

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье приведены результаты исследований по повышению эффективности функционирования электротехнических комплексов резервирования мощности в системах электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока за счет совершенствования технологических режимов тяговых подстанций. Представлены научно обоснованные технические решения аппаратной части, управляющий алгоритм системы резервирования мощности для тяговых подстанций с двумя преобразовательными агрегатами и методика выбора мест установки автоматических систем резервирования мощности для повышения эффективности функционирования системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств. Практическая апробация разработанных технических и технологических решений показала эффективность их применения в условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** электротехнический комплекс, система резервирования мощности, преобразовательный агрегат, тяговая подстанция, управляющий алгоритм.

**Введение.** Долгосрочная программа развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации, энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2030 года предусматривают дальнейшее увеличение объемов железнодорожных грузоперевозок [1]. Одним из путей реализации этой задачи является повышение весовых норм грузовых тяжеловесных поездов до 7,2–14,4 тыс. тонн [2]. При этом на участках дорог, выполняющих перевозочный процесс посредством электрической тяги, система электроснабжения железнодорожных транспортных средств может работать в предельных режимах, близких к режимам перегрузок. Это может вызывать падение напряжения в контактной сети ниже предельного уровня, что может повлечь за собой ухудшение тяговых свойств локомотивов, что в итоге приведет к снижению провозной способности участка железной дороги.

Для передачи мощности, требуемой для осуществления заданной перевозочной работы, необходимо поддерживать оптимальные режимы работы всех компонентов системы тягового электроснабжения, осуществляя необходимые изменения конфигурации и режимов работы оборудования в реальном времени в соответствии с текущей поездной обстановкой [3]. Применительно к тяговым подстанциям (ТП) техническая реализация такого подхода может заключаться как в установке нового силового оборудования с системами для его управления, так и во внедрении дополнительных систем управления, взаимодействующих с имеющимся силовым оборудо-

ванием и осуществляющих эффективное управление режимами его работы. При этом использование второго подхода зачастую является более простым и выгодным в экономическом плане.

В настоящее время в ОАО «РЖД» постоянно вводятся в строй новые тяговые подстанции, оснащенные современными управляющими системами. При этом по всей сети дорог продолжают эксплуатироваться старые ТП, на которых подобные системы отсутствуют. Поэтому разработка современных методов и средств для автоматического управления режимами работы тяговых подстанций для обеспечения электроэнергией перевозочной работы участков железной дороги является актуальной задачей.

**Постановка задачи.** Среди множества подходов повышения эффективности ТП посредством управления режимами их работы можно выделить основные:

- внедрение систем автоматизированного мониторинга и учета электроэнергии (АСМУЭ) [4];
- внедрение блоков автоматического регулирования выходного напряжения тяговых подстанций (БАРН) [5];
- применение накопителей электроэнергии на тяговых подстанциях [6];
- внедрение систем автоматического резервирования выходной мощности тяговых подстанций [7].

Первые три требуют для своей реализации установки на тяговой подстанции дополнительного силового оборудования, что приведет к сравнительно большому капитальным затратам. Четвертый подход

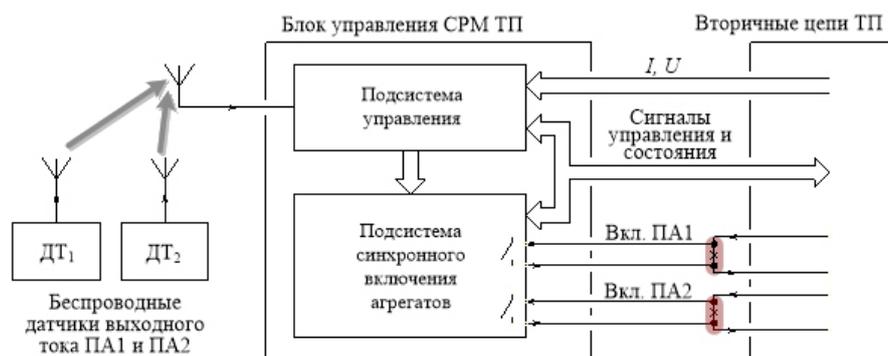


Рис. 1. Структурная схема разработанной системы резервирования мощности тяговой подстанции

может быть осуществлен установкой только дополнительной системы управления, которая подключается к штатным цепям тяговой подстанции для управления имеющимся силовым оборудованием, что в ряде случаев может быть намного проще и дешевле.

Резервирование выходной мощности тяговых подстанций состоит в том, что при возрастании ее выходного тока к параллельно работающему преобразовательному агрегату (ПА) подключается еще один, резервный. Это снижает выходное сопротивление подстанции, благодаря чему в нагрузку может быть отдана большая мощность. Если в дальнейшем выходной ток ТП уменьшится ниже заданного порога, параллельная работа двух агрегатов перестает быть необходимой и даже становится вредной, поскольку приводит к высоким потерям холостого хода в преобразовательных трансформаторах. В этом случае для восстановления эффективного режима работы резервный ПА отключается и в работе остается только основной.

В настоящее время на ряде тяговых подстанций ОАО «РЖД» применяются системы резервирования мощности, но большинство из них выполнены на основе устаревшей релейной логики, не способной реализовать современные управляющие алгоритмы и не позволяющей использовать весь потенциал описываемого способа.

Таким образом, для создания современной системы резервирования выходной мощности необходимо выполнить проектирование аппаратной части и создать необходимое для ее работы программное обеспечение.

**Теория.** Основными недостатками систем резервирования мощности, применяемых на большей части тяговых подстанций ОАО «РЖД», являются следующие:

- вместо прямого измерения постоянного тока на выходе ПА, производится измерение переменного тока на входе преобразовательного агрегата, после чего выполняется пересчет выходного тока через входной, что значительно снижает точность измерений выходного тока ПА;

- аппаратная часть этих систем выполнена на основе компонентов релейной логики и схем временных задержек, что принципиально не позволяет использовать современные алгоритмы эффективного управления;

- программная часть использует примитивные управляющие алгоритмы без математических расчетов, что не позволяет реализовать максимальную эффективность от резервирования мощности.

Для устранения приведенных недостатков был предложен усовершенствованный способ резервирования выходной мощности железнодорожных тяговых подстанций постоянного тока [8], использующий прямые измерения выходного тока каждого преобразовательного агрегата, отказ от релейной логики в пользу современного микроконтроллерного вычислительного устройства с применением энергоэффективного управляющего алгоритма на основе специальных формул и выражений.

Для физической реализации усовершенствованного способа, приведенного выше, разработана аппаратная часть системы резервирования мощности для тяговых подстанций, оснащенных двумя преобразовательными агрегатами [9], структурная схема которой представлена на рис. 1.

Блок управления системы резервирования мощности тяговой подстанции (блок управления СРМ ТП) состоит из подсистемы управления (ПУ) и подсистемы синхронного включения агрегатов (ПСВА).

Подсистема управления контролирует текущий режим работы оборудования тяговой подстанции, анализирует управляющие сигналы ее вторичных цепей, измеряет токи и напряжения преобразовательных агрегатов и, в соответствии с управляющим алгоритмом, формирует сигналы управления высоковольтными выключателями ПА. При этом сигналы входного напряжения агрегатов могут быть получены от штатных трансформаторов напряжения 10 (6) кВ ТП, а сигналы токов поступают либо со штатных трансформаторов тока преобразовательных трансформаторов, либо от двух беспроводных датчиков тока  $ДТ_1$  и  $ДТ_2$ , смонтированных в высоковольтных ячейках выпрямительных преобразователей и передающих информацию посредством радиосвязи. Использование  $ДТ_1$  и  $ДТ_2$  позволяет измерять выходной постоянный ток каждого ПА.

Подсистема синхронного включения агрегатов необходима для уменьшения бросков токов намагничивания преобразовательных трансформаторов при их подключении к сети 10 (6) кВ, которые могут приводить к значительным просадкам напряжения и, как следствие, вызывать сбои в работе подключенного оборудования [10]. Используя сигналы управления и состояния вторичных цепей тяговой подстанции, ПСВА формирует синхронизированные во времени сигналы управления соленоидными высоковольтными выключателями, что обеспечивает коммутацию первичных обмоток преобразовательных трансформаторов в требуемые моменты времени относительно их входного напряжения, снижая

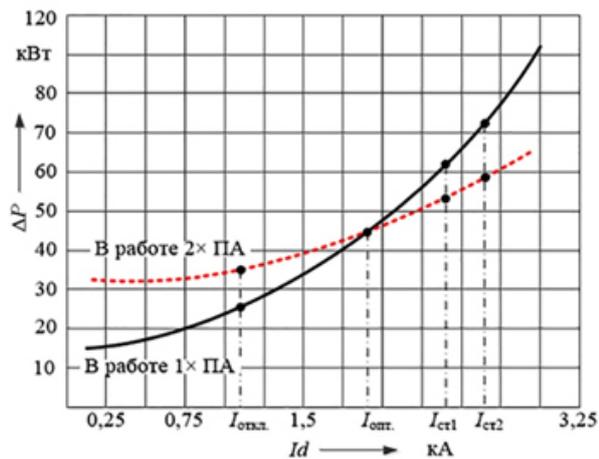


Рис. 2. Кривые потерь в преобразовательных агрегатах для тяговой подстанции с двумя агрегатами

броски их входных токов до приемлемого уровня [11].

Физическая реализация аппаратной части может быть полностью выполнена с использованием современной элементной базы за исключением датчиков тока  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$ , питание которых должно осуществляться от постоянного напряжения тяговой сети 3,3 кВ. При построении источников питания для этих датчиков следует применять специальные схемотехнические решения, одним из вариантов которых могут быть источники на основе последовательных цепочек преобразователей напряжения [12, 13].

На рис. 2 приведен типовой график зависимости потерь электрической энергии в преобразовательных агрегатах от выходного тока для тяговой подстанции постоянного тока с двумя преобразовательными агрегатами. Работа одного ПА эффективна только в режиме малых выходных токов, притом что в режиме больших выходных токов оптимальна параллельная работа двух ПА. Поскольку кривые пересекаются, существует точка с абсциссой  $I_{омт'}$  в которой оба режима обладают одинаковой эффективностью. Отсюда очевиден простой и эффективный алгоритм управления: необходимо использовать один преобразовательный агрегат в случае  $I_d < I_{омт'}$ , если же возникает ситуация, при которой  $I_d > I_{омт'}$  следует подключить второй ПА. Однако практическое применение такого алгоритма невозможно из-за конечного ресурса высоковольтных выключателей, поскольку этот алгоритм не ограничивает количество их суточных коммутаций. Если система резервирования мощности будет часто подключать и отключать резервный преобразовательный агрегат, то высоковольтные выключатели быстро выйдут из строя, после чего потребуются их замена или ремонт.

Эта ситуация послужила причиной создания документа ОАО «РЖД» СТО РЖД 07.021.2-2015, согласно которому число суточных коммутаций в режиме резервирования выходной мощности не может быть более восьми.

Таким образом, управляющий алгоритм системы резервирования мощности должен обеспечивать баланс между двумя взаимоисключающими задачами: система должна минимизировать задержки подключения резервного преобразовательного агрегата для повышения эффективности работы и при этом

не допускать более восьми подключений — отключений резервного агрегата в сутки.

Одним из вариантов математических выражений для вычисления задержек на включение ( $T_{вкл}$ ) и отключение ( $T_{откл}$ ) резервных ПА для современного управляющего алгоритма могут быть следующие формулы:

$$T_{вкл} = t_2 \left( \frac{I_n - I_{кр}}{I - I_{кр}} \right)^N; \quad (1)$$

$$T_{откл} = t_2 \left( \frac{I_{кр}}{I_{кр} - I} \right)^N, \quad (2)$$

где  $I_n$  — номинальный выходного тока ПА по его паспорту;  $t_2$  — время подключения резервного преобразовательного агрегата при превышении выходным током значения  $I_n$  основного ПА;  $I_{кр}$  — значение тока, при пересечении которого включается отсчет времени;  $N$  — подбираемое экспериментально целое четное число;  $I$  — текущее значение выходного тока ТП.

Алгоритм, реализующий эти выражения [14], приведен на рис. 3, где переменная  $T$  осуществляет отсчет времени, а переменная  $State$  отражает количество преобразовательных агрегатов, находящихся в работе.

В алгоритме используются настраиваемые параметры  $I_{кр}$  и  $N$ , которые необходимо определять для заданной тяговой подстанции путем моделирования ее работы, используя данные о ее выходном токе за сутки, собранные при помощи специального регистратора [15].

В разработанный алгоритм введена функция постоянного самообучения в процессе работы для коррекции настраиваемых параметров в соответствии с технологическими режимами тяговой подстанции. Количество параметров сокращено до одного, а число  $N$  не меняется в процессе работы. Ввиду того, что управляющий контроллер разработанной аппаратной части системы резервирования мощности не обладает достаточным объемом памяти для сохранения суточного массива значений выходного тока тяговой подстанции, предложено обеспечить режим самообучения путем одновременной работы нескольких одинаковых вычислительных процессов, различающихся значением параметра  $I_{кр}$ , один из которых (управляющий) будет управлять процессом резервирования мощности и накапливать суммарный показатель эффективности, а остальные (моделирующие) — только накапливать эти показатели. В частности, предлагается использовать пять одинаковых алгоритмов, при этом управляющий должен использовать значение  $I_{кр}$ , а моделирующие — значения  $0,9 \cdot I_{кр}$ ;  $0,95 \cdot I_{кр}$ ;  $1,05 \cdot I_{кр}$ ;  $1,1 \cdot I_{кр}$  соответственно. По истечении периода обучения, который равен одним суткам, анализируются суммарные показатели эффективности каждого из процессов, на основании чего корректируется значение  $I_{кр}$  и все показатели эффективности обнуляются, затем процесс самообучения повторяется.

Таким образом, значение  $I_{кр}$  будет автоматически подстраиваться один раз в сутки в процессе работы, приближаясь к оптимальному значению в соответствии с текущими технологическими режимами ТП.

**Практика.** Практическая апробация предложенной аппаратной части системы резервирования мощности и алгоритма управления была выполнена

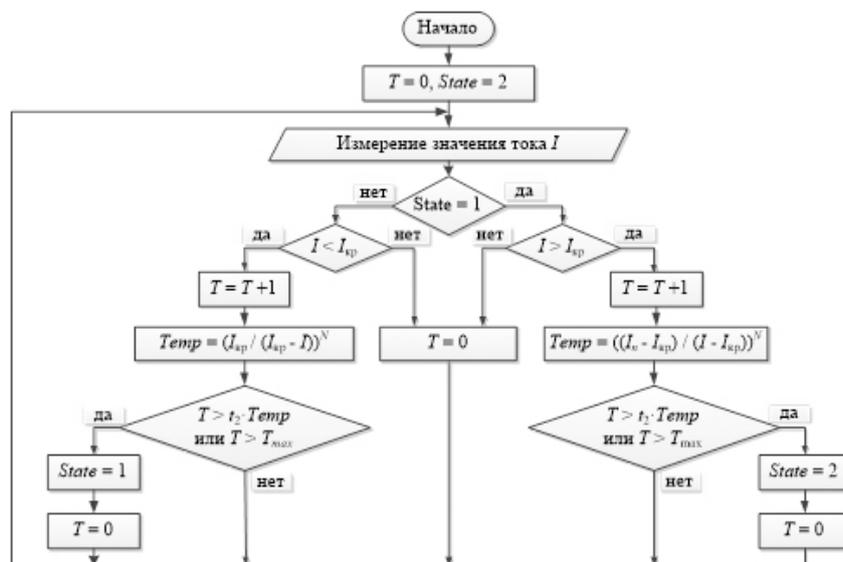


Рис. 3. Управляющий алгоритм на основе математического вычисления задержек

на шести действующих тяговых подстанциях одного из участков Омской дистанции электроснабжения Западно-Сибирской железной дороги. На рис. 4 представлен внешний вид блока управления системы, смонтированный на шкафу автоматики выпрямительного агрегата.

Опытная эксплуатация систем резервирования мощности в составе подстанций подтвердила работоспособность и эффективность разработанных технических и технологических решений. На рис. 5 представлены результаты расчетов по снижению потерь электроэнергии для шести тяговых подстанций рассматриваемого участка по данным за 2020 г., согласно которым общее расчетное снижение составило 570,8 тыс. кВт·ч в год.

**Заключение.** Внедрение современных систем резервирования выходной мощности тяговых подстанций позволяет увеличить эффективность работы системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока и повысить провозную способность участков железных дорог. При этом реализация предложенного усовершенствованного способа резервирования выходной мощности не требует установки дополнительного силового оборудования, что значительно сокращает время и общие затраты на модернизацию существующих тяговых подстанций.



Рис. 4. Внешний вид блока управления системы резервирования мощности на тяговой подстанции

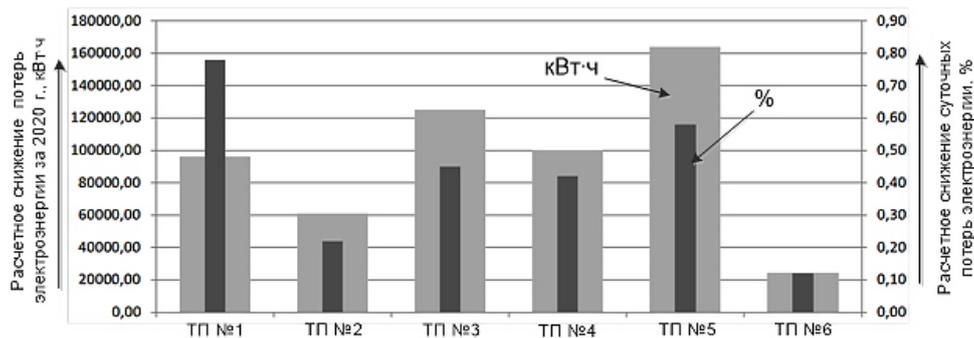


Рис. 5. Графическое представление расчетного снижения потерь электроэнергии для шести тяговых подстанций участка железной дороги

## Библиографический список

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. Москва: ОАО «РЖД», 2016. 76 с.
2. Игин В. Н. Концепция развития энергетической стратегии // Локомотив. 2016. № 5 (713). С. 10–12.
3. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2014 № 512. Москва: ОАО «РЖД», 2015.
4. Черемисин В. Т., Ушаков С. Ю., Каштанов А. Л. Единая автоматизированная система учета электроэнергии на электроподвижном составе (ЕАСУЭ ЭПС) постоянного тока // Известия Транссиба. 2013. № 3 (15). С. 108–114.
5. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: моногр. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2010. 174 с. ISBN 978-5-94614-161-1.
6. Незевак В. Л., Черемисин В. Т. Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока // Бюллетень результатов научных исследований. 2015. № 1 (14). С. 76–83.
7. Каштанов А. Л., Никифоров М. М., Плотников Ю. В. Интеллектуальная система резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф., посвященной Дню российской науки, Омск, 07 февраля 2020 г. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2020. С. 370–375.
8. Плотников Ю. В., Шантаренко С. Г. Повышение эффективности автоматического резервирования мощности в системах электроснабжения транспортных средств постоянного тока // Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика: материалы междунар. науч.-практ. конф., Омск, 08–09 декабря 2021 г. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2021. С. 448–455. EDN EGALFH.
9. Плотников Ю. В. Аппаратная часть системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Чебоксары, 03 декабря 2021 года. Чебоксары: Изд-во ЧувГУ имени И. Н. Ульянова, 2021. С. 175–181.
10. Тарута П. В., Карабанов М. А. Экспериментальная оценка величины провала напряжения при подключении резервного выпрямительного агрегата // Известия Транссиба. 2010. № 2 (2). С. 76–80.

11. Пат. 108233 U1 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 9/02. Устройство для снижения бросков тока при включении трансформатора / Квацук В. Н., Лапенко Н. М., Карабанов М. А. № 2011108012/07; заявл. 02.03.11; опубл. 10.09.11.

12. Плотников Ю. В. Источник питания приборов мониторинга и учета электроэнергии тяговой сети постоянного тока на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 50–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-50-54.

13. Плотников Ю. В. Методика расчета источника питания приборов мониторинга и учета электроэнергии тяговой сети постоянного тока на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 41–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-41-45.

14. Каштанов А. Л., Плотников Ю. В., Пономарев А. В. Управляющий алгоритм системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 9. С. 512–518. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-9-512-518.

15. Каштанов А. Л., Никифоров М. М., Плотников Ю. В. Моделирование режимов работы интеллектуальной системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. № 5. С. 22–26.

**ШАНТАРЕНКО Сергей Георгиевич**, доктор технических наук, доцент (Россия), проректор по научной работе, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 477507

ResearcherID: B-1719-2016

AuthorID (SCOPUS): 57200089403

Адрес для переписки: ShantarenkoSG@omgups.ru

### Для цитирования

Шантаренко С. Г. Особенности построения современных систем автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 85–89. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-85-89.

Статья поступила в редакцию 14.04.2022 г.

© С. Г. Шантаренко