

На правах рукописи

**Шумаков Константин Геннадьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ  
ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение транспорта» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО УрГУПС)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
Галкин Александр Геннадьевич

Официальные оппоненты:

- Бурков Анатолий Трофимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения (ФГБОУ ВПО ПГУПС);
- Сухогузов Александр Петрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (ФГБОУ ВПО УрГУПС).

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО ОмГУПС).

Защита состоится « 13 » « апреля » 2012 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 при Уральском государственном университете путей сообщения по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, аудитория Б2-15.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного университета путей сообщения, на сайте Министерства образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru>, на официальном web-портале УрГУПС [www.usurt.ru](http://www.usurt.ru).

Автореферат разослан « 12 » « марта » 2012 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять в адрес Диссертационного совета университета.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук

Асадченко Виталий Романович

## ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Тяговые и трансформаторные подстанции железных дорог Российской Федерации являются основными элементами тягового и нетягового электроснабжения. Они состоят из распределительных устройств (РУ), основу которых составляет силовое электротехническое оборудование. Надежность этих устройств и схем их включения, в конечном счете определяет бесперебойную работу электроподвижного состава и нетяговых потребителей.

В настоящее время освоен выпуск высоконадежного современного электрооборудования, которое может считаться практически необслуживаемым. Однако, до сих пор проектирование новых подстанций осуществляется на основе схемных решений разработанных в середине прошлого века с учетом параметров надежности устаревшего оборудования (масляных выключателей, разъединителей, разрядников и так далее), применявшихся в то время.

Применение современных и достаточно дорогих электроаппаратов в старых схемных решениях приводят к значительному повышению стоимости подстанций, что может явиться препятствием на пути внедрения новой техники. Поэтому внедрение высоконадежного оборудования должно сопровождаться совершенствованием схем подстанций. Это должно привести к снижению капитальных и эксплуатационных затрат при сохранении существующей степени надежности функционирования электрооборудования.

Актуальность выбранного направления научного исследования подтверждает разработанная Управлением электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» «Концепция обновления тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения», согласно которой основополагающим принципом технической политики Российских железных дорог в области сооружения и реконструкции подстанций, является принцип совершенствования схемотехнических решений при сохранении существующей степени надежности функционирования.

**Цель диссертационной работы** — совершенствование схемных решений распределительных устройств питающего напряжения тяговых и трансформаторных подстанций с учетом увеличения надежности силового электротехнического оборудования.

Для достижения указанных целей необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ существующих схемных решений, рассмотреть различные методики определения показателей надежности и выявить их преимущества и недостатки.
2. Разработать новые схемные решения РУ питающего напряжения подстанций.
3. Разработать математическую модель и создать программный комплекс для определения показателей надежности произвольной электрической схемы.
4. Определить параметры надежности существующих и предложенных схем РУ подстанций, выполнить их анализ, и на основе технико-

экономического сравнения, дать рекомендации по выбору схем РУ питающего напряжения для всех типов подстанций.

**Объектом исследования** являются распределительные устройства подстанций.

**Предметом исследования** являются схемные решения распределительных устройств питающего напряжения подстанций.

**Методы исследования.** Автором применен математический аппарат теории надежности, теории графов и теории игр. Для описания процессов использованы аналитическая модель с применением метода включения-исключения и статистическое моделирование по методу Монте-Карло.

**Научная новизна работы.**

1. Разработаны схемные решения РУ питающего напряжения различных типов подстанций.

2. Разработаны аналитическая и статическая математические модели, позволяющие определить параметры надежности произвольной электрической схемы.

3. Выполнены расчеты, произведен анализ и выбраны наиболее экономичные схемы РУ питающего напряжения подстанций.

**Практическая значимость исследования.**

1. Предложенные схемы РУ питающего напряжения могут быть использованы при проектировании подстанций.

2. Разработанные методики и программа для ЭВМ позволяют определять показатели надежности произвольной электрической схемы и могут быть применены при исследовании любых сложных систем.

3. Рекомендации по выбору схем РУ питающего напряжения для различных подстанций могут быть использованы при реконструкции действующих подстанций и электрификации железных дорог.

**На защиту выносятся.**

1. Усовершенствованные схемные решения РУ питающего напряжения подстанций.

2. Математические модели, позволяющие определить параметры надежности произвольной электрической схемы: аналитическая – с применением метода включения-исключения и статистическая – с применением метода Монте-Карло.

3. Результаты расчета и анализ показателей надежности, а также рекомендации по выбору различных схемных решений РУ питающего напряжения.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы при проектировании тяговых подстанций 53-х километрового обхода станции Березники Свердловской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», а также используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 190401 «Электроснабжение железных дорог».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были изложены на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Наука, инновации и образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России» (г. Екатеринбург, 2006г.); четвертый

Международный симпозиум «Электрификация и организация скоростных и тяжёловесных коридоров на железнодорожном транспорте» (г. Санкт-Петербург, 2007г.); Научно-техническая конференция «Разработка и совершенствование электрооборудования для систем тягового электроснабжения железных дорог» (г. Екатеринбург, 2009г.); Международная научно-техническая конференция «Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура» (г. Екатеринбург, 2011г.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 12-и печатных работах, из которых 3 статьи в журнале, входящем в Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций, свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ и патент на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Содержание изложено на 128 машинописных страницах, в том числе включает 14 таблиц и 51 рисунок. Список использованных источников содержит 68 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности научной проблемы, поставлены цели и задачи исследований, отмечено научное и практическое значение работы, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен подробный литературный обзор по теме диссертации, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Произведен анализ схем унифицированных тяговых подстанций, применяемых в настоящее время проектными институтами, которые изложены в трудах Ю. М. Бея, Р. Р. Мамошина, В. Н. Пупынина, М. Г. Шалимова, а также в типовых материалах для проектирования ОТМ32-4243-01 «Унифицированные тяговые подстанции магистральных железных дорог».

Анализ был выполнен для РУ питающего напряжения опорной (узловой), транзитной (проходной), отпаечной (на ответвлениях) и тупиковой (концевой). Отмечены их достоинства и недостатки.

Выполнен анализ существующих методик определения показателей надежности систем, отмечены их достоинства и недостатки. При анализе были использованы работы ученых Ю. Б. Гука, А. В. Ефимова, А. Г. Галкина, Ф. И. Синьчугова, Г. Хана, С. Шапиро, а также иностранных ученых – J. Endrenyi, M. L. Shooman, M. Hall.

Выявлено, что при существующем уровне надежности электротехнического оборудования, а также развития вычислительной техники создается потребность в новых схемных решениях и в вычислительной программе для определения показателей надежности произвольных электрических схем.

**Вторая глава** посвящена разработке и анализу вновь предложенных автором схемных решений распределительных устройств питающего напряжения различных тяговых подстанций.

Для отпаечной тяговой подстанции (ОТП ТП) разработаны несколько схем РУ питающего напряжения как на отдельно стоящем оборудовании (ОСО), так и на интегральном силовом оборудовании (ИСО). ОСО представляет собой отдельное электротехническое оборудование, такое как выключатели, измерительные трансформаторы, разъединители и прочее. ИСО, напротив, в одном корпусе содержит несколько электроаппаратов. Эти ячейки могут содержать от одного до двух выключателей, от одного до трех разъединителей и от одного до трех заземляющих ножей. Надежность такого оборудования очень высока. Так по данным фирмы АББ интенсивность отказа ячейки ПАСС, состоящей из одного выключателя и одного разъединителя, равняется  $0,005 \text{ год}^{-1}$ , что сопоставимо с интенсивностью отказа разъединителя типа РНДЗ.

В схеме ОТП ТП предложено перенести трансформаторы напряжения от перемычки за выключатель на участок присоединения понижающего трансформатора. Это связано с тем, что измерительные трансформаторы напряжения в РУ питающего напряжения ОТП ТП предназначены только для учета электроэнергии. Такое подключение позволило отказаться от разъединителя в цепи подключения трансформатора напряжения, так как они будут выводиться в ремонт вместе с понижающим трансформатором. Кроме этого, при таком подключении трансформаторы напряжения защищены соответственно выключателями и ограничителями перенапряжений.

Так как типовая схема ОТП ТП предназначена для питания двух понижающих трансформаторов и имеет два ввода подключенных к различным питающим линиям, то целесообразно иметь РУ питающего напряжения состоящее как минимум из двух ячеек ИСО. В этом случае они резервировали бы друг друга и выводились в ремонт вместе с понижающим трансформатором, к которому они подключены.

Недостатком такой схемы является достаточно большая сложность и как следствие высокая стоимость ячеек ИСО типа  $1Q+3QS$  (один выключатель и три разъединителя). Кроме этого, так как данное оборудование производится за рубежом, то к их стоимости добавляются затраты на растаможивание и доставку груза. Поэтому была поставлена задача – разработать схему РУ питающего напряжения ОТП ТП на более простых ячейках ИСО, производство которых может быть организовано в России в самое ближайшее время.

Начиная с 2001 года, отечественная промышленность выпускает баковый элегазовый выключатель ВЭБ-110, технические параметры которого находятся на уровне лучших мировых образцов. Кроме этого на базе выключателя ВЭБ-110 в ближайшее время будет начато российское производство ячеек ИСО типа  $1Q+1QS$  (один выключатель и один разъединитель).

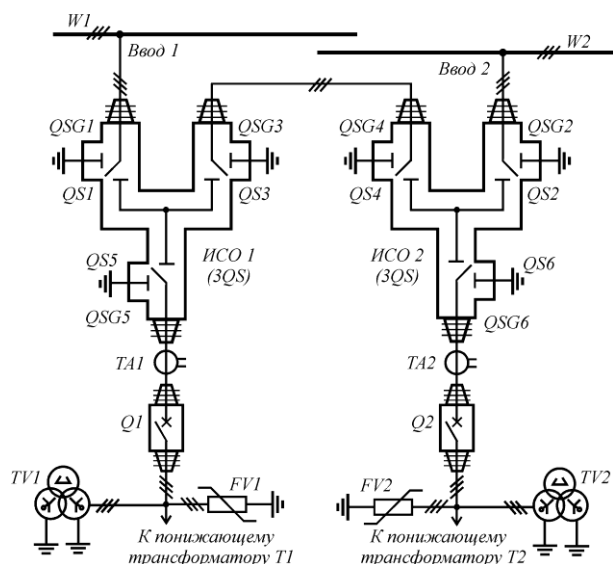


Рисунок 1 – Схема РУ питающего напряжения ОТП ТП с перемычкой на упрощенных ИСО

дование является достаточно надежным, а значит, ремонтная перемычка практически не будет использоваться, то была предложена схема без перемычки (рисунок 2, а).

Поэтому для уменьшения стоимости РУ питающего напряжения ОТП ТП автором предложена схема, состоящая из упрощенных ячеек ИСО типа 3QS (три разъединителя) и элегазового выключателя (рисунок 1).

Так как вводы РУ питающего напряжения ОТП ТП подключаются к различным питающим линиям, то перемычка используется при выводе в ремонт одного из выключателей, установленных на участке присоединения силовых трансформаторов. Учитывая то, что современное электротехническое оборудование

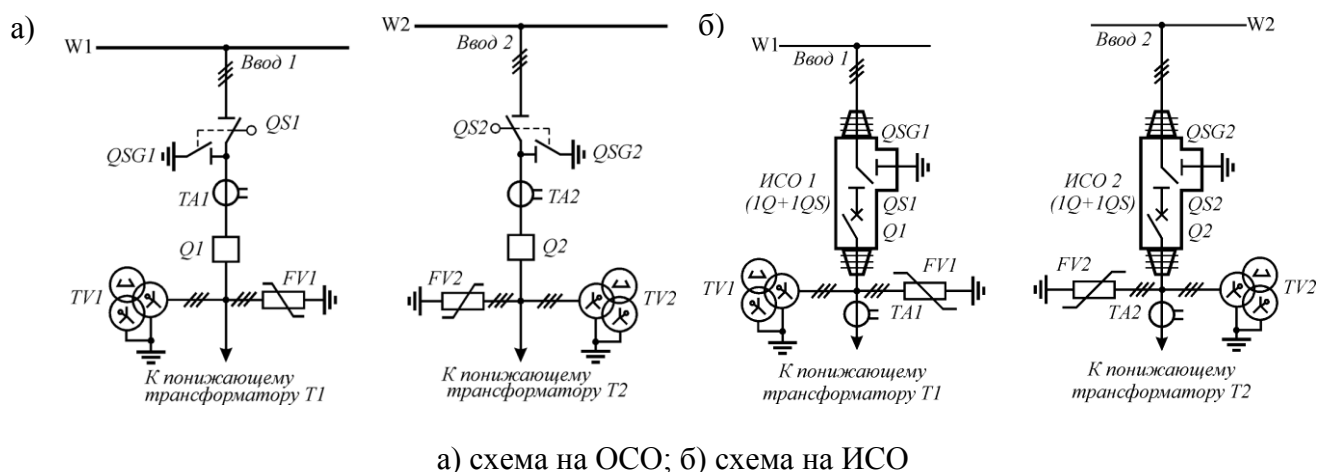


Рисунок 2 – Схема РУ питающего напряжения ОТП ТП без перемычки

Такая схема ОТП ТП представляет собой два независимых ввода, подключенных к ЛЭП W1 и W2, в каждом из которых установлены: ограничители перенапряжения FV1 (FV2), разъединители QS1 (QS2), выключатели Q1 (Q2) и измерительные трансформаторы TA1 (TA2) и TV1 (TV2). При выводе в ремонт какого-либо электроаппарата отключается один из вводов.

Исключение перемычки уменьшает число электротехнического оборудования на два разъединителя.

Предложенная схема РУ питающего напряжения ОТП ТП без перемычки может быть реализована на упрощенных ячейках ИСО типа 1Q+1QS (рисунок 2, б).

Транзитные тяговые подстанции (ТРЗ ТП) отличаются от ОТП ТП тем, что РУ питающего напряжения включаются в рассечку ЛЭП и должны обеспе-

чивать транзит электрической энергии, а также автоматическое секционирование ЛЭП. В настоящее время на ТРЗ ТП получили распространение два варианта РУ питающего напряжения.

Первая схема, по которой сооружено подавляющее количество транзитных подстанций, называется схема «с ремонтной перемычкой со стороны линии». Недостатком данной схемы является то, что при выводе в ремонт выключателя рабочей перемычки транзит электроэнергии осуществляется по ремонтной перемычке, состоящей из двух разъединителей и, тем самым, нарушается автоматическое секционирование ЛЭП. В этом случае повреждение в линии, как справа, так и слева от ремонтной перемычки приведет к полному отключению данной подстанции.

Вторая схема, которая была принята для проектирования ТРЗ ТП 01 января 1990 года, называется схема «с ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов». Её преимуществом, по сравнению с первой, является то, что при выводе в ремонт выключателя рабочей перемычки транзит электроэнергии осуществляется по ремонтной перемычке, состоящей из двух разъединителей, а секционирование ЛЭП осуществляется выключателями участков присоединения трансформаторов. Одновременно с этим вторая схема имеет существенный недостаток — при транзите электроэнергии по ремонтной перемычке (при выводе в ремонт выключателя рабочей перемычки) возникает необходимость параллельной работы обоих головных трансформаторов. При этом выход из строя любого трансформатора приводит к отключению всей подстанции. Кроме этого в составе силового оборудования второй схемы на два разъединителя больше, чем в первой схеме.

При использовании современного оборудования могут быть получены две схемы РУ питающего напряжения ТРЗ ТП: «схема с выключателем в перемычке» и «схема без выключателя в перемычке».

Первая схема (рисунок 3) имеет один выключатель в перемычке, огражденный разъединителями с двух сторон.

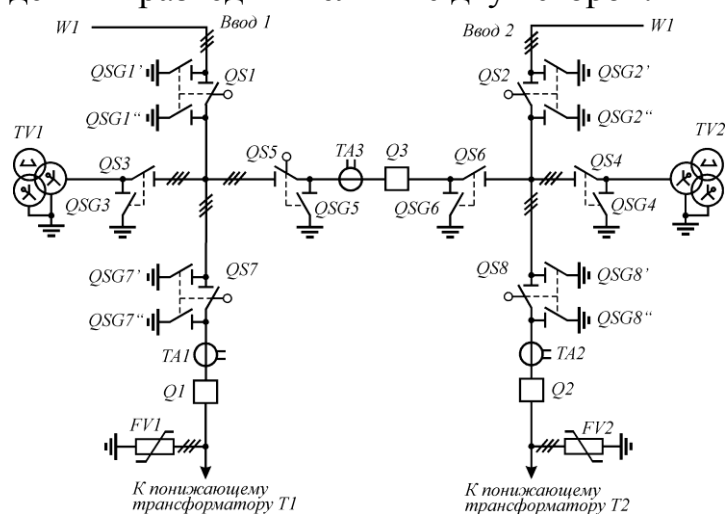


Рисунок 3 – Схема РУ питающего напряжения ТРЗ ТП с выключателем в перемычке на ОСО

Транзит электроэнергии осуществляется по перемычке, и автоматическое секционирование питающей линии осуществляется установленным в ней выключателем. При выводе  $Q3$  в ремонт транзит прекращается, но питание потребителей не прерывается и осуществляется от соседних питающих ТП. Отключение или вывод в ремонт понижительных трансформаторов  $T1$  и  $T2$  осуществляется выключателями  $Q1$  и  $Q2$ .



Схема с выключателем в перемычке по сравнению с типовой схемой РУ питающего напряжения ТРЗ ТП с ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов имеет на два разъединителя меньше (таблица 1).

Схема без выключателя в перемычке может иметь два режима работы трансформаторов:

Рисунок 4 – Схема РУ питающего напряжения ТРЗ ТП  
без выключателя в перемычке на ОСО

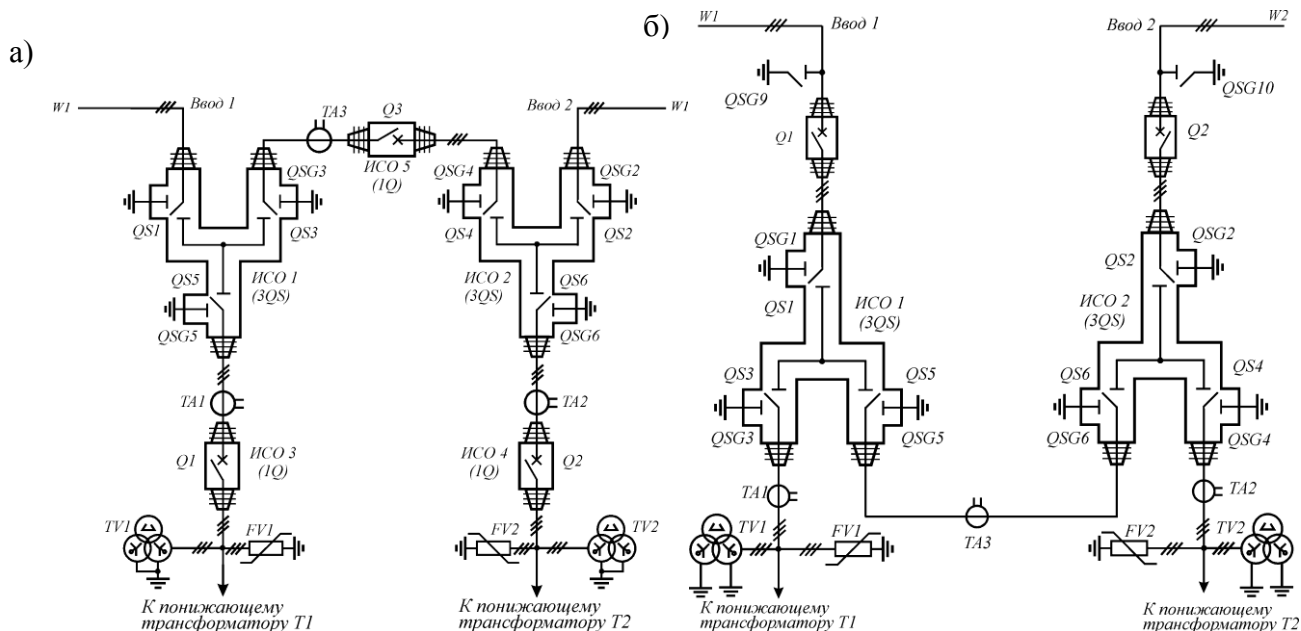
Если применяется первая схема питания, то при выходе из строя понижающего трансформатора

Предложенная схема на ОСО по сравнению с типовой схемой РУ питающего напряжения ТРЗ ТП с ремонтной перемычкой со стороны питающей линии имеет на четыре разъединителя и один выключатель меньше (таблица 1). Таким образом, схема без выключателя в перемычке по числу электротехнического оборудования совпадает с типовой схемой ОТП ТП, но позволяет осуществлять автоматическое секционирование ЛЭП и тем самым обеспечить надежный транзит. Это позволяет позиционировать схему без выключателя в перемычке как универсальную промежуточную ТП.

Таблица 1 – Количество выключателей и разъединителей в различных вариантах схем РУ питающего напряжения транзитных подстанций

Оборудование	«с ремонтной перемычкой со стороны линии»	«с ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов»	«с выключателем в перемычке» (рисунок 3)	«без выключателя в перемычке» (рисунок 5)
Выключатель, шт.	3	3	3	2
Разъединитель, шт.	10	12	8	8

Схемные решения РУ питающего напряжения ТРЗ ТП, приведенные на рисунок 3 и рисунок 4, аналогично схемам ОТП ТП, могут быть реализованы на укрупненных или упрощенных ячейках ИСО. Примеры схем на упрощенных ИСО с отдельно стоящем элегазовым выключателем приведены на рисунок 5, а и б соответственно.



а) схема с выключателем в перемычке; б) схема без выключателя в перемычке.

Рисунок 5 – Схема РУ питающего напряжения ТРЗ ТП на упрощенных ИСО с элегазовыми выключателями

Основное отличие РУ питающего напряжения опорной тяговой подстанции (ОПР ТП) от РУ питающего напряжения промежуточных подстанций — наличие трех и более вводов.

Типовой схемой РУ питающего напряжения для опорных подстанций при числе вводов не более пяти является схема РУ с одинарной секционированной выключателем и обходной системами шин. Основное назначение обходной шины — вывод в ремонт выключателей вводов и участков присоединения трансформаторов без перерыва питания этих присоединений. Такая схема обеспечивает достаточно высокую надежность и гибкость в эксплуатации.

Однако применение обходной системы шин требует установки дополнительных коммутационных аппаратов: обходного выключателя, трех разъединителей к нему, по одному разъединителю на каждый ввод и по одному разъединителю на участки присоединения трансформаторов.

Необходимость применения обходной системы шин была оправдана тем, что схема разрабатывалась под баковые масляные выключатели, надежность которых была на порядок ниже надежности разъединителей и имели высокую интенсивность ремонтных работ. При этом вывод в ремонт любого шинного разъединителя главной системы шин сопровождался отключением всей секции и, соответственно, всех ее присоединений.

В настоящее время надежность элегазовых выключателей практически достигла надежности разъединителей. Поэтому появилась возможность отказаться от обходной системы шин в РУ питающего напряжения опорных подстанций. Это значительно сократило бы количество и стоимость устанавливаемого оборудования при сохранении необходимого уровня надежности электроснабжения потребителей.

Одним из вариантов совершенствования схемного решения РУ питающего напряжения ОНР ТП может быть схема без обходной системы шин выполненной на упрощенных ячейках ИСО типа  $1Q+1QS$  (рисунок 6).

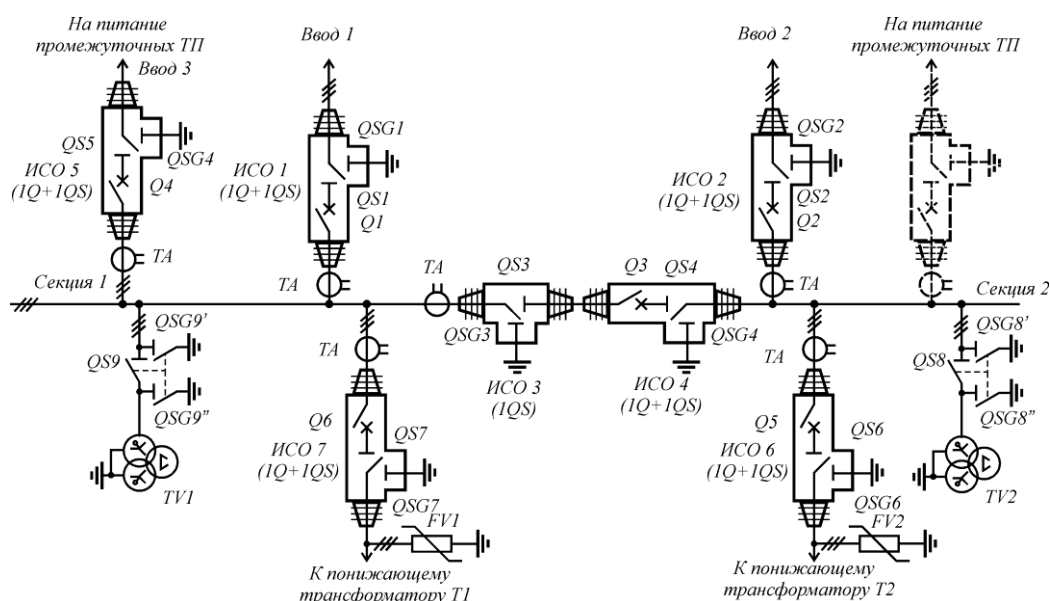


Рисунок 6 – Схема РУ питающего напряжения опорной подстанции без обходной системы шин на упрощенных ИСО

В этой схеме секционирование главной системы сборных шин осуществляется двумя электроаппаратами: ячейкой ИСО3 типа  $1QS$  и ячейкой ИСО4 типа  $1Q+1QS$ . Установка двух элементов для секционирования необходима для вывода в ремонт ИСО3 или ИСО4 без отключения всего РУ. Так для работы на ИСО3 отключаются все присоединения секции 1, выключатель  $Q3$  (ИСО4) и разъединитель  $QS4$  (ИСО4). Секция 2 при этом остается в работе. Для работы на ИСО4 отключаются все присоединения секции 2, выключатель  $Q3$  (ИСО4) и разъединитель  $QS3$  (ИСО3). Секция 1 при этом остается в работе.

Для вывода в ремонт ИСО присоединения какой-либо секции необходимо отключить всю секцию, так как это было в типовых схемах при выводе в ремонт шинных разъединителей.

Дальнейшее увеличение числа вводов для питания промежуточных подстанций может осуществляться ячейками ИСО типа  $1Q+1QS$ , которые на рисунок 6 показаны пунктиром.

С целью сокращения числа ячеек ИСО (снижения времени монтажа, уменьшения площади РУ) можно применить ИСО с более высокой степенью интеграции. Так опорная подстанция может быть реализована на двух укрупненных ячейках ИСО.

По разработанным схемным решениям питающего напряжения на группу схем был получен патент №2403662 на изобретение «Устройство для питания и распределения электрической энергии на промежуточных тяговых подстанциях».

В третьей главе автором предложены две математические модели, позволяющие определить параметры надежности различных электрических схем: аналитическая – с применением метода включения-исключения и статистическая – с применением метода Монте-Карло.

Для оценки степени возможного совершенствования схем РУ питающего напряжения ТП необходимо определить показатели их надежности.

Любую электрическую систему можно представить структурной схемой надежности (СШ), на которой оборудование заменяют элементом с определенными параметрами надежности. В простейшем случае она представляет системы, которые образованы последовательно-параллельным включением элементов. Однако, если структурная схема не является таковой, то решить её общей аналитической моделью практически невозможно.

В свою очередь СШ можно сопоставить графу, в котором один или несколько последовательно соединенных элементов представлены ребрами графа ( $e_{12} \dots e_{mv}$ ), а узлы схемы – вершинами графа ( $1 \dots M$ ) (рисунок 7).

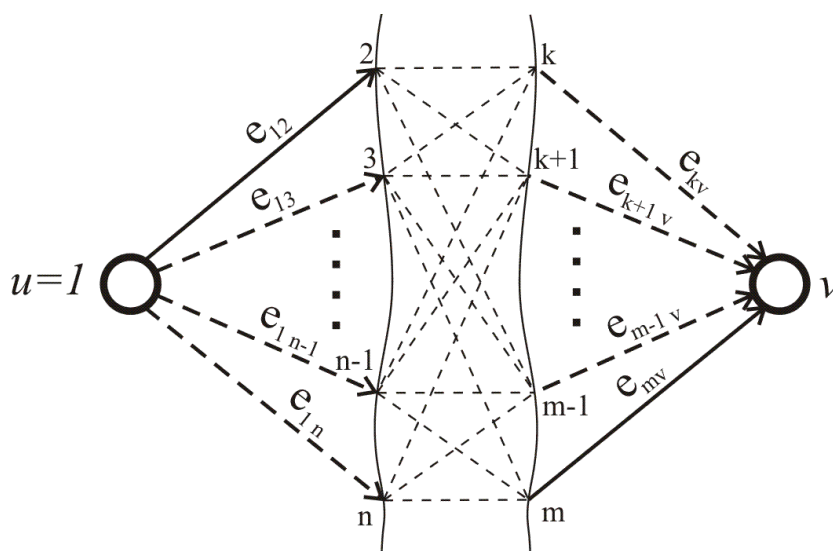


Рисунок 7 – Граф произвольной электрической системы с входной вершиной  $u$  и выходной  $v$

Для анализа исследуемых систем воспользуемся теорией путей и сечений.

Введем понятие структурной функции  $\varphi$ , которая характеризует систему и определяется из (1).

$$\varphi = \begin{cases} 1, & \text{если система работоспособна;} \\ 0, & \text{если система отказала.} \end{cases} \quad (1)$$

Любой вектор состояний  $\vec{z} = \{z_i\}$  называется вектором пути, если  $\varphi(\vec{z}) = 1$ . Причем  $z_i = \begin{cases} 1, & \text{если элемент работоспособен;} \\ 0, & \text{если элемент отказал.} \end{cases}$

Наличие хоть одного рабочего вектора пути во всей системе равнозначно задается структурной функцией  $\varphi$ .

Вектор пути  $\vec{z}$  называется минимальным, если для всех  $\vec{y}$  удовлетворяющих условию  $\vec{y} < \vec{z}$ , выполняется равенство  $\varphi(\vec{y}) = 0$ . Условимся, что  $\vec{y} < \vec{z}$ , если  $y_i \leq z_i$ ,  $i = \{1, 2, \dots, n\}$  и  $y_j < z_j$ , по крайней мере, для одного  $j$  из множества  $\{1, 2, \dots, n\}$ . Минимальному вектору пути соответствует минимальное множество элементов пути.

Каждому вектору пути  $\vec{z}$  поставим в соответствие множество тех  $k$ -ых элементов, для которых  $z_k = 1$ , то есть  $\mathfrak{M}(\vec{z}) = \{k: z_k = 1\}$ . Множество элементов пути  $\mathfrak{M}(\vec{z})$  характеризует те элементы, которые работоспособны.

Для дальнейших рассуждений воспользуемся теорией графов.

Допустим, что для ССН, полученной по произвольной электрической системе, составлен направленный граф  $G = \langle V; E; p \rangle$ , где  $V$  – множество вершин графа  $G$  (обычно занумерованные натуральными числами);  $E = \{e_{ij}\}$  – множество ребер графа  $G$ ;  $p$  – параметр, присваивающийся каждому ребру  $e_{ij} \in E$  соединяющему вершины  $i$  и  $j$ , как некоторое неотрицательное число. Выделим две вершины (рисунок 7): входную  $u$  и выходную  $v$ . Очевидно, что система работоспособна тогда и только тогда, когда в графе существует, по крайней мере, один путь от вершины  $u$  к вершине  $v$ , содержащий лишь ребра работоспособных элементов.

Работоспособность системы можно описать лишь минимальными путями (рисунок 8).

Для получения минимальных путей можно воспользоваться способом потенцирования матрицы инцидентности ребер, а также методом понижения ранга матрицы инцидентности ребер или методом определителей.

Получение минимальных путей способом потенцирования матрицы инцидентности ребер производится следующим образом.

Если каждый элемент в матрице инцидентности  $\mathfrak{R} = ((K_{ij}))$  заменить символом соответствующего ребра  $e_{km}$ , то получим матрицу инцидентности ребер

$$\mathfrak{R} = ((K_{ij})), \text{ где } K_{ij} = \begin{cases} e_{km}, & \text{если ребро } e_{km} \text{ существует,} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

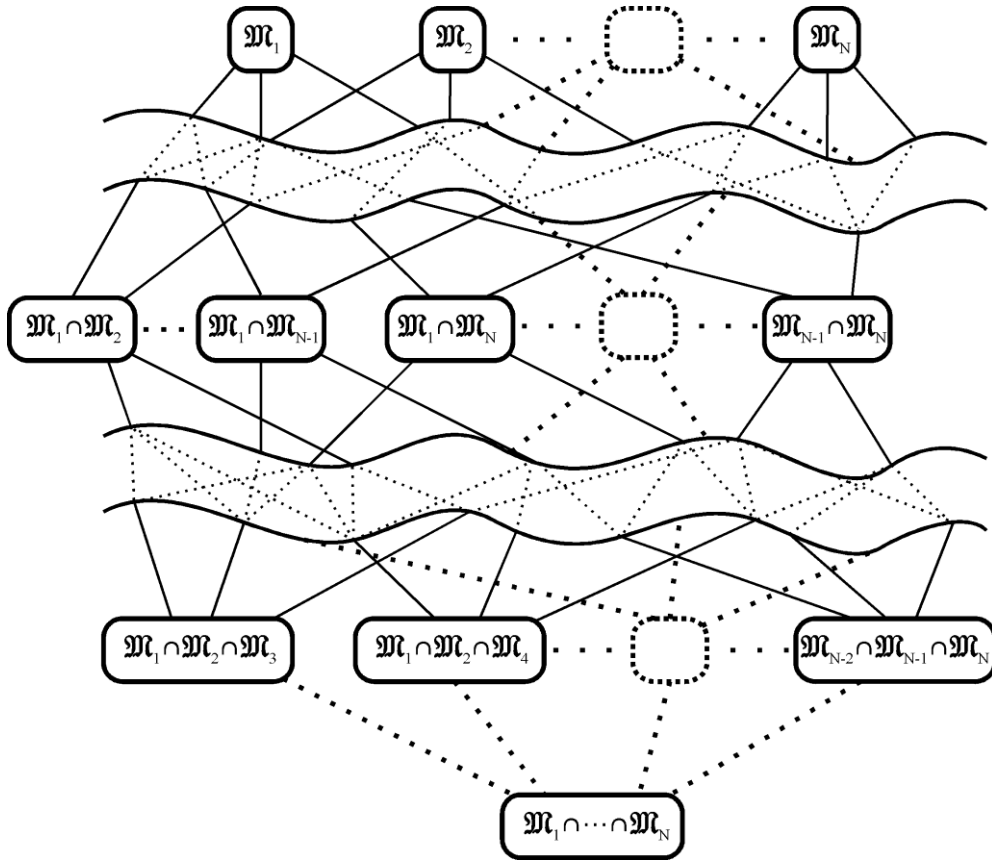


Рисунок 8 – Диаграмма полурешетки пересечений минимальных путей

Матрица  $\mathfrak{R}^{(r)}$  обладает следующим важным свойством: слагаемые, из которых состоит элемент  $K_{ij}^{(r)}$ , взаимно однозначно соответствуют путям длины  $r$  из узла  $i$  в узел  $j$ .

Матрица  $\mathfrak{R}^{(r)} = \left( \left( K_{ij}^{(r)} \right) \right)$  получается в результате  $(r-1)$  кратного умножения матрицы  $\mathfrak{R}$ , полученной из (2), самой на себя, причем с элементами  $e_{km}$  формально обходятся как с числами. Очевидно, что  $\mathfrak{R}^{(1)} = \mathfrak{R}$ .

Зная минимальные пути для системы, можно вычислить вероятность полной парной связности (вероятность безотказной работы системы), применяя метод включения-исключения

$$P(u, v) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i \leq j} P(A_i \cap A_j) + \sum_{i \leq j \leq k} P(A_i \cap A_j \cap A_k) - \dots \quad (3)$$

$$\dots + (-1)^{w-1} P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_w),$$

где  $i, j, k$  – индексы суммирования, которые удовлетворяя указанным ограничениям, пробегает значения от 1 до  $w$ .

Случайное событие  $A$  равносильно существованию, по крайней мере, одного исправного пути от узла  $u$  к узлу  $v$ .

Предложенная методика позволяет производить расчет структур не являющихся последовательно-параллельными. При использовании метода вклю-

чение–исключение имеется  $(2^w - 1)$  слагаемых, что значительно затрудняет расчет при больших значениях  $w$ .

Наравне с методом включения-исключения возможно применение метода статистического моделирования.

Предлагаемая методика заключается в следующем. Для каждого элемента разыгрывается случайное число, определяющее его состояние. После чего определяется вероятность отказа для каждого пути и для всей системы в целом.

Рассмотрим более подробно применение этого метода.

После розыгрыша каждый элемент схемы (системы) принимает одно из двух логических значений, а именно исправен ( $a_i = 1$ ) или не исправен ( $a_i = 0$ ). Таким образом

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{если значение розыгрыша} \geq P_{iH}; \\ 1, & \text{если значение розыгрыша} < P_{iH}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $P_{iH}$  – нормативная вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

Любой  $i$ -ый элемент системы может принадлежать нескольким  $j$ -ым путям и занимать в них одно  $l$ -ое место. Тогда логическое состояние  $j$ -ого пути определяется как

$$T_j = \bigwedge_{l=1}^{K_j} a_{j,l}, \quad (5)$$

где  $K_j$  – количество элементов в  $j$ -ом пути;  $a_{j,l}$  – логическое состояние  $l$ -го элемента в  $j$ -ом пути.

Формула (5) представляет собой перемножение логических состояний элементов, входящих в путь, и означает, что  $j$ -ый путь исправен только тогда, когда работоспособны все элементы принадлежащие пути.

Логическое состояние всей системы  $R$  будет представлять собой сумму логических состояний минимальных путей полученных в (5)

$$R = \bigvee_{j=1}^M T_j, \quad (6)$$

где  $M$  – максимальное число минимальных путей для выбранной схемы;  $T_j$  – логическое состояние  $j$ -го минимального пути.

Это означает, что если исправен хотя бы один путь, то работоспособна система в целом.

Полученные в (6) для каждого розыгрыша результаты, позволяют определить вероятность безотказной работы системы

$$P = \frac{\sum_{s=1}^D R_s}{D}, \quad (7)$$

где  $D$  – число произведенных розыгрышей методом Монте-Карло;  $s$  – номер розыгрыша.

На основе выше изложенных методик была построена математическая модель определения показателей надежности сложных электрических систем.

По этой модели автором разработан программный продукт «Расчет показателей надежности различных схем подстанций» моделирования с использованием метода Монте-Карло, новизна которого подтверждена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009612452 от 15 мая 2009г.

**В четвертой главе** по изложенным методикам и разработанной программе выполнены расчеты показателей надежности существующих и предложенных в диссертации схемных решений РУ питающего напряжения. На основе этих расчетов произведен анализ полученных данных и осуществлено технико-экономическое сравнение всех выше перечисленных схем.

Технико-экономическое сравнение сооружения различных вариантов РУ тяговых подстанции проведено на основе методических рекомендаций по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте. Так как варианты РУ тяговых подстанций отличаются друг от друга только размерами капитальных затрат и эксплуатационными расходами, то наиболее эффективное решение будет отвечать минимуму приведенных затрат  $Z_{пр}$ .

При расчете капитальных затрат учитывалась стоимость основного силового оборудования. Эксплуатационные расходы учитывали стоимость обслуживания и ремонта силового оборудования, а также ущерб, вызванный недоотпуском электрической энергии. Для оценки ущерба в денежном эквиваленте необходимо определить объем недоотпущенной электроэнергии.

Ожидаемое количество электроэнергии  $W$ , недоотпущенное потребителям за период времени, определяется как суммарный ожидаемый недоотпуск электроэнергии всем  $N$  потребителям, присоединенным к данной системе электропитания, то есть

$$W = \sum_{i=1}^N W_i. \quad (8)$$

Ожидаемый недоотпуск  $i$ -му потребителю соответствует произведению средней величины нагрузки  $P_i$  на эквивалентную продолжительность простоя  $\Theta_{\exists}$  за рассматриваемый период времени

$$W_i = \overline{P}_i \Theta_{\exists i}. \quad (9)$$

Эквивалентная продолжительность простоя  $i$ -го потребителя

$$\Theta_{\exists i} = \lambda_i T_{Vi} + \xi v_i T_{Oi}, \quad (10)$$



где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го потребителя, год<sup>-1</sup>;  $T_{Vi}$  – среднее время восстановления  $i$ -го потребителя, год;  $v_i$  – интенсивность преднамеренных отключений  $i$ -го потребителя, год<sup>-1</sup>;  $T_{Oi}$  – среднее время обслуживания  $i$ -го потребителя, год;  $\zeta$  – коэффициент, отражающий меньшую тяжесть последствий от преднамеренных отключений по сравнению с внезапными отказами. В практических расчетах принимают  $\zeta=0,33$ .

Результаты определения приведенных затрат рассматриваемых схемных решений представлены в таблице 2.

Все расчеты выполнены по данным полученным в Службе электрификации и электроснабжения Свердловской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Таблица 2 – Приведенные затраты рассматриваемых схемных решений РУ питающего напряжения

Наименование схемных решений	Вероятность отказа, $Q_c$	Приведенные затраты, тыс. рублей
<b>Схемы РУ питающего напряжения отпаечных подстанций</b>		
Типовая схема РУ на ОСО	$\frac{0,0218}{0,1673}$	12 450 000
РУ без перемычки на ОСО (рисунок 2, а)	0,0102	9 000 000
РУ с перемычкой на упрощенных ИСО (рисунок 1)	0,0109	18 900 000
РУ без перемычки на ИСО (рисунок 2, б)	0,0039	16 200 000
<b>Схемы РУ питающего напряжения транзитных подстанций</b>		
Типовая схема РУ с ремонтной перемычкой со стороны питающей линии на ОСО	$\frac{0,0233}{0,1166}$	16 800 000
Типовая схема РУ с ремонтной перемычкой со стороны понижающих трансформаторов на ОСО	$\frac{0,0266}{0,1044}$	18 000 000
РУ с выключателем в перемычке на ОСО (рисунок 3)	0,0165	15 000 000
РУ без выключателя в перемычке на ОСО (рисунок 4)	0,0205	13 950 000
РУ с выключателем в перемычке на упрощенных ИСО с элегазовым выключателем (рисунок 5, а)	0,0057	21 210 000
РУ без выключателя в перемычке на упрощенных ИСО с элегазовым выключателем (рисунок 5, б)	0,0117	20 250 000
<b>Схемы РУ питающего напряжения опорных подстанций</b>		
Типовая схема РУ с обходной системой шин на ОСО	$\frac{0,0420}{0,2165}$	29 650 000
РУ без обходной системы шин на ОСО	0,0339	22 350 000
РУ без обходной системы шин на упрощенных ИСО (рисунок 6)	0,0075	42 000 000

Примечание: в числителе приведены значения при выполнении схемы на современном оборудовании, а в знаменателе – на устаревшем.

Данные приведенные в таблице 2 справедливы для вновь проектируемых и сооружаемых подстанций. Однако, из-за сильного износа основных фондов ОАО «РЖД», чаще всего перед Дистанцией электроснабжения ставится задача модернизации или замены определенного типа оборудования.

Замена того или иного типа электротехнического оборудования в РУ питающего напряжения типовых схем непременно приведет к изменению надеж-

ности и требует определенных капитальных затрат, которые, в первом приближении, можно считать равными стоимости основных коммутационных аппаратов. Для оценки вносимого эффекта, с учетом стоимости оборудования, введем величину удельной эффективности замены оборудования  $\psi$ , которую будем определять по следующей формуле

$$\psi = \frac{\Delta P}{C}, \quad (11)$$

где  $C$  – стоимость оборудования которое подлежит замене, млн. руб;  $\Delta P$  – изменение вероятности безотказной работы при замене определенного типа оборудования в %, определяемое по формуле

$$\Delta P = \frac{P_{\text{обор}} - P_{\text{тип}}}{P_{\text{тип}}} \times 100\%, \quad (12)$$

где  $P_{\text{тип}}$  – надежность электроснабжения потребителей типовой схемы для рассматриваемой подстанции;  $P_{\text{обор}}$  – надежность электроснабжения потребителей типовой схемы для рассматриваемой подстанции после замены определенного типа оборудования.

Физический смысл параметра  $\psi$  — на сколько процентов увеличится надежность работы РУ при капитальных затратах в один млн. руб. Очевидно, что чем выше  $\psi$ , тем эффективнее замена данного оборудования.

Наиболее важными элементами РУ можно считать коммутационные аппараты (силовой выключатель, разъединитель) и средства защиты от перенапряжений (разрядники, ограничители перенапряжений). Поэтому расчет надежности будем производить для четырех вариантов:

- 1) установка только ограничителей перенапряжений взамен разрядников;
- 2) установка только современных разъединителей взамен устаревших;
- 3) установка только элегазовых выключателей взамен масляных;
- 4) одновременная замена всех выше перечисленных аппаратов.

Для типовых схем РУ подстанций, после расчета по формулам (11) – (12), получаем гистограммы, приведенные на рисунке 9.

Анализ рисунка 9 показывает, что наибольший относительный эффект наблюдается от замены разрядников ограничителями перенапряжений, из-за низкой стоимости последних. Однако, надежность работы РУ при этом увеличивается незначительно. Поэтому внедрение ограничителей перенапряжений следует применять при низком уровне финансирования. Если же уровень финансирования достаточно высок, то в первую очередь необходимо осуществить замену масляных выключателей элегазовыми, что приведет к существенному повышению надежности работы РУ питающего напряжения подстанций. Наименьший эффект, как относительный, так и абсолютный, наблюдается при внедрении на подстанции новых разъединителей. Поэтому замену старых разъединителей при модернизации РУ можно рекомендовать в последнюю очередь.

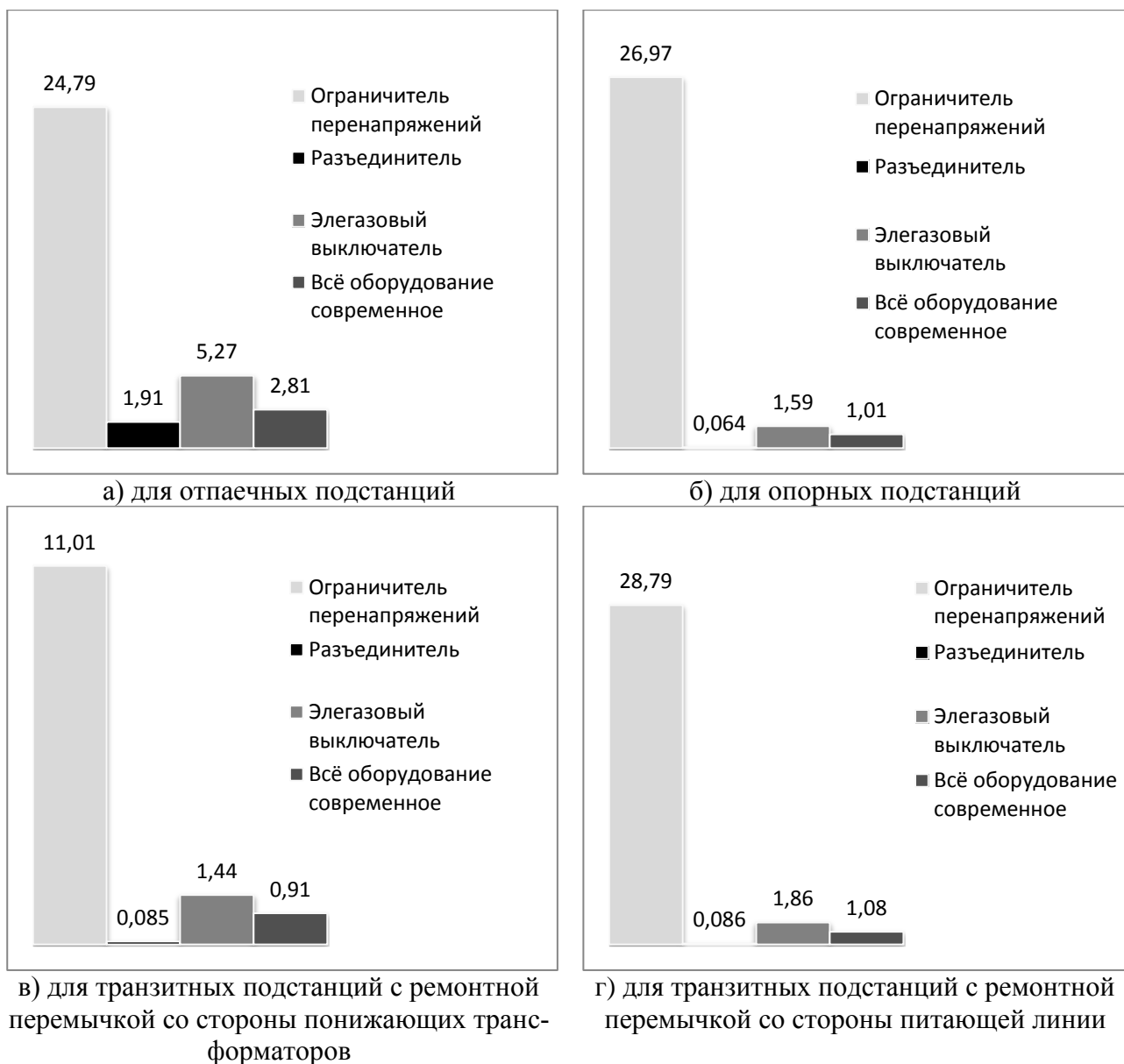


Рисунок 9 – Удельная эффективность замены оборудования для типовых схем подстанций

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационной работы были достигнуты следующие результаты.

1. Выполнен анализ существующих схемных решений распределительных устройств питающего напряжения тяговых и трансформаторных подстанций, рассмотрены различные методики определения показателей надежности, выявлены их преимущества и недостатки.

2. Предложены новые схемные решения распределительных устройств питающего напряжения для всех типов тяговых и трансформаторных подстанций: отпаечной (на ответвлениях), транзитной (проходной) и опорной (узло-

вой). При разработке схем учитывалось значительное увеличение в последние годы надежности силового оборудования.

3. В распределительных устройствах питающего напряжения отпаечных подстанций предложено отказаться от переемычки. Исключение переемычки позволит в схеме на отдельно стоящем оборудовании значительно снизить, с восьми до двух, количество разъединителей, а в схеме на интегральном силовом оборудовании применить более простые ячейки. Схема распределительных устройств питающего напряжения отпаечных подстанций без переемычки на интегральном силовом оборудовании была внедрена при сооружении тяговых подстанций во время электрификации 53-х километрового участка Свердловской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

4. Для распределительных устройств питающего напряжения транзитных подстанций предложена группа схем без выключателя в перемычке. Применение таких схем распределительных устройств питающего напряжения позволит сооружать промежуточные подстанции, которые по количеству и составу оборудования будут аналогичны отпаечным, и вместе с тем смогут осуществлять транзит электроэнергии, секционируя при этом линию электропередач. По сравнению с типовой схемой, число разъединителей снизится на четыре, а выключателей на один. Новизна группы схем подтверждена патентом на изобретение РФ № 2403662.

5. Для опорных подстанций предложены схемы распределительных устройств питающего напряжения без обходной системы шин. Отказ от обходной шины позволил уменьшить число выключателей на один, а разъединителей от восьми (при числе вводов равным трем) и до одиннадцати (при числе вводов равным шести), по сравнению с типовой схемой.

6. Разработаны математические модели расчета надежности сложных электрических систем: в одной модели, аналитической, определение надежности системы в целом производится методом включения–исключения, в другой, статистической, методом Монте-Карло. По статистической модели был составлен алгоритм и разработана программа расчета показателей надежности, которая закреплена авторским свидетельством о государственной регистрации №2009612452.

7. Сравнение параметров надежности предложенных схем распределительных устройств питающего напряжения одностипных подстанций показало, что их показатели надежности не ниже показателей типовых схем. Так при реализации предложенных схем на современном отдельно стоящем оборудовании, по сравнению с типовыми схемами, вероятность отказа уменьшается: для отпаечных подстанций в 2,13 раза, для транзитных подстанций в 1,75 раза и для опорных в 1,23 раза. Это подтверждает сделанное ранее в данной диссертации предположение о том, что некоторое упрощение сложных электрических схем, при повышении надежности их отдельных элементов, не приводит к снижению, а в большинстве случаев даже увеличивает показатели надежности всей системы в целом. Реализация предложенных схем на интегральном силовом оборудовании уменьшает вероятность отказа: для отпаечных подстанций в 2,61 раза, для транзитных подстанций в 1,3 раза и для опорных в 4,5 раза.

8. Техничко-экономическое сравнение показало, что при реализации предложенных схем на современном отдельно стоящем оборудовании, по сравнению с типовыми схемами, приведенные затраты уменьшаются: для отпаечных подстанций на 28%, для транзитных подстанций на 18% и для опорных на 25%. Реализация предложенных схем на интегральном силовом оборудовании увеличит приведенные затраты: для отпаечных подстанций на 44%, для транзитных подстанций на 31% и для опорных на 46%.

9. По результатам диссертационной работы можно сделать общий вывод, что на сегодняшний день для большинства распределительных устройств питающего напряжения наилучшими технико-экономическими показателями обладают предложенные в диссертации схемные решения на современном отдельно стоящем оборудовании: схема без перемычки для отпаечных подстанций, схема без выключателя в перемычке для транзитных и без обходной системы шин для опорных подстанций. При организации производства в РФ упрощенных ячеек интегрального силового оборудования, когда их стоимость значительно снизится, следует сооружать распределительные устройства по предложенным в диссертации схемам на базе этих ячеек.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

**В изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, свидетельства и патенты:**

1. Шумаков К. Г. Сравнение схемных решений распределительных устройств питающего напряжения транзитных подстанций на отдельно стоящем оборудовании [Текст] / А. Г. Галкин, В. А. Вербицкий, А. Н. Штин, К. Г. Шумаков // Транспорт Урала. – 2009. – № 3. – С. 108-111.

2. Шумаков К. Г. Методика определения показателей надежности сложных электрических систем [Текст] / А. Г. Галкин, С. С. Титов, А. Н. Штин, К. Г. Шумаков // Транспорт Урала. – 2010. – № 2. – С. 88 – 90.

3. Шумаков К. Г. Надежность схемы распределительного устройства питающего напряжения подстанции на ответвлениях без перемычки [Текст] / А. Г. Галкин, В. А. Вербицкий, А. Н. Штин, К. Г. Шумаков // Транспорт Урала. – 2010. – № 4. – С. 52-55.

4. Свид. №2009612452 Расчет показателей надежности различных схем подстанции / Шумаков К. Г. (Россия). – № 2009611205; Заявлено 23.03.2009 г. Зарегистрирован в Гос. реестре программ для ЭВМ 15 мая 2009 г.

5. Патент РФ №2403662, МПК<sup>8</sup> H02J 3/04, Устройство для питания и распределения электрической энергии на промежуточных тяговых подстанциях. Шумаков К. Г., Ефимов А. В., Вербицкий В. А., Штин А. Н. Опубл. 10.11.2010 Бюл. № 31

**В других изданиях:**

6. Шумаков К. Г. Применение элегазовых ячеек PASS в открытом распределительном устройстве питающего напряжения отпаечных тяговых подстанций [Текст] / Б. А. Аржанников, В. А. Вербицкий, А. С. Низов, А. Н. Штин // Совер-

шенствование схем устройств электроснабжения транспорта и проектирование их конструкций: Сб. науч. тр. / Под ред. А. Г. Галкина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения, 2005. – Вып. 48 (131). – С. 5-14.

7. Шумаков К. Г. Применение элегазовых ячеек ПАСС в ОРУ питающего напряжения промежуточных тяговых подстанций [Текст] / К. Г. Шумаков, В. А. Вербицкий, А. Г. Галкин, А. Н. Штин // Наука, инновации и образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России: Материалы международной научно-технической конференции / Под общ. ред. В. М. Сай. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения, 2006. – С. 118-119.

8. Шумаков К. Г. Применение современных аппаратов в распределительных устройствах питающего напряжения транзитных подстанций [Текст] / А. Г. Галкин, А. Н. Штин // Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте: Материалы Четвертого Международного симпозиума «Элтранс-2007», 23-26 октября 2007 года / Под ред. В. В. Сапожникова, А. Т. Буркова. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2009. – С. 494-502.

9. Шумаков К. Г. Схемные решения распределительных устройств питающего напряжения опорных подстанций на современном оборудовании [Текст] // Разработка и совершенствование электрооборудования для систем тягового электроснабжения железных дорог: 70-летию со дня рождения Юрия Михайловича Бея посвящается / Под ред. А. В. Ефимова, Ю. П. Неугодникова. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС; Вып. 70 (153), 2009. – С. 110-116.

10. Шумаков К. Г. Математическая модель тяговой подстанции [Текст] // Инструменты развития образовательных технологий в области энергосбережения: Материалы 4-й регион. науч.-практ. конф. 27 апреля 2009 г. / Под. ред. С. В. Федорова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2009. – С. 112-116.

11. Шумаков К. Г. Определение показателей надежности схем распределительных устройств тяговых подстанций методом Монте-Карло [Текст] // Инструменты развития образовательных технологий в области энергосбережения: Материалы 4-й регион. науч.-практ. конф. 27 апреля 2009 г. / Под. ред. С. В. Федорова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2009. – С. 117-121.

12. Шумаков К. Г. Сравнение схемных решений на ячейках ПАСС М0 транзитной подстанции [Текст] / К. Г. Шумаков, А. Н. Штин // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура : материалы научн.-техн. конф., посв. 55-летию УрГУПС : в 2 т. / Уральский государственный университет путей сообщения. — Екатеринбург, 2011. — Вып. 97(180), т. 1. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). — С. 346-353

ШУМАКОВ КОНСТАНТИН ГЕННАДЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ  
ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

---

Подписано к печати 06.03.2012 г.

Формат бумаги 60×84 1/16

Объем 1,5 п.л.

Тираж 100 экз.

Заказ 54

---

Издательство УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66