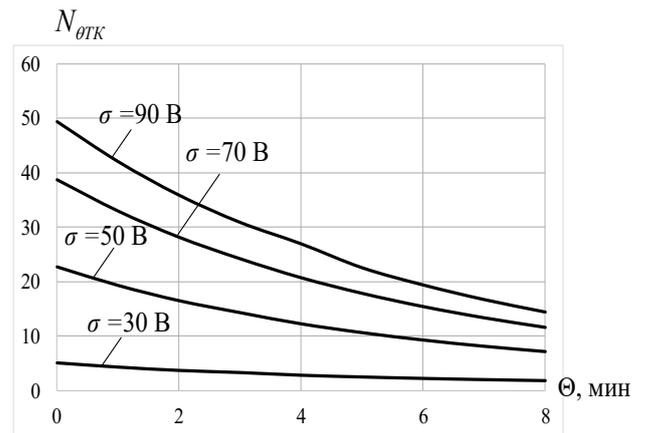
На рисунке 3.12 показано семейство графиков зависимости числа переключений тиристорных ключей ТК при равномерном их износе $N_{отк} = f(\sigma)$ от выдержки времени для преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП-12500/10 в системе БАРН с ТРПУ и, определяемое среднеквадратичным отклонением выпрямленного напряжения σ .

Таким образом, зная работоспособность тиристорных ключей ТК, можно определить минимально допустимую выдержку времени системы БАРН с ТРПУ.

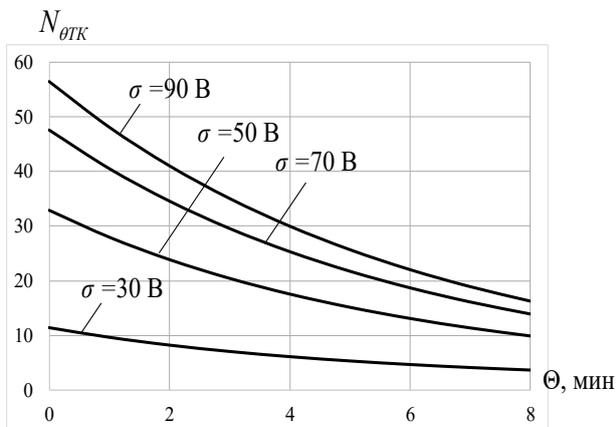
а)



б)



в)



- а – соответствующий автоматической характеристике 5;
 б – соответствующий автоматической характеристике 6;
 в – соответствующий автоматической характеристике 7

Рисунок 3.12 – Графики зависимости переключений тиристорных ключей ТК ТРПУ $N_{отк} = f(\theta)$ от выдержки времени для заданного уровня напряжения

Оценить качество регулируемого напряжения с учетом работы системы БАРН с ТРПУ возможно, используя известную методику, которая основана на определении вероятностно-статистических (оценки математического ожидания \bar{u} и среднеквадратичного отклонения выходного (регулируемого) напряжения $\sigma_{вых}$) характеристик выпрямленного напряжения [134]. Сущность данного метода заключается в аппроксимации нелинейного преобразователя линейризованной зависимостью между случайными функциями на входе и выходе системы, статически эквивалентной исходному нелинейному преобразованию [134].

С учетом особенностей определения предельных значений L_{1-CP} и L_{2-CP} зоны нечувствительности L_{CP} автоматических внешних характеристик преобразовательного агрегата в системе БАРН с ТРПУ, рассмотренных в разделе 3.2.1, оценка математического ожидания равна $\bar{u} = \frac{L_{1-CP} + L_{2-CP}}{2}$. В соответствии с методикой определения вероятностно-статических характеристик [135], оценка математического ожидания выходного (регулируемого системой БАРН) напряжения принимается равной $\bar{u}_{ВЫХ} = \bar{u}$.

Среднеквадратичное отклонение выходного напряжения тогда можно определить по формуле [130]:

$$\sigma_{ВЫХ} = \sqrt{\sigma^2 \left[2\Phi\left(\frac{L'}{\sigma}\right) - 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{L'}{\sigma} e^{-\frac{L'^2}{2\sigma^2}} \right] + 2L'^2 \left[1 - \Phi\left(\frac{L'}{\sigma}\right) \right]}, \quad (3.17)$$

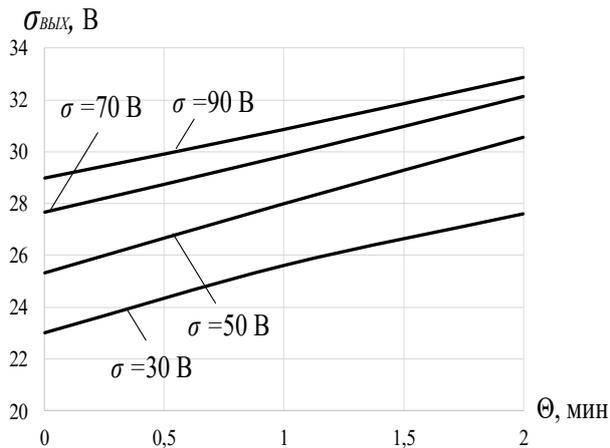
где $L' = L_{2-CP} - \bar{u}$.

Экспериментальные исследования кривой выпрямленного напряжения ряда подстанций, проведенные в [134], показали, что «...среднеквадратичное отклонение при изменении выдержки времени θ от 0 до 2 мин. изменяется практически по линейному закону и может быть аппроксимирована выражением:

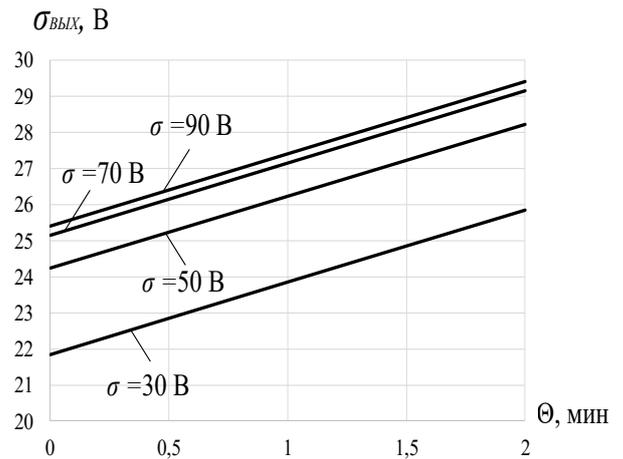
$$\sigma_{ВЫХ\theta} = \sigma_{ВЫХ} + 6\theta, \quad (3.18)$$

На рисунке 3.13 показано семейство графиков зависимости среднеквадратичного отклонения выходного напряжения $\sigma_{ВЫХ} = f(\theta)$ от выдержки времени для преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в системе БАРН с ТРПУ и, определяемое среднеквадратичным отклонением σ выпрямленного напряжения.

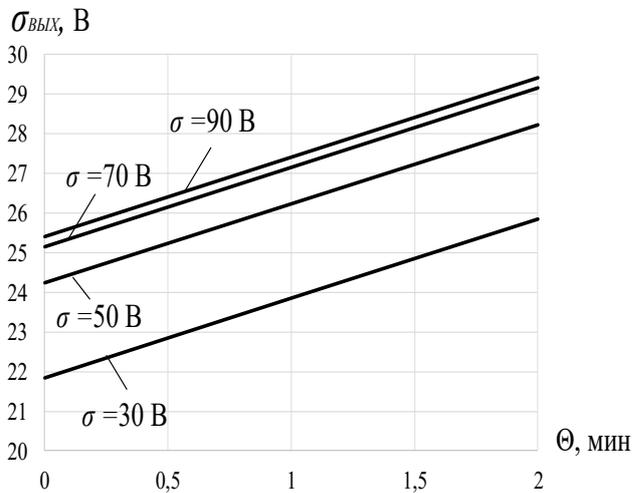
а)



б)



в)



- а – соответствующий автоматической характеристике 5;
 б – соответствующий автоматической характеристике 6;
 в – соответствующий автоматической характеристике 7

Рисунок 3.13 – Графики зависимости среднеквадратичного отклонения выходного напряжения $\sigma_{ВЛХ} = f(\theta)$ от выдержки времени, соответствующие

Алгоритм расчета числа переключений тиристорных ключей ТК ТРПУ $N_{\theta ТК}$ при равномерном их использовании и среднеквадратичного отклонения выходного напряжения $\sigma_{ВЛХ}$ представлен на рисунке 3.14.

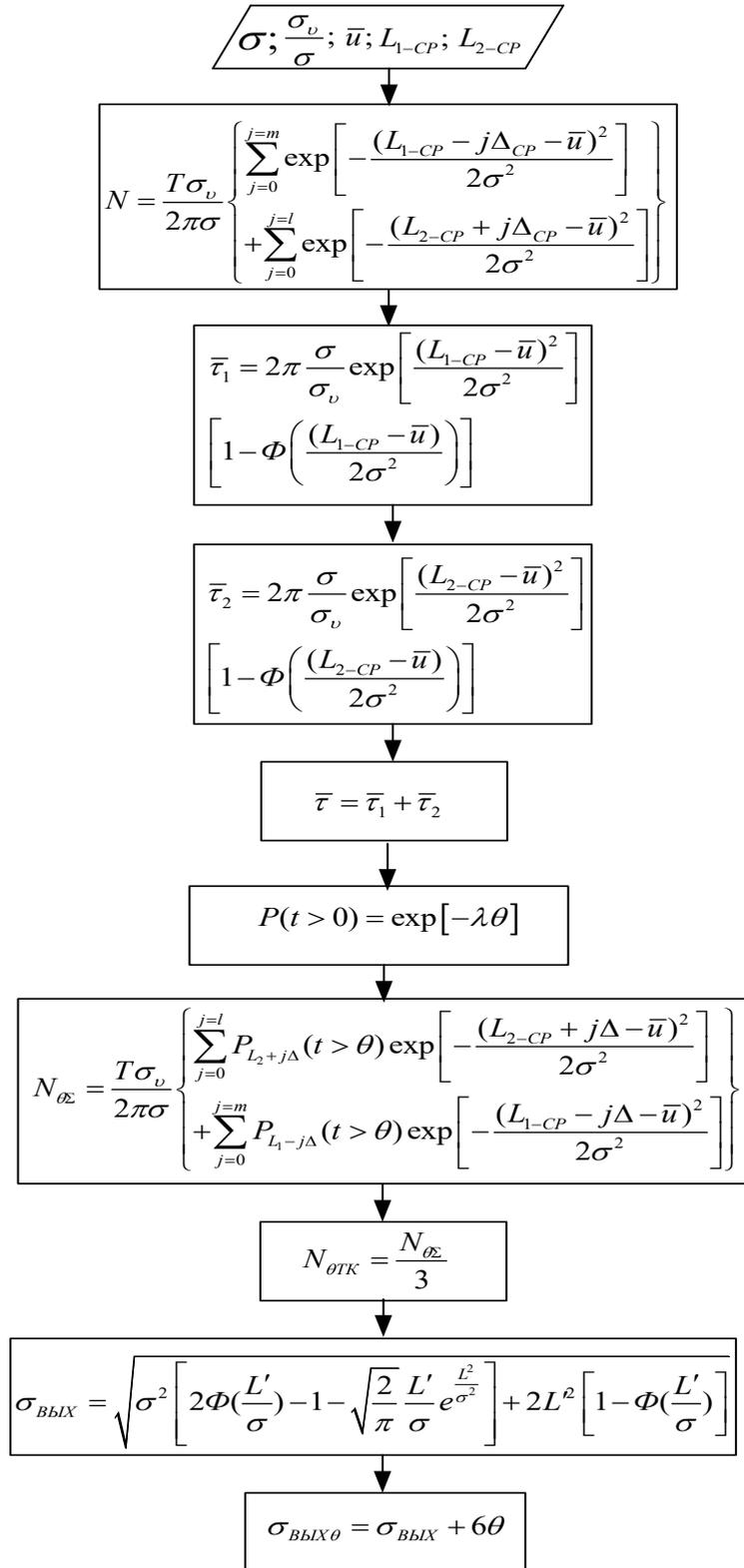


Рисунок 3.14 – Схема алгоритма расчета числа переключений тиристорных ключей ТК ТРПУ N_{OTK} и среднеквадратичного отклонения выходного напряжения σ_{BYX}

С помощью представленного на рисунке 3.14 алгоритма, зная значения оценки математического ожидания \bar{u} , среднеквадратичное отклонение σ и среднеквадратичное отклонение скорости нарастания σ_v выпрямленного напряжения на шинах РУ-3,3 кВ, внешние характеристики ПА с ТРПУ, а также работоспособность и сроки между ревизиями переключателя, возможно определить минимально допустимую выдержку времени θ работы ТРПУ и зону нечувствительности, при которых качество напряжения будет наилучшим.

Определить рациональное значение выдержки времени на настоящем этапе разработки устройства ТРПУ невозможно, так как для этого необходимо знать ресурс работы переключателя, что станет возможным только после проведения испытаний на физической модели ТРПУ.

3.5 Выводы по третьей главе

1) Ввиду случайного характера напряжения на шинах РУ 3,3 кВ определено, что наиболее приемлемой САР выпрямленного напряжения с помощью ТРПУ является релейная система автоматического регулирования с амплитудной модуляцией, фиксирующая величину и время отклонения напряжения от заданного значения.

2) Рассмотрены два варианта реализации релейной САР с амплитудной модуляцией, фиксирующей величину и время отклонения напряжения от заданного значения в рамках системы БАРН с ТРПУ, обеспечивающих плавное и ступенчатое регулирование выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата и определены их особенности.

3) Разработана методика определения числа переключений тиристорных ключей ТК ТРПУ $N_{отк}$ в составе ступенчатой системы БАРН в зависимости от величины зоны нечувствительности и выдержки времени срабатывания ТРПУ θ .

4) Произведен расчет числа переключений тиристорных ключей ТК ТРПУ $N_{\theta TK}$ и среднеквадратичного отклонения выходного напряжения $\sigma_{ВЫХ}$ для преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРСНП–12500/10 в ступенчатой системе БАРН с ТРПУ в зависимости от величины зоны нечувствительности и выдержки времени срабатывания ТРПУ θ .

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСИЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА СИСТЕМОЙ БАРН С ТРПУ

4.1 Общие положения

Экономическая эффективность системы БАРН с ТРПУ может быть определена на основании моделирования работы системы тягового электроснабжения постоянного тока с регулированием напряжения системой БАРН с реакторным РПУ и тиристорно-реакторным ТРПУ переключающими устройствами, при этом устанавливаются следующие показатели эффективности:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- срок окупаемости инвестиций (T_{OK}) или период возврата инвестиций.

Расчет показателей экономической эффективности выполнен в соответствии с [136].

Определение эффективности основано на соизмерении затрат и результатов в денежном выражении. Оценка предстоящих затрат и результатов осуществляется в пределах расчетного периода, продолжительность которого (горизонт расчета) рекомендуется принимать в зависимости от ряда факторов: продолжительность создания и эксплуатации объекта, срока службы основного технологического оборудования, достижения заданных характеристик прибыли. При этом расчетный период разбивается на определенное количество шагов. В рассматриваемом случае шаг равен одному году.

Приведение затрат и результатов к начальному моменту времени осуществляется умножением их на коэффициент дисконтирования:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1 + E + Z)^t}, \quad (4.1)$$

где E – норма дисконта (условно принимается равной процентной ставке ЦБ РФ),

$$E = 5,5 \%;$$

Z – рисковая поправка, $Z = 0,13$;

t – номер шага.

Чистый дисконтированный доход определяется по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (P_t - Z_t) \cdot \frac{1}{(1 + E + Z)^t}, \quad (4.2)$$

где P_t – приток денег в году t (стоимостная оценка результатов), тыс. руб;

Z_t – отток денег в году t , тыс. руб;

T – расчетный период, год.

На практике применяют метод приблизительной оценки срока окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = t_- - \frac{\text{ЧДД}_-}{\text{ЧДД}_+ - \text{ЧДД}_-}, \quad (4.3)$$

где t_- – последний период реализации проекта, при котором разность накопленного дисконтированного дохода и дисконтированных затрат принимает отрицательное значение, год;

ЧДД_- – последнее отрицательное значение ЧДД, тыс. руб;

ЧДД_+ – первое положительное значение ЧДД, тыс. руб.

При расчете ЧДД необходимо определить капитальные затраты на внедрение системы БАРН с РПУ и ТРПУ. Наименование и стоимость работ, оборудования и материалов на внедрение системы БАРН с РПУ уже известны по опыту эксплуатации, поэтому расчет капитальных затрат не составит большого труда. Расчет же капитальных затрат на внедрение системы БАРН с ТРПУ осложняется отсутствием стоимости оборудования системы, приблизительное значение которого необходимо определить.

4.2 Определение экономического эффекта от усиления системы тягового электроснабжения системой БАРН с ТРПУ

4.2.1 Расчет капитальных затрат

Как было сказано в разделе 4.1, экономическая эффективность системы БАРН с ТРПУ может быть определена на основании моделирования работы системы тягового электроснабжения постоянного тока.

Сравниваемые варианты отличаются друг от друга типом используемого устройства РПН. Тогда капитальные затраты состоят из:

$$K_0 = K_{ЭО} + K_{ФК} + K_{СМР} \quad (4.4)$$

где $K_{ЭО}$ – стоимость основного силового электротехнического оборудования;

$K_{ФК}$ – стоимость фундаментов, опорных и поддерживающих конструкций, проводов, изоляторов и т.д.;

$K_{СМР}$ – стоимость строительных и монтажных работ.

При расчете капитальных затрат для рассматриваемых вариантов необходимо учесть следующие моменты:

1. Оборудование тяговой подстанции рассматриваемых вариантов одинаковое, за исключением устройства РПН, и в расчетах не учитывается.

2. Стоимость системы БАРН с РПУ принимается равно 22 656 тыс. руб. (Приложение Г).

3. Укрупненный расчет стоимости системы БАРН с ТРПУ состоит из стоимости тиристоров (в расчетах принимаются тиристоры фирмы ПАО «Электровыпрямитель», г. Саранск – Приложение Г), неуправляемого реактора НР и стоимости конструктива (корпус, радиаторы, система управления и т.д.), который представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Укрупненный расчет стоимости системы БАРН с ТРПУ

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, тыс. руб.	Стоимость всего, тыс. руб.
Тиристорный ключ БК8Т-680-5,4-П	3	296*	888
Неуправляемый реактор	1	7000**	7000
Конструктив (корпус, радиаторы, система управления и т.д.)	-	-	888***
ИТОГО:			8 776

* – цена на тиристоры взята из прайс-листа предприятия ПАО «Электровыпрямитель», приложение Г;

** – цена на неуправляемый реактор взята из прайс-листа предприятия АО «УЭТМ»

*** – стоимость конструктива принимается равной стоимости тиристоров.

4. Стоимость строительных работ и монтажа устройств РПН включены в стоимость оборудования.

5. Размеры РПУ отличаются от размеров преобразовательного трансформатора незначительно, соответственно стоимость фундаментов, опорных и поддерживающих конструкций принимаются одинаковой и равной 500 тыс. руб.

В связи с тем, что система БАРН с ТРПУ еще не изготавливалась и является новым устройством, то выполнить расчет стоимости фундаментов, опорных и поддерживающих конструкций с достаточной точностью на этапе проектирования невозможно из-за отсутствия многих необходимых данных. Приблизительная занимаемая площадь ТРПУ в два раза меньше занимаемой площади устройства РПН системы БАРН, отсюда стоимость принимается равной 250 тыс. руб.

В соответствии с вышесказанным, капитальными затратами являются: стоимость устройства РПН и стоимость фундаментов, опорных и поддерживающих конструкций на сооружение устройства РПН.

Капитальные затраты рассматриваемых вариантов равны:

– система БАРН с РПУ:

$$K_0 = 22\ 656 + 500 = 23\ 156 \text{ тыс. руб.};$$

– система БАРН с ТРПУ:

$$K_0 = 8\ 776 + 250 = 9\ 026 \text{ тыс. руб.}$$

4.2.2 Расчет дополнительных эксплуатационных затрат

Эксплуатационные затраты при обслуживании устройств РПН включают в себя затраты на заработную плату обслуживающего персонала, отчисления на социальные нужды, расходы на электроэнергию, амортизационные отчисления.

Затраты на обслуживание оборудования, состоящие из затрат на заработную плату обслуживающего персонала и отчисления на социальные нужды принимаются одинаковыми для рассматриваемых вариантов, поэтому ими пренебрегаем.

При проведении моделирования режимов работы системы тягового электро-снабжения применялся программный комплекс КОРТЭС. Моделирование проводилось на участке Шаля – Кунгур Свердловской Ж.Д., профиль пути которого представлен на рисунке 4.1, при движении в нечетном направлении пакета грузовых поездов массой 6300 т – 9000 т – 6300 т с межпоездным интервалом 8 минут и с движением в четном направлении грузовых поездов массой 2700 т с межпоездным интервалом 8 минут. Скорость движения грузовых поездов 50 км/ч.

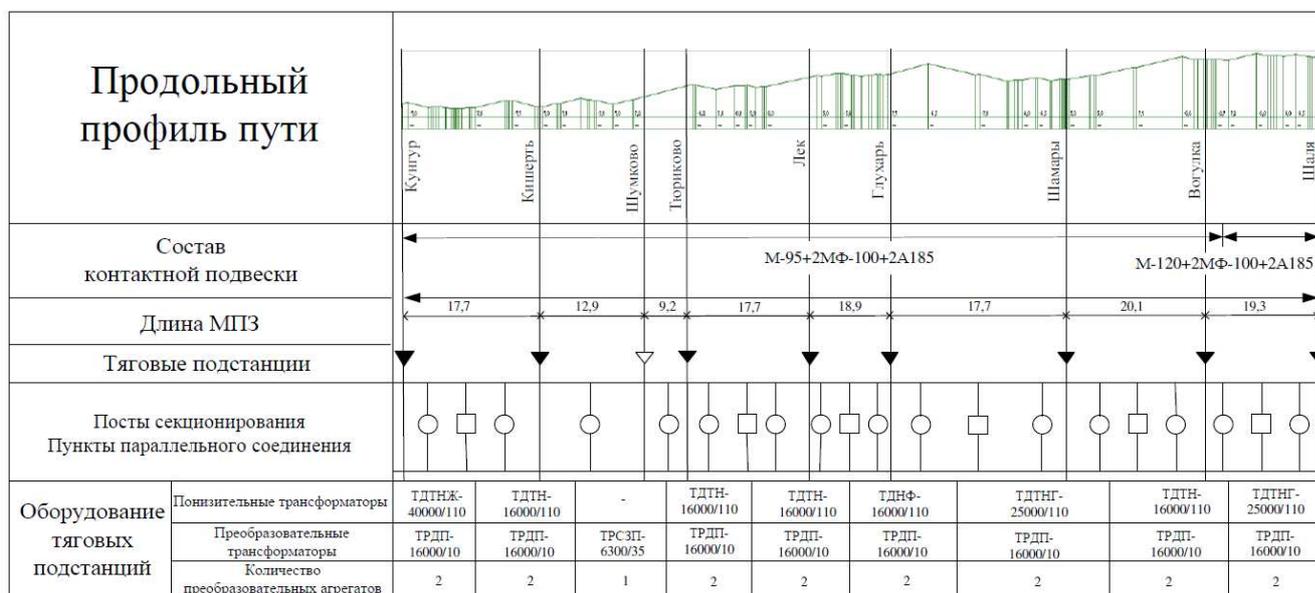


Рисунок 4.1 – Схема участка Шаля – Кунгур

Общие параметры преобразовательных трансформаторов с устройством РПН, необходимые для расчета в программном комплексе «КОРТЭС», представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Общие параметры преобразовательных трансформаторов с устройством РПН

Тип регулируемого преобразовательного трансформатора и регулятора	Номинальная мощность сетевой обмотки S_N , кВА	Номинальное напряжение U_N , кВ	Напряжение короткого замыкания $U_K\%$, %	Потери		Ток холостого хода $I_0\%$, %
				Холостого хода ΔP_0 , кВт	Короткого замыкания ΔP_K , кВт	
ТРСНП-12500/10 с РТДП-6300/10	12530	10,5	11,55	30	98	4,5
ТРСНП-12500/10 с ТРПУ	12530	10,5	8,13	33	69	5

Годовой экономический эффект $\Delta \mathcal{E}$ при сравнении работы системы тягового электроснабжения с системой БАРН с ТРПУ относительно системы с РПУ получается за счет снижения потерь электрической энергии в трансформаторах и переключающем устройстве $\Delta A_{тр}$.

Годовой экономический эффект от уменьшения расхода электрической энергии можно определить по формуле:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta A_{тр} \cdot C_{\mathcal{E}} \cdot 2 \cdot 365, \quad (4.5)$$

где $\Delta A_{тр}$ – снижение потерь электрической энергии в трансформаторах и переключающем устройстве за 12 часов, кВт·ч;

$C_{\mathcal{E}}$ – цена 1 кВт·ч электроэнергии, равная 3,91 руб;

2 – коэффициент для перевода к суточной норме часов.

В таблице 4.3 представлены результаты расчета снижения потерь электрической энергии в трансформаторе с устройством РПН $\Delta A_{тр}$ и годового экономического эффекта $\Delta \mathcal{E}$ при сравнении работы системы тягового электроснабжения с системой БАРН с ТРПУ и РПУ для одного агрегата.

Таблица 4.3 – Годовой экономический эффект при сравнении БАРН с ТРПУ и БАРН с РПУ

Режим работы системы тягового электроснабжения	Напряжение на шинах преобразовательного агрегата U_d , кВ	Потери ЭЭ в трансформаторе и устройстве РПН $\Delta A_{тр}$, кВт*ч	Снижение потерь ЭЭ в трансформаторе и устройстве РПН $\Delta A_{тр}$, кВт*ч	Экономический эффект $\Delta \mathcal{E}$, тыс. руб.
С системой БАРН с РПУ	3,5ст	7231	-	-
	3,6ст	6953	-	-
	3,7ст	6623	-	-
С системой БАРН с ТРПУ	3,5ст	5032	2199	6 276
	3,6ст	4867	2086	5 954
	3,7ст	4654	1969	5 620

Из таблицы 4.5 видно, что годовой экономический эффект $\Delta \mathcal{E}$ от снижения потерь электрической энергии в трансформаторе тяговой подстанции, с учетом потерь в регулируемом устройстве в системе БАРН с ТРПУ по сравнению с системой БАРН РПУ составляет от 5620 до 6276 тыс. руб., в зависимости от заданного уровня стабилизации напряжения.

Расчет экономической эффективности системы БАРН с ТРПУ произведен на основании результатов моделирования при заданном уровне стабилизации 3,6 кВ.

Амортизационные отчисления ($A_{год}$) по электрооборудованию определяются в процентах от первоначальной стоимости по формуле:

$$A_{год} = \frac{\Phi_{пер} \cdot N_A}{100}, \quad (4.6)$$

где $\Phi_{пер}$ – первоначальная балансовая стоимость электрооборудования, руб;

N_A – норма амортизационных отчислений для каждого вида электрооборудования, равная 6,7 %.

Тогда амортизационные отчисления составят:

$$A_{\text{год-з}} = 8\,776 \cdot 0,067 = 587 \text{ тыс. руб.}$$

4.3 Определение экономической эффективности от усиления системы тягового электроснабжения системой БАРН с ТРПУ

Приток по проекту определяется по формуле:

$$P_t = \Delta \mathcal{E} + A_{\text{год}}, \quad (4.7)$$

тогда приток по проекту после установки системы БАРН с ТРПУ:

$$P_t = 6\,541 \text{ тыс. руб.}$$

В состав оттоков денежных средств Z_t включаются следующие группы статей расходов:

- текущие эксплуатационные расходы на техническое обслуживание трансформаторов и устройств РПН;
- налог на прибыль;
- налог на имущество.

Налог на имущество рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{им}} = \varphi_{\text{им}} \cdot \left(\frac{2 \cdot K_0 - A_{\text{год}} \cdot t}{2} \right), \quad (4.8)$$

где t – годы расчета налога;

$\varphi_{\text{им}}$ – ставка налога на имущество, составляет 2,2 %;

тогда налог на имущество в первый год эксплуатации системы БАРН с ТРПУ:

$$H_{\text{ИМ}} = 0,022 \cdot \left(\frac{2 \cdot 9026 - 587 \cdot 1}{2} \right) = 192 \text{ тыс.руб.}$$

Налог на прибыль рассчитывается по формуле:

$$H_{\text{ПР}} = \varphi_{\text{ПР}} \cdot (\Delta \mathcal{E} - A_{\text{ГОД}} - H_{\text{ИМ}}), \quad (4.9)$$

где $\varphi_{\text{ПР}}$ – ставка налога на прибыль, равная 20 %;

тогда налог на прибыль в первый год эксплуатации системы БАРН с ТРПУ:

$$H_{\text{ПР}} = 0,2 \cdot (5954 - 587 - 192) = 1035 \text{ тыс.руб.}$$

Оттоки денежных средств по операционной деятельности определяются по формуле:

$$Z_t = H_{\text{ИМ}} + H_{\text{ПР}}, \quad (4.10)$$

тогда отток денежных средств в первый год эксплуатации системы БАРН с ТРПУ:

$$Z_1 = 192 + 1035 = 1\,227 \text{ тыс. руб.}$$

Чистый дисконтированный доход находится по формуле (4.2) и после установки системы БАРН с ТРПУ составляет:

$$\text{ЧДД} = \frac{-9026}{(1+0,185)^0} + \frac{6541-1226}{(1+0,185)^1} + \dots + \frac{6541-1221}{(1+0,185)^8} = 12\,369 \text{ тыс. руб.}$$

Внедрение проекта считается экономически эффективным, поскольку значение больше нуля и равно 12 369 тыс. руб.

Срок окупаемости, в соответствии с формулой (4.3), и после установки системы БАРН с ТРПУ составляет:

$$T_{\text{ок}} = 2 - \frac{-751}{2448 - (-751)} = 2,2 \text{ года.}$$

В результате проведенных расчетов оценочных показателей эффективности проекта видно, что внедрение системы БАРН с ТРПУ является эффективным по всем показателям. Чистый дисконтированный доход за период 8 лет – 12 369 тыс. руб.

Расчетный срок окупаемости 2,2 года, следовательно, применение системы БАРН с ТРПУ можно считать экономически эффективным.

На рисунке 4.2 представлен график окупаемости внедрения системы БАРН с ТРПУ.

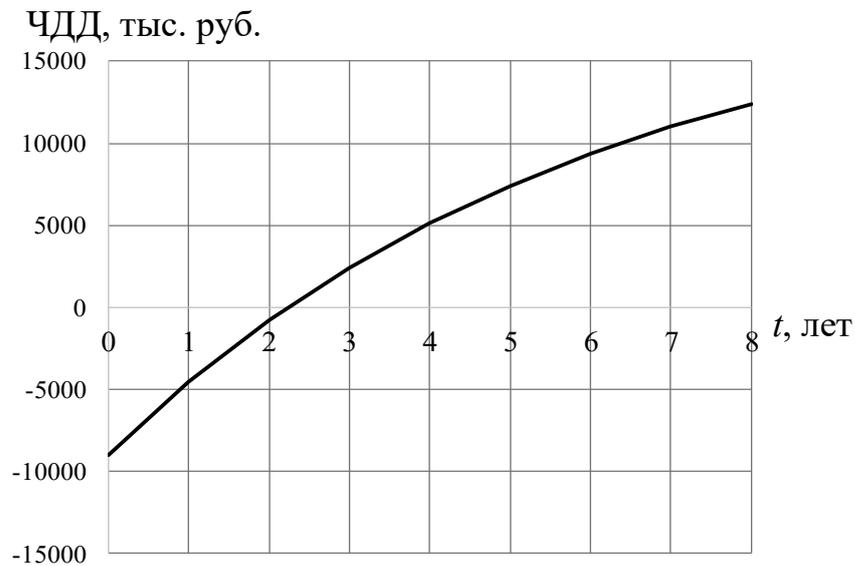


Рисунок 4.2 – График окупаемости внедрения системы БАРН с ТРПУ

Остальные результаты расчета сведены в таблицу 4.4:

Таблица 4.4 – Расчет показателей экономической эффективности, млн. руб.

Показатели экономической эффективности	Значение показателя по годам t расчетного периода									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Итого
Операционная деятельность										
Приток денежных средств										
Снижение текущих затрат	-	5,954	5,954	5,954	5,954	5,954	5,954	5,954	5,954	47,632
Амортизационные отчисления	-	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	4,696
Всего притоки	-	6,541	6,541	6,541	6,541	6,541	6,541	6,541	6,541	52,328
Отток денежных средств										
Налог на имущество	-	0,192	0,185	0,179	0,172	0,166	0,159	0,153	0,146	1,352
Налог на прибыль	-	1,035	1,036	1,037	1,038	1,039	1,041	1,042	1,043	8,311
Инвестиционная деятельность										
Отток денежных средств										
Затраты на внедрение новой техники	9,026	-	-	-	-	-	-	-	-	9,026
Всего оттоки	9,026	1,227	1,221	1,216	1,21	1,205	1,2	1,195	1,189	18,689
Денежный поток										
ЧДД	-9,026	4,485	3,788	3,262	2,703	2,342	1,928	1,629	1,376	12,369
То же нарастающим итогом	-9,026	-4,540	-0,751	2,448	5,151	7,435	9,364	10,993	12,369	-

4.4 Выводы по четвертой главе

1. На основании рассчитанных в разделах 2.3 и 2.4 основных параметров неуправляемого реактора и тиристорных тиристорно-реакторного переключающего устройства выполнен укрупненный расчет стоимости системы БАРН с ТРПУ, который составил 8 776 тыс. рублей.

2. Годовой экономический эффект при сравнении работы системы тягового электроснабжения с системой БАРН с ТРПУ относительно работы с РПУ составляет от 5 620 до 6 276 тыс. руб., в зависимости от заданного уровня стабилизации.

3. Доказана экономическая эффективность внедрения системы БАРН с ТРПУ, где чистый дисконтированный доход за период 8 лет составил 12 369 тыс. руб., а расчетных срок окупаемости 2,2 года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны теоретические положения, описывающие работу трансформатора с подключенным к нему ТРПУ с целью оценки влияния работы переключателя на трансформатор. 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID_704&layer_id=5104&id=6396.
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 года № 877р [Электронный ресурс] // Собр. Законодательства РФ. – 2008. – № 29. – ст. 3537. – Режим доступа : <http://www.szrf.ru/szrf/doc.phtml?nb=100&is-sid=1002008029000&docid=129>.
3. Аржанников, Б. А. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : монография / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко. – Екатеринбург : УрГУПС, 2015. – 258 с.
4. Аржанников, Б. А. Два варианта усиления системы электроснабжения тяги постоянного тока / Б. А. Аржанников. – // Евразия Вести 2008. IV.
5. Аржанников, Б. А. Режимы работы основных элементов системы автоматического регулятора напряжения тягового трансформатора ТДРУ-20000/35 / Ш. Ш. Байдашев, М. И. Клейнерман, Р. Н. Урманов, Я. Л. Фишлер. – // Труды УЭМИИТа, вып. 24, ч.П, 1969 г.
6. Аржанников, Б. А. Устройства регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов под нагрузкой : учеб. пособие / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – 101 с.
7. Аржанников, Б. А. Тяговый трансформаторный агрегат с бесконтактным регулированием напряжения под нагрузкой : дис. канд. техн. наук / Б. А. Аржанников. – Свердловск, 1971. – 119 с.

8. Аржанников Б. А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования напряжения тяговых подстанций / Б. А. Аржанников, А. А. Пышкин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения, 2006. – С. 118.

9. Аржанников Б. А. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока / Б. А. Аржанников, М. П. Бадёр, А. Т. Бурков [и др.] // Электротехника. 2016. № 9. С. 51-57.

10. 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. T.1115 AISC. – pp. 87-97 https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_10/.

11. 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/>.

12. Бадер, М. П. Адаптация системы тягового электроснабжения постоянного тока для высокоскоростного движения / М. П. Бадер, Е. В. Сачкова // Электротехника. 2017. № 9. С. 19-25.

13. Система повышенного напряжения 12 кВ: Отчет о НИР [Текст]/ Лен. ин-т инж. ж.-д. тр-та; рук. Темы д.т.н., проф. А. Т. Бурков. – Ленинград, 1990. – 148 с.

14. Бурков, А. Т. Техническое развитие электрической тяги постоянного тока с универсальными многоквadrантными преобразователями силовой электроники / А. Т. Бурков, В. Г. Жемчугов, К. К. Степанова // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 6. С. 37-42.

15. Бурков, А. Т. Показатели эксплуатационной надежности системы тягового электроснабжения постоянного тока с продольной питающей линией высокого напряжения / А. Т. Бурков, В. Г. Жемчугов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 3. С. 380-390.

16. Гаранин, М. А. Усиление системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / М. А. Гаранин, В. А. Загорский, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 1 (55). С. 30-34.

17. Гаранин, М. А. Расчет энергообеспеченности перевозочного процесса и усиление системы тягового электроснабжения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Транспорт Урала. – 2014. – № 3(42). – С. 109.

18. Марквардт, К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.

19. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1 / под ред. К. Г. Марквардта. – Москва : Транспорт, 1980. – 256 с.

20. Марикин, А. Н. Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока : дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / А. Н. Марикин. – Санкт-Петербург, 2008.

21. Марикин, А. Н. Способы усиления тягового электроснабжения постоянного тока при интенсивном движении поездов / А. Н. Марикин, А. П. Самонин, В. Г. Жемчугов // Известия ПГУПС. – 2012. – № 3 – С. 123-127.

22. Мирошниченко, Р. И. Сравнительная оценка способов усиления системы постоянного тока 3,0 кВ / Р. И. Мирошниченко // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института ж. д. транспорта, 1973, №1, С. 6-12.

23. Мирошниченко, Р. И. и др. Решение задач электроснабжения на электронных машинах. М., Транспорт, 1971, 168 с.

24. Третьяк, Т. П. Основные принципы системы энергоснабжения постоянного тока повышенного напряжения. В сб. Материалы III научно-технической конференции Уральского отделения ЦНИИ МПС. вып. 4. Свердловск. 1964. С. 103-114.

25. Черемисин, В. Т. Оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба. 2013. № 2 (14). С. 75-84.

26. Черемисин, В. Т. Меры по повышению энергетической эффективности системы тягового электроснабжения / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 48-51.

27. Черемисин, В. Т. Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак // Бюллетень результатов научных исследований. 2015. № 1 (14). С. 76-83.

28. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 10. С. 54-64.

29. Careglio Giuseppe, Cavagnaro Maurizio, Lanzavecchia Lorenzo. Indagine analitica su modelli dielettrificazione ferroviaria a 3 kV cc confeder a-3, -6e-12kVcc // Ing.Ferrov. – 1983. – 38, №10. – P. 664–672.

30. Mayer Lucio. Ottimizzazione clec sottosistema alimentazione ferroviaria // Ing.ferrov. – 1985. – 40, № 9. –С. 583–591.

31. Адзуки Миура. Вольтодобавочное устройство для железной дороги постоянного тока. Заявка 59-186744 Япония, МКИ В60М 3/02. / Миура Адзуки. – 1981.

32. Голунов, А. М., Мазур, А. Л. Вспомогательное оборудование трансформаторов. М.: Энергия, 1978.

33. Михеев, Г. М. Ресурсосберегающая диагностика переключающих устройств силовых трансформаторов: учеб. пособие для вузов / Г. М. Михеев. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – 184 с.

34. Михеев, Г. М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования / Г. М. Михеев. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 304 с. : ил. (Серия «Электротехника и энергетика»).

35. Фишлер, Я. Л. и др. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я.Л. Фишлер, Р.Н. Урманов, Л.М. Пестряева. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.: ил. – (Трансформаторы; Вып. 41).

36. А.С. 687476 СССР, МКИ2 Н 01 F 21/12. Способ пофазного регулирования напряжения трехфазного трансформатора/ Л.М. Пестряева // Б.И. 1979. № 35.

37. Лейтес, Л. В. Расчет токов холостого хода трансформатора при пофазном регулировании напряжения / Л. В. Лейтес, Л. М. Пестряева // Сб. Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1977. Вып. 7(35). С. 1-14.

38. Пестряева, Л. М. Расчет внешней характеристики двенадцатифазного выпрямительного агрегата при пофазном регулировании напряжения преобразовательного трансформатора / Л. М, Пестряева // Электротехника. 1977. № 4. С. 26-29.

39. Пестряева Л. М. Расчет токов в преобразовательном трансформаторе при пофазном регулировании напряжения / Л. М. Пестряева // Электротехника. 1976. №4. С. 27-30.

40. А. С. 706889 СССР, МКИ2 Н 01Г 21/12. Трехфазный трансформатор с пофазным регулированием напряжения и способ его регулирования / Л. М. Пестряева // Б. И. 1979. №48.

41. Порудоминский, В. В. Трансформаторы с переключением под нагрузкой / В. В. Порудоминский. М. – Л. : Энергия, 1965. – 264 с. с черт. – (серия «Трансформаторы», вып. 15).

42. Порудоминский, В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / В. В. Порудоминский. – 2-е изд., перераб. и испр. – М. : Энергия, 1974. – 288 с. с ил. – (Трансформаторы; Вып. 25).

43. Пышкин, А. А. Современные методы улучшения качества электроэнергии на тяговых подстанциях электрических железных дорог / А. А. Пышкин,

А. В. Ефимов – Свердловск : Изд-во: Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта, 1974. – С. 85.

44. Уткин, А. И. Эксплуатация переключающих устройств преобразовательных трансформаторов / А. И. Уткин, Я. Л. Фишлер // Сб. Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1975. Вып. 3 (47). С. 12-15.

45. Якобсон, И. А. Наладка быстродействующих переключающих устройств силовых трансформаторов. М.: Энергия, 1976.

46. Ande F. Betrieb und Anwendung von Leisfugs- und Regeltransformatoren. Springer-Verlag, 1954, 319 S.

47. Heinz R. Moderne Stufenschalter fur Transformatoren, TU-71. Information der Transformatoren Union, Eliteria-Verlag, Berlin, 1971. S. 73.

48. Урманов, Р. Н., Ветлугин, Е. М. К теории регулирования напряжения трансформатора дроселями насыщения / Р. Н. Урманов, Е. М. Ветлугин // Изв. вузов. Электромеханика. 1965. - № 2. – с. 146-157.

49. Урманов, Р. Н. Режимы работы и характеристики тягового трансформатора с бесконтактным регулированием напряжения / Р. Н. Урманов, Я. Л. Фишлер // Сборник научных трудов УЭМИИТа, вып. 19, ч. I, 1967.

50. Фишлер, Я. Л. Трансформатора 35 кВ с бесконтактным регулированием / Я. Л. Фишлер, Р. Н. Урманов, В. В. Ланге // Труды УЭМИИТа, вып, 14, 1966 г.

51. Урманов, Р. Н. Некоторые вопросы работы параметрического источника тока с выпрямителем / Р. Н. Урманов, А. А. Мангилева, В. П. Светоносков // Вопросы энергоснабжения электрических железных дорог/Тр. УЭМИИТ. Вып. 49. Свердловск. 1976. С. 74-81.

52. А.С. 1132336. Н 02 Р 13/06/ Способ переключения ответвлений обмотки трансформатора. Б. Ю. Алтунин, А. А. Асабин, Л. А. Соловьев. Заявл. 14.01.81; Оpubл. 07.03.83. Бюл. № 9.

53. Алтунин, Б. Ю. Трансформаторно-тиристорные регуляторы переменного напряжения: учеб. пособие / Б. Ю. Алтунин, А. И. Чивенков, С. Ю. Панфилов. Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2014. – 110 с. ISBN 978-5-502-00384-1

54. Алтунин, Б. Ю. Тиристорные переключающие устройства регулирования под нагрузкой трансформаторного оборудования электротехнологических установок: Диссер. доктора техн. наук. – Нижегород. гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 1997.

55. Алтунин, Б. Ю. Макромоделирование тиристорных переключающих устройств силовых преобразовательных трансформаторов: Учеб. пособие. – Нижегород. гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 1998. – 108 с.

56. Алтунин, Б. Ю. Анализ режимов работы двенадцати пульсного выпрямителя с тиристорным регулированием на вторичной стороне трансформатора / Б. Ю. Алтунин, А. И. Чивенков, А. А. Асабин // Электропривод и автоматизация промышленных установок: сборник статей. – Горький, 1983.

57. Алтунин, Б.Ю. Тиристорные переключающие устройства для мощных преобразовательных трансформаторов / Б. Ю. Алтунин, А. И. Чивенков, А. А. Асабин // Актуальные проблемы электроэнергетики: тезисы докладов научно-технической конференции. – Горький, 1984.

58. Пат. РФ № 2274945 на изобретение, МПК 7 H02P 13/06, G05F 1/20. Способ переключения ответвлений обмотки трансформатора и устройство для его осуществления. / Б.А. Аржанников, Л.А. Фролов, А.Н. Штин – 2004127292/09; Заявл. 20.04.2006; Госреестр 25.10.2013; Оpubл. 27.10.2013.

59. Туманов, И. М. Тиристорные установки для повышения качества электроэнергии. / И.М. Туманов, Т.А. Евстигнеева – М.:Энергоатомиздат, 1994. - 238 с.

60. Guth, G. Static thyristor-controlled regulating transformer for AC-transmission / G. Guth, R. Baker, P. Eglin // Int. Conf. Thyristor and Variable Static Equip A.C. and D.C. Transmiss London-New-York - 1981 - S. 69-72.

61. Schaffer, J. «Commutating Current-Limiters - an effective alternative for high current protection» / J. Schaffer // NETA World - 1997 - vol. 18, №4 - S. 7-18.

62. Neruez I. Fortschritte des elektrischen Zugnetriebes bei der SNCB // Elek. Bahnen. – 1983. – Vo.81, № 12. – P. 236–365.
63. Бей Ю. М., Мамошин Р. Р., Пупынин В. Н., Тяговые подстанции / Учебник для вузов ж.-д. транспорта. — М.: Транспорт, 1986 — 319с.
64. Алексенко, Г. В. Испытание мощных трансформаторов и реакторов / Г. В. Алексенко, А. К. Ашрятов, Е. А. Веремей, Е. С. Фрид. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1978. – 520 с., ил. – (Трансформаторы; Вып. 32).
65. Сапожников, А. В. Конструирование трансформаторов / А. В. Сапожников. М. – Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 360 с
66. Фарбман, С. А. Ремонт и модернизация трансформаторов / С. А. Фарбман, А. Ю. Бун, И. М. Райхлин. 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 616 с. с ил. – (Трансформаторы; Вып. 29).
67. Фарбман, С. А. Ремонт мощных силовых трансформаторов : Учеб. пособие для повышения квалификации рабочих на производстве / С. А. Фарбман, З. И. Худяков, Г. В. Антонов. – М. : Высшая школа, 1972. – 232 с.
68. Рожкова, Л. Д., Козулин, В. С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 648 с.: ил. ББК 31.277.1 Р63
69. Филиппишин, В. Я. Монтаж силовых трансформаторов / В. Я. Филиппишин, А. С. Туткевич. – М. : Энергоиздат, 1981. – 432 с., ил. – (Трансформаторы; Вып. 38).
70. ГОСТ 24126-80. Устройства регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 24 с.
71. Иванов, Н. А. Справочник по монтажу распределительных устройств выше 1 кВ на электростанциях и подстанциях / Н. А. Иванов, Н. М. Лернер, Ю. И. Рябцев; Под ред. Н. А. Иванова, Н. Г. Этуса. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 304 с.: ил.

72. ОВБ 412.410-ТО-ЛУ. Устройство переключения ответвлений трансформатора под нагрузкой РНОА-110/1000. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1973. – 76 с.

73. ОВЛ 412.070ТО. Устройство переключения типа РНТА-35/320. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 1973. – 44 с.

74. Рябцев, Ю. И. Справочник по монтажу распределительных устройств выше 1000 В на электростанциях и подстанциях / Ю. И. Рябцев, Г. Г. Тирановский; Под ред. Н. А. Иванова, С. Г. Ляуэра, Н. Г. Этуса. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергия, 1979. – 344 с., ил.

75. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И. А. Баумштейна и М. В. Хомякова. – М. : Энергия, 1974. – 568 с. с ил.

76. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / С. А. Бажанов, И. С. Батхон, И. А. Баумштейн и др. ; Под ред. И.А. Баумштейна и М.В. Хомякова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 656 с., ил.

77. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И. А. Баумштейна и С. А. Бажанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 768 с. : ил.

78. On-load tap-changing gear TRO Vebtransformatorwerk Karl Liebknecht. Инструкция по испытанию мощных переключающих устройств типа SAV 3, SCV 3, SDV 3. № 856 russ. Берлин, 1991. – 31 с.

79. Maschinenfabrik Reinhausen GmbH. Устройство РПН OILTAP® R. Инструкция по эксплуатации. 4360596/03 RU. Regensburg, 2017. – 88 с.

80. Kramer A. On-Load Tap-Changersfor Transformers/ Operations Principels, Applications and Selections. MR-Publication, Regensburg, 1. Ausgabe, 2000, S, 172-230.

81. Das Retrofit-Kit von MR zum Austausch von Schaltern des Typs RS. Prospekt. MR-Publication, Regensburg, 2008, 4S.

82. Садовников, В. А. Задача переключающих устройств серии RS силовых трансформаторов на адаптированные РПН типа MSE компании MR GmbH /

В. А. Садовников, В. Ф. Колбасов, А. В. Кульков, А. В. Никитин, Э. Цайсиг // Электро. – 2009. – № 2. – с. 42-46.

83. Смагин, А. П. Серии трансформаторов 110 кВ с РПН. Этапы развития / А. П. Смагин // Электро. – 2009. – № 4. – с. 40-43.

84. Мокин, Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. - К.: Техніка, 1985. - 104 с.

85. Грабко, В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН: моног. / В. В. Грабко // Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. - 109 с.

86. Лавров, А. Г. Регулирование выходного напряжения трансформаторов под нагрузкой / А. Г. Лавров, Е. Н. Попов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 5. С. 86-91.

87. Методические указания по наладке устройств переключения ответвлений обмоток под нагрузкой (производства НРБ и ГДР) трансформаторов РПН. – М. : СПО Союзтехэнерго, 1981. – 44 с.

88. Dr. Dieter Dohnal. On-load tap-changers for power transformers. F0126405 – 09/13 – dp – ©Maschinenfabrik Reinhausen GmbH 2013.

89. Hyundai Heavy Industries. Переключающие устройства. Основные характеристики и технические данные. – URL : <http://www.hhi-co.bg/web/files/libraries/20/file/Переключающие%20устройства%20-%20часть.pdf>.

90. Михеев, Г.М. Диагностирование и алгоритм работы регулятора напряжения под нагрузкой серии РС / Г. М. Михеев, Х. У. Каландаров // «Электротехника и электроэнергетика. Вестник Чувашского университета». – 2013 г. – № 3. – С. 218-222.

91. Переключающее устройство типа РС(Г)-3- 110/400: Паспорт на ПУ зав. № 2595. – София: Элпром – Сильноточный завод имени Василя Коларова, 1971. – 11 с.

92. Переключающее устройство типа РС-4: Паспорт на ПУ зав. № 577. – София: ГХК «ЭЛПРОМ-ЭНЕРГО» сильноточный завод им. В. Коларова, 1974. – 12 с.

93. Переключающее устройство типа РС-9: Паспорт на ПУ зав. № 915. – София: Комбинат ЭЛПРОМ-ЭНЕРГО трансформаторный завод, 1988. – 12 с.
94. Пат. США № 3619765, кл. 324 – 43.5, 1971
95. Пат. Франции № 2163916, кл. Н 02 Р 13/00, 1973
96. Патент Японии № 53-380020, кл. Н 02 Р 13/16, 1978.
97. А.С. 1132336 СССР, МКИ Н 02 Р 13/06; 1983.
98. Пат. РФ № 2086073 на изобретение, Н02Р 13/06, G05F 1/20. Способ переключения ответвлений обмотки трансформатора / Зборовский И. А.– 95112939/07 ; заявл. 25.07.95 ; опубл. 27.07.97, Бюл. № 21 – 12 с. : ил.
99. Научно-производственное предприятие «Электромаш». – URL :<http://nppem.ru/page-61.html>.
100. Аржанников, Б. А. Системы и элементы теории автоматического регулирования напряжения в тяговом электроснабжении : учеб. пособие / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 181, [3] с.
101. Моченов, И. Г. Способы автоматического регулирования напряжения на тяговых подстанциях / И. Г. Моченов // «Электрическая и тепловозная тяга». – 1959. – № 6.
102. Моченов И. Г. Результаты опытной эксплуатации устройств автоматического регулирования напряжения на подстанциях / И. Г. Моченов // Тр. ин-та / ЦНИИ МПС. – Вып. 250. – М. : Трансжелдориз-дат, 1963. – С. 56–80.
103. Блок автоматического управления БАУРПН производства Глав-ЛатвЭнерго.
104. Петров, Г. Н. Электрические машины. Трансформаторы / Г. Н. Петров. – М. : Энергия, 1974. – 240 с.
105. Засорин, С. Н. Электронная и преобразовательная техника: учебник для вузов ж.-д. транспорта / С. Н. Засорин, В. А. Мицкевич, К. Г. Кучма. - Москва : Транспорт, 1981. - 319 с. - Библиогр.: с. 309-310. - 1.00 р.
106. 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.

107. 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).

108. А.С. Низов, А.Н. Штин, К.Г. Шумаков, Д.В. Лесников. Разработка и анализ энергетических параметров выпрямительного преобразователя. Методическое руководство для выполнения курсовой работы по дисциплине «Электронная техника и преобразователи», УрГУПС, Екатеринбург, 2017 г., 44 с.

109. Чебовский О. Г. Силовые полупроводниковые приборы: справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин — М. : Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.

110. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп.–М.: Транспорт, 1999, 464 с.

111. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. / В. Дьяконов – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.

112. Sim Power Systems. User's Guide Version 3. – The Math Works, Inc. – 2003. – 620 p.

113. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: «ДМК-Пресс». 2008. – 290 с.

114. Дьяконов, В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: «ДМК-Пресс», 2011. – 976 с. – ISBN 978-5-94074-492-4.

115. Дьяконов, В. П. Вейвлеты. От теории к практике. Полное руководство пользователя. Изд-е 2-е переработанное и дополненное. — М.: «СОЛОН-Пресс», 2004. — 400 с. — ISBN 5-98003-171-5.

116. Новаш, И. В., Румянцев, Ю. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-SIMULINK с учетом насыщения магнитопровода. «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ». – 2019 г. – № 4. – С. 12–24.

117. Каштанов, А. Л. Анализ эффективности работы сглаживающих устройств тяговых подстанций электрифицированных железных дорог постоянного тока по данным измерительных систем / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, Т. В. Комякова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. - 2015. - № 3(143). - С. 233-237.

118. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – 11-е изд. перераб. и доп. – М. : Гардарики, 2006. – 701 с.

119. Юревич, Е. И. Теория автоматического управления: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1975. – 416 с.: ил.

120. Марквардт, К. Г. Применение статистических и вероятностных методов при расчетах системы энергоснабжения электрических железных дорог. Применение вероятностных и статических методов в связи с электрификацией железнодорожного транспорта. Доклады, вып. III, Киев, 1963.

121. Броилов, В. П. К расчету трансформаторной мощности тяговых подстанций по износу изоляции. Труды МИИТа, вып. 104. Трансжелдориздат, 1959.

122. Бессонов, В. А. Закон распределения токов тяговых подстанций электрических железных дорог. Труды МИИТа, вып. 132. Трансжелдориздат, 1960.

123. Тимофеев, В. Д. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками. Изд-во «Энергия», М., 1965.

124. Волков, Н. Н. Исследование уровня напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока. Труды ВНИИЖТ, вып. 319. Изд-во «Транспорт», 1966.

125. Патент РФ № 196985 на полезную модель, В60М 3/02. Устройство для автоматического регулирования напряжения на тяговой подстанции / Б. А. Аржанников, А. О. Лимберг, Т. С. Тарасовский – 2019137181; заявл. 19.11.19.; опубл. 23.03.20, Бюл. №9.

126. 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).

127. Розанов, Ю. К. Силовая электроника : учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. 2-е изд., стереотипное. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.: ил.

128. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников / – издание 2-е, переработанное и дополненное. Главн. ред. физ.-матем. лит. изд-ва. «Наука», 1968.

129. Исследование эффективности автоматического регулирования напряжения на тяговых подстанциях магистральных железных дорог постоянного тока. / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пышкин А.А. – Москва., 1970.

130. Пышкин, А. А. Исследование напряжения на шинах тяговых подстанций. Сборник научных трудов УЭМИИТа, вып. 37, ч. I, 1974.

131. Пышкин, А. А. Определение числа переключений устройства АРН на тяговых подстанциях магистральных железных дорог. Сборник научных трудов УЭМИИТа, вып. 37, ч. I, 1974.

132. Вентцель, Е. С., Овчаров, Л. А. Теория вероятностей. Изд-во «Наука», М., 1969.

133. Марквардт, Г. Г., Бржозовский, Э. С. Применение ЭВМ для выбора параметров системы регулирования напряжения на электрических железных дорогах. Труды ВЗИИТа, вып. 41, 1969.

134. Пышкин, А. А. Определение вероятностных характеристик выпрямленного напряжения тяговых подстанций / О. И. Ветлугина, А. А. Пышкин // «Инновационный транспорт», 2016, №4.

135. Пышкин, А. А. Статистическое определение автокорреляционной функции напряжения на тяговых подстанциях постоянного тока / А. А. Пышкин // Сборник научных трудов УЭМИИТа, вып. 30, ч. I, 1971.

136. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте. – М. : МПС РФ, 1998.

**ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
С ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ**

Таблица А.1 – Преобразовательные трансформаторы с РПН

Область применения	Выпрямленное напряжение, В	Выпрямленный ток, А	Типовая мощность трансформатора, кВ*А	Напряжение сети, кВ	Исполнения трансформаторов		Исполнение преобразователей
					По способу регулирования напряжения	По способу охлаждения	
Электролизные установки	75;150; 300; 450; 600; 850	6300; 12500; 25 000; 50 000; 63 000; 100 000	400 – 160 000	6; 10; 20; 35; 110	РПН; УР	Масляные	Диодные
Электрифицированный железнодорожный транспорт	3300; 3700	3200	12 500; 16 000; 20 000	10; 35	РПН в одной ступени; плавное регулирование с УР	Масляные, сухие	Диодные
Электровозы, питаемые от сети переменного тока	1350 - 4200	600 - 5000	2000 - 8000	25	Комбинированное: РПН с плавным тиристорным	Масляные	Диодные, тиристорные
Вакуумные дуговые и плазмотронные печи	75; 115; 150; 300; 460; 660; 825	3200; 6300; 10 000; 12 500; 25 000; 40 000; 50 000;	4000- 25000	6; 10; 35	РПН	Масляные	Диодные
Электропривод постоянного тока	115; 230; 460; 660; 825; 1050	25; 50; 100; 200; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 4000; 5000; 6300; 8000; 10 000; 12 500; 16 000;	10 – 32 000	0,38; 6; 10; 35; 110;	ПБВ; РПН	Масляные с жидким негорючим диэлектриком, сухие	Тиристорные

**ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
ТРАНСФОРМАТОРА ТРСНП-12500/10**

ТРАНСФОРМАТОР ТРСРН-12500/10 Ж У1
ТЕХНИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКАЦИЯ (предварительная)
 Ze01855-17 поз.10

Объект поставки: Свердловская железная дорога Склад

№ п/п	Наименование параметра	Величина параметра	
		РО выведена	РО введена
1.	Номинальная мощность, кВА	12530	11400
2.	Номинальное напряжение преобразователя, В	3700	3360
3.	Номинальный ток преобразователя, А	3150	3150
4.	Номинальный ток вентиляльной обмотки, А	2558; 2558	
5.	Номинальное напряжение, кВ Обмотка СО Обмотка ВОД; ВОу	10,5 1,455; 1,470	10,5 1,323; 1,337
6.	Число фаз	3	
7.	Частота, Гц	50	
8.	Схема и группа соединения	У/ДУ-1-0	
9.	Регулирование напряжения Сторона регулирования ПБВ Диапазон регулирования ПБВ, % Тип ПБВ	СО ±5 Переключатель	
10.	Напряжение короткого замыкания (приведено к мощности 12530 кВА), % Сквозное (ВО-СО) Коммутации (СО-ВОД) Коммутации (СО-ВОу)	8,0 8,5 8,5	9,0 9,5 9,5
11.	Потери холостого хода, кВт	14,5	
12.	Потери короткого замыкания, кВт (115 °С)	64,0	
13.	Ток холостого хода, %	0,5	
14.	Испытательное напряжение СО/ВО, кВ - одноминутное, 50 Гц - 1,2/50 мкс ПГИ	35/12 75/-	
15.	Масса, кг, не более	32300	
16.	Габаритные размеры, мм, не более Длина x Ширина x Высота	4300 x 3000 x 4400	

Дополнительные требования к изделию:

1. Трансформатор сухой с естественным воздушным охлаждением (без вентиляторов) для наружной установки.
2. Трансформатор предназначен для эксплуатации в диапазоне температур соответствующем климатическому исполнению У1 ГОСТ 15150-69 (от -45 °С до +40 °С).
3. Степень защиты трансформатора IP 33.
4. Вводы СО и ВО расположены вдоль противоположных длинных сторон кожуха в верхней его части, выполнены проходными изоляторами.
5. Материал обмоточного провода - медь. Трансформатор с воздушно-барьерной системой изоляции.
6. Класс нагревостойкости обмоток СО/ВО-"Н"/ "Н".
7. Между обмотками ВО и СО установлен заземленный электростатический экран.
8. В комплект поставки входят ограничители перенапряжений (ОПН): на стороне СО - 3 шт.; на стороне ВО - 6 шт.
9. Имеется система температурного контроля магнитопровода и обмоток в текущем времени. На широкой стороне кожуха (снаружи) установлен шкаф контроля температуры ШКТС с напряжением питания 220 В переменного тока (возможно иное напряжение по согласованию).
10. Механическая прочность соответствует группе условий эксплуатации М6 по ГОСТ 17516.1-90.
11. Уровень шума не более 70 дБА.
12. При монтаже трансформатора расстояние между дном кожуха трансформатора и площадкой, на которую он установлен, должно быть не менее 600 мм (возможная иная установка по согласованию).
13. Трансформатор выполнен на тележке с катками с ребордой. Колея - 1524x 1524 мм. Каретка поворотная.
14. Трансформатор допускает перегрузки по ГОСТ 16772-77, режим нагрузки - 6.
15. Срок службы трансформатора 30 лет, гарантийный срок эксплуатации - 3 года.

Во всем неоговоренном трансформатор должен соответствовать ГОСТ 16772-77.
 Техническая спецификация является неотъемлемой частью договора.

Главный конструктор ОГК ТРО

Борисенко А. А.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В
ЛАБОРАТОРНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА С ТИРИСТОРНО-
РЕАКТОРНЫМ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Таблица В.1 – Характеристики преобразовательного трансформатора, входящего в состав лабораторной физической модели преобразовательного агрегата

Номинальная мощность, кВА	30 / 27*
Номинальное напряжение сетевой обмотки, В	220 / 200*
Номинальное напряжение вентильной обмотки «звезда», В	42,12 / 46,3
Номинальное напряжение вентильной обмотки «треугольник», В	72,87 / 80,1
Выпрямленное напряжение холостого хода, В	197,1 / 216,7*
Выпрямленный ток, А	144
Линейный ток сетевой обмотки, А	43,3 / 47,56*
Линейный ток вентильной обмотки, А	117,57
Частота, Гц	50
Междуфазное напряжение сетевой обмотки, В	380 / 346*
Напряжение короткого замыкания, %	30
Потери короткого замыкания, Вт	450
Потери холостого хода, Вт	80
Ток холостого хода, %	0,7

Примечание: * - с введенной РО.

Таблица В.2 – Основные параметры диода ВЛ-200 выпрямительного блока физической модели

Наименование характеристики	Обозначение характеристики	Значение
Повторяющееся импульсное обратное напряжение	U_{RRM}	600-1300 В
Максимально допустимый средний прямой ток (Температура корпуса)	$I_{F(AV)}(TC)$	200 А (100°C)
Максимально допустимый действующий прямой ток в открытом состоянии	I_{FRMS}	6 кА
Максимально допустимая температура перехода	T_{jmax}	140 °C
Пороговое напряжение диода в открытом состоянии	$U_{T(TO)}$	0.92 В
Динамическое сопротивление в открытом состоянии	гГ	0.684 мОм

Таблица В.3 – Основные параметры тиристоров ТЛ2-200-9 ТРПУ

Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии, В	600...900
Неповторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии, В	$1,2U_{зс,п}$
Повторяющееся импульсное обратное напряжение, В	500...1000
Максимально допустимое обратное постоянное напряжение, В	$0,5U_{обр,и}$
Максимально допустимое обратное постоянное напряжение управления, В	3
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии при $f=50$ Гц, А	200
Ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии, А	4000
Максимально допустимый импульсный ток управления, А	10
Минимально допустимый импульсный ток управления, А	2
Температура перехода, °С	+140
Температура корпуса, °С	-50...+85

Таблица В.4 – Параметры неуправляемого реактора лабораторной физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ

Параметр	Значение
Сопротивление НР $Z_{НР}$, Ом	3,2
Индуктивное сопротивление $X_{НР}$, Ом	3,2
Активное сопротивление $R_{НР}$, Ом	0,0037

СТОИМОСТЬ СИСТЕМЫ БАРН И ТИРИСТОРНЫХ КЛЮЧЕЙ ТРПУ



ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ЭНЕРГОМАШ (ЕКАТЕРИНБУРГ) –
УРАЛЭЛЕКТРОТЯЖМАШ»

Россия, 620017, г. Екатеринбург, ул. Фронтových бригад, 22, ИНН/КПП 6673197337/660850001, р/с 40702810301700001398
в ПАО БАНК "ФК ОТКРЫТИЕ" г. Москва, к/с 30101810300000000985, БИК 044525985
телефон: (343) 324-53-00, факс: (343) 324-55-21, E-mail: secretary@uetm.ru, www.uetm.ru

Дата 28.04.2016 г.
Исх. № 561

Доктору технических наук, профессору
УрГУПС
Аржанникову Б.А.

На Ваш запрос сообщаем стоимость оборудования поставляемого для объекта:
«Южно-Уральской ж.д. ОАО «РЖД»:

№ п.п.	Оборудование	Тип, марка	Цена с учётом НДС в рублях
1.	Реактор управляемый масляный трехфазный	РТДП-6300/10 ЖУ1	22 656 000,00
2.	Трансформатор преобразовательный трехфазный масляный	ТРДП-16000/10 ЖУ1	32 001 600,00

Цена указана без учета доставки оборудования.
Ориентировочный срок изготовления оборудования 120 календарных дней.
Срок действия данного предложения – 1 месяц

С уважением,

И.о. директора по продажам

И.С. Ярыгин

Рисунок Г.1 – Стоимость оборудования системы БАРН



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ЭЛПРЕСС»

430001, г. Саранск, Республика Мордовия, ул. Васенко, 30

тел.: +7 (8342) 48-07-33 (доб. 34), 27-02-83

факс: +7 (8342) 48-07-33

e-mail: el_press@mail.ru

internet: www.ao-elpress.ru

ИНН 1327011154
Расчетный счет 40702810408180000874
Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО), г. Москва
БИК 044525411
К/сч. 30101810145250000411
КПП 132701001

№ 376 от 24.08.2021г.
на № _____ от _____

ФГБОУ ВО УрГУПС
Проректору по научной работе и международным связям
Бушуеву С.В.

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66

тел.: 8 (962) 317-12-60

e-mail: tar-lima@yandex.ru

Добрый день!

Направляем Вам технико-коммерческое предложение на два варианта однофазных ключей.

1. Стоимость однофазного ключа переменного тока с воздушным принудительным охлаждением (далее - ключ) БКВТ-680-5,4-П - 224700 руб. без НДС.

Ключ представляет единую конструкцию и собран на основе 6 тиристоров таблеточного исполнения, каждый из которых сжат между половинками своего охладителя.

Ключ укомплектован снабберными (RC-цепями) и делителями напряжения.

Ориентировочные габариты ключа (Д x Ш x В), мм: 450 x 550 x 350.

Ориентировочная масса ключа, кг: 55.

2. Стоимость однофазного ключа переменного тока с воздушным принудительным охлаждением (далее - ключ) БКВТ-680-5,4-П - 295200 руб. без НДС.

Ключ представляет единую конструкцию и собран на основе 8 тиристоров таблеточного исполнения, каждый из которых сжат между половинками своего охладителя.

Ключ укомплектован снабберными (RC-цепями) и делителями напряжения.

Ориентировочные габариты ключа (Д x Ш x В), мм: 450 x 700 x 350.

Ориентировочная масса ключа, кг: 75.

Срок изготовления любого из вариантов блока - 8 недель.

Просим Вас сообщить скорость нарастания тока. Этот параметр нам необходим для точного расчёта снабберных цепей.

Директор АО «Элпресс»

Савин А.В.

ИНН 1327011154

КПП 132701001

тел.: +7 (8342) 48-07-33, доб. 34

Елисеев В.В.

Рисунок Г.2 – Стоимость тиристорных ключей ТРПУ

АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ
РАБОТЫ

ФОРАТЕК ЭНЕРГОТРАНССТРОЙ

620017, Россия, г. Екатеринбург, ул. Фронтových бригад, 33, а/я 750. ИНН: 7716236962
Тел.: +7 (343) 346-15-20, факс: +7 (343) 376-15-20
<https://fets.ru>, e-mail: 1520@fets.ru

Акт**о внедрении результатов научно-исследовательской работы**

1. Разработчики: Аржанников Борис Алексеевич, Тарасовский Тимофей Сергеевич.

2. Предмет внедрения: методика расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора тиристорно-реакторного устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) преобразовательных трансформаторов тяговых подстанций постоянного тока.

3. Место внедрения: АО «Форатек ЭнергоТрансСтрой».

4. Техничко-экономический эффект: предлагаемая методика позволяет снижать трудозатраты и производить достоверные электрические расчеты при оценке технико-энергетической эффективности устройств электроснабжения, в т. ч. при расчете пропускной способности участков (направлений).

5. Дата внедрения: 14.06.2021 г.

6. Предложение о дальнейшем использовании: предлагается применение результатов научно-исследовательской работы при проектировании, усилении и модернизации электрифицированных участков, а также повышении энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и регулируемой системы тягового электроснабжения.

Генеральный директор

К.А. Грехов

Начальник проектного отдела

О.Н. Рыжов



ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 196985

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТЯГОВОЙ
ПОДСТАНЦИИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Уральский государственный университет путей
сообщения" (RU)*

Авторы: *Аржанников Борис Алексеевич (RU), Лимберг Арнольд
Оскарлович (RU), Тарасовский Тимофей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2019137181

Приоритет полезной модели 19 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 23 марта 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 19 ноября 2029 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Изиев