

## МЕТОДИКА ВЫБОРА МЕСТ УСТАНОВКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В работе представлена методика выбора мест установки систем резервирования мощности тяговых подстанций для снижения потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока. Выполнен анализ основных критериев, оказывающих влияние на эффективность и надежность работы системы тягового электроснабжения постоянного тока. Разработан алгоритм выбора мест установки систем резервирования мощности, позволяющий отобрать тяговые подстанции, обеспечивающие наибольший энергетический эффект при установке систем.

**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, тяговая подстанция постоянного тока, преобразовательный агрегат, потери электроэнергии, энергоэффективность.

**Введение.** Одним из направлений Энергетической стратегии ОАО «РЖД», устанавливающей основные принципы развития энергетики железнодорожного транспорта, является повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения за счет развития инновационных цифровых технологий [1]. В рамках данного направления в 2019 году по инвестиционной программе «Внедрение энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» на шести тяговых подстанциях участка Московка – Называевская Западно-Сибирской железной дороги была внедрена опытная интеллектуальная система автоматического резервирования мощности тяговых подстанций (АВОР), назначением которой является реализация оптимальных режимов работы резервных выпрямительно-преобразовательных агрегатов (ПА), обеспечивающих снижение в них технологических потерь электрической энергии. При этом в системе реализована функция автоматического управления приводами выключателей первичных обмоток преобразовательных трансформаторов тяговой подстанции на основании анализа значений токов трансформаторов тока первичных обмоток преобразовательных трансформаторов в соответствии с интеллектуальным алгоритмом и задаваемыми параметрами [2–4].

**Постановка задачи.** Эффективность системы АВОР на разных подстанциях различна [5] и во многом определяется как режимами работы системы тягового электроснабжения [6], так и параметрами самого участка железной дороги [7]. Решение о целесообразности внедрения любого технического устройства принимается на основе

технично-экономического обоснования, в котором достигаемый эффект сравнивается с понесенными капитальными и эксплуатационными затратами.

Таким образом, разработка методики выбора мест установки систем автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока, позволяющая выбирать тяговые подстанции, обеспечивающие наибольший энергетический эффект от резервирования мощности, является актуальной задачей.

**Теория.** Выбор мест внедрения систем АВОР на этапе предпроектного обследования должен основываться на комплексном анализе различных критериев, которые можно условно разделить на две группы, а именно:

— экономические критерии — характеризующиеся уровнем снижения потерь электрической энергии в ПА, соотношенным к уровню капитальных затрат на протяжении всего жизненного цикла внедряемой системы;

— технические критерии — характеризующиеся уровнем надежности работы как самой системы АВОР, так и надежности работы оборудования системы тягового электроснабжения, в том числе с точки зрения обеспечения перевозочного процесса.

Рассмотрим факторы, на основе которых можно принять решение о целесообразности внедрения на тяговой подстанции интеллектуальной системы автоматического резервирования мощности.

Основным (первоочередным) фактором выбора мест установки АВОР является режим работы ПА тяговой подстанции. Обязательным является условие, что нормальный режим работы тяговой подстанции

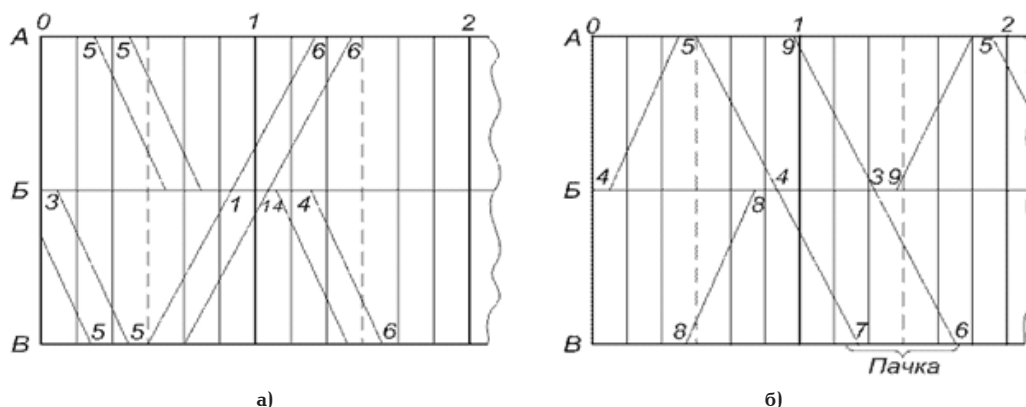


Рис. 1. График движения на однопутном участке: а) пакетный; б) пачечный

предусматривает одновременную (параллельную) работу как минимум двух ПА [8]. При этом в случае снижения тяговой нагрузки либо при полном отсутствии в границах смежных с рассматриваемой тяговой подстанцией межподстанционных зон поездов отключение одного из двух агрегатов приведет к оптимальной загрузке оставшегося в работе преобразовательного трансформатора и тем самым к снижению потерь холостого хода [9].

Вторым фактором, позволяющим на начальном этапе оценить целесообразность внедрения АВОР, является график движения поездов. Наибольший эффект от внедрения системы будет наблюдаться в условиях пакетного (рис. 1а) или частично-пакетного графика движения, то есть когда на перегоне может находиться несколько поездов попутного направления, в сравнении с пачечным (рис. 1б) либо непакетным (обычным) графиком.

Это объясняется тем, что при пакетном графике движения тяговая нагрузка распределена неравномерно в течение суток, обеспечивая наличие пиковых значений, в момент возникновения которых необходимо подключение резервного ПА. В этом случае наблюдается снижение случаев включений/отключений преобразовательных агрегатов, что, в свою очередь, снижает возможный износ высоковольтных выключателей тяговых подстанций и повышает надежность работы самой системы АВОР.

Третий фактор — расход электрической энергии на тягу поездов по тяговой подстанции. Как уже было отмечено, эффективность системы АВОР характеризуется уровнем снижения потерь электрической энергии, достигаемого за счет выбора оптимального режима совместной работы ПА. В случае снижения значения тягового тока подстанции ниже некоторого расчетного значения ( $I_{\text{опт}}$ ), зависящего от параметров преобразовательных трансформаторов, параллельная работа ПА становится неэффективной, так как в этом случае возрастают потери холостого хода трансформаторов (рис. 2).

Такие условия наиболее сильно проявляют себя при пакетном или частично-пакетном графике движения.

При анализе данного критерия расход электроэнергии необходимо сопоставлять с параметрами преобразовательного трансформатора, а точнее, с его номинальной мощностью.

Четвертым основным фактором, анализ которого возможен уже только на этапе предпроектного обследования самой тяговой подстанции, является оценочное значение возможного количества переключений системы АВОР. В соответствии с СТО

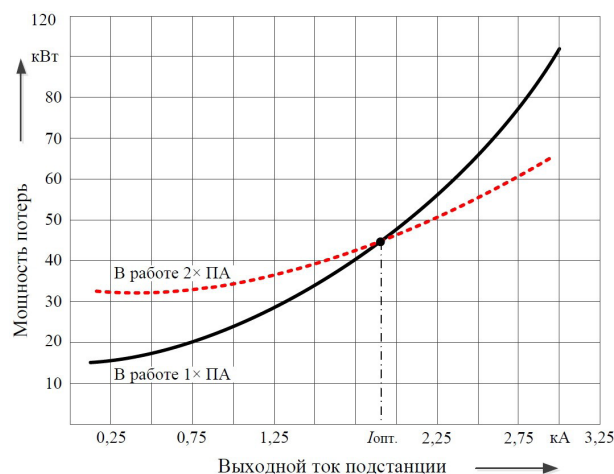


Рис. 2. График зависимости потерь мощности при работе одного и двух преобразовательных агрегатов

РЖД 07.021.2-2015 [10] число переключений системы не должно превышать шести — восьми раз в сутки. При этом следует понимать, что количество переключений можно регулировать выбором соответствующих токовых и временных уставок включения и отключения ПА, либо выбором соответствующего алгоритма работы системы АВОР. На участках со сложным профилем пути, когда даже при проследовании одиночного поезда может наблюдаться резкое возрастание тягового тока [11], работа системы может привести как к постоянному переключению трансформаторов, что, в свою очередь, приведет к быстрому износу высоковольтных выключателей, так и вызвать просадку напряжения в контактной сети.

Таким образом, принимая во внимание рассмотренные выше критерии, выбор мест установки АВОР условно можно разделить на два этапа:

— предварительный этап, включающий анализ параметров участка (суточные графики исполненного движения или заданные размеры движения по участку для грузового, пассажирского, пригородного движения, расход электроэнергии по тяговым подстанциям на тягу поездов, характеристики тяговой подстанции, категории и веса поездов);

— этап предпроектного обследования, предусматривающего необходимость инструментального обследования, выбранных на первом этапе тяговых подстанций.

Алгоритм выбора мест установки АВОР в общем виде представлен на рис. 3.

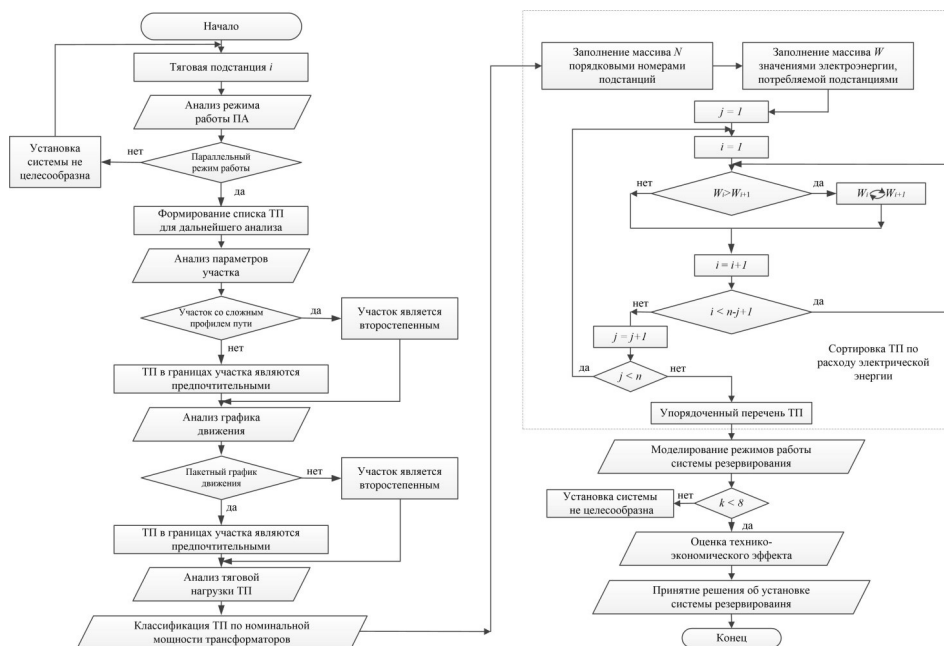


Рис. 3. Алгоритм выбора мест установки АВОР

Основной задачей предварительного этапа является выбор тяговых подстанций с наиболее большим возможным технико-экономическим эффектом в случае установки АВОР.

Первым шагом является выбор только тех тяговых подстанций, на которых при нормальном режиме два (или три) ПА находятся в параллельной работе. В случае раздельного режима работы, то есть когда в работе находится только один ПА, установка АВОР по своей сути является нецелесообразной.

Далее выполняется анализ параметров пути. Основным источником анализируемых данных является автоматизированная система путевого хозяйства АСУ-П. Предпочтительными участками для применения системы АВОР являются те зоны, у которых суммарная длина близко расположенных вредных спусков не превысит соответствующее значение  $I_{вр. min}$ , указанное в табл. 1 [12]. При этом особое внимание уделяется участкам с продольным профилем пути III и IV типов (расчетный подъем от 7 до 12 %) с крутизной затяжных вредных спусков 5,5 % и более [13, 14].

Третьим шагом выполняется анализ суточного графика исполненного движения и заданных размеров движения по участку для грузовых, пассажирских и пригородных поездов. Источником исходных данных является информационная система ГИД «Урал-ВНИИЖТ» [15]. Как уже было отмечено, приоритетными являются участки с пакетным или частично-пакетным графиком движения.

Далее (четвертый шаг) выполняется группировка тяговых подстанций по номинальной мощности преобразовательных трансформаторов с последующим анализом расхода электроэнергии на тягу поездов. Источником данных для анализа является информационно-измерительная система АСКУЭ ТП [16] или отчетная форма по расходу электрической энергии ЭО-8. Исходя из того, что технико-экономический эффект от внедрения АВОР достигается за счет снижения технических потерь холостого хода в преобразовательных трансформаторах, преимущество имеют тяговые подстанции с наи-

Таблица 1

## Параметры вредных спусков

Место расположения вредных спусков	Крутизна вредного спуска, %	Значение $I_{вр. min}$ для поездов, км	
		Вес груженых более 3 000 т	Вес порожних до 1 500 т
В непосредственной близости от места остановки поезда	До 9	от 5,8	от 4,4
	Свыше 9	до 4,3 от 4,4 до 4,0	до 4,0 от 4,1 до 3,9
После затяжного подъема	До 9	от 4,7 до 3,2	от 3,3 до 3,0
	Свыше 9	от 3,3 до 2,9	от 3,0 до 2,9
После не затяжного подъема от 3 до 7 %	До 9	от 4,0 до 2,7	от 2,8 до 2,6
	Свыше 9	от 2,8 до 2,5	от 2,6 до 2,5
После площадки или подъема до 3 % при $v_{нач} \leq v_{доп} = 80$ км/ч	До 9	от 3,3 до 2,3	от 2,4 до 2,2
	Свыше 9	от 2,4 до 2,1	от 2,2 до 2,1
После площадки и малого подъема, если $v_{нач} > v_{доп} = 80$ км/ч	До 9	1,5	1,5
	Свыше 9		

меньшим расходом электрической энергии на тягу поездов.

По итогам выбора наиболее перспективных для внедрения АВОР тяговых подстанций необходимо выполнить оценку технико-экономической эффективности системы. Оценка выполняется на основе данных, полученных по результатам инструментальных измерений тягового тока и моделирования режимов работы тяговой подстанции [3]. Технико-экономическое обоснование целесообразности внедрения АВОР выполняется в соответствии

с общепринятыми подходами при разработке инновационных проектов внедрения ресурсосберегающих технологий [17–20]. При этом методика расчета экономического эффекта основана на разнице экономических показателей до и после внедрения АВОР [5]. Основным показателем эффективности применения системы является снижение технических потерь электрической энергии в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций постоянного тока.

**Заключение.** Представленная методика была апробирована при внедрении шести опытных интеллектуальных систем автоматического резервирования мощности на тяговых подстанциях участка Московка–Называевская Западно-Сибирской железной дороги. Расчеты, выполненные согласно методике показали, что все шесть тяговых подстанций, на которых была запланирована установка, пригодны для работы систем резервирования и обеспечивают положительный энергетический эффект. Расчетное повышение энергетической эффективности участка за 2020 г. составило 0,45 %, что эквивалентно снижению потерь электроэнергии на 570,8 тыс. кВт·ч в год.

#### Библиографический список

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. 76 с.
2. 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, 7 фев. 2020 г. / ОмГУПС. Омск, 2020. С. 370–375. ISBN 978-5-94941-255-8.
3. 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.
4. Каштанов А. Л., Дмитриев А. Д. Методы выбора уставок срабатывания системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока // Известия Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 50–58.
5. Юсупов Р. З. Обоснование эффективности применения адаптивных устройств АВР на НПС // Электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Междунар. (V Всерос.) науч.-техн. конф., 03–04 апр. 2015 г. / УГНТУ. Уфа, 2015. С. 99–118. ISBN 978-5-7831-1251-5.
6. Жуков В. А. Повышение эффективности работы быстродействующего АВР // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2010. № 7. С. 27–30.
7. Каштанов А. Л., Никифоров М. М., Плотников Ю. В. Влияние уставок срабатывания системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока на потери электроэнергии // Известия Транссиба. 2020. № 4 (44). С. 19–28.
8. Астапович Ю. М., Миргородская Е. Е., Митяшин Н. П. Гибкая система управления объединенными по выходу преобразовательными агрегатами // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. Т. 2, № 1 (70). С. 147–150.
9. Евдокимов В. А. Снижение потерь холостого хода в силовых трансформаторах // Инновационные процессы в современной науке: материалы междунар. науч.-практ. конф., 15 апр. 2017 г. Нефтекамск, 2017. С. 87–89.
10. СТО РЖД 07.021.2-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки.

Часть 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения. Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 27.05.2015 № 1351р. Москва: ОАО «РЖД», 2016. 11 с.

11. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Черепанов А. В. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения при движении тяжеловесных поездов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, № 11 (118). С. 133–142. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-133-142.
12. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Перестенко А. Е. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2017. № 2 (66). С. 118–128.
13. Никифорова Н. Б., Мурзин Р. В., Кудрявцев Я. Б. Обобщенные профили железных дорог при тягово-энергетических расчетах // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2011. № 2. С. 17–21.
14. Незевак В. Л., Вильгельм А. С., Шатохин А. П. Сравнительная эффективность вариантов использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного тока // Наука и образование транспорту. 2013. № 1. С. 243–247.
15. Малунова Д. А., Забродин А. В. Система взаимодействия и поддержки баз данных пользователей системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ» // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2019. № 4 (20). С. 5–13.
16. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Определение потерь электроэнергии и адресности электропотребления в системах тягового электроснабжения по данным АСКУЭ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. № 11-12. С. 72–82.
17. Вьонг Б. Х. Оценка технико-экономической и финансовой эффективности проекта // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 4-2. С. 277–278.
18. Овсейчук В. А. Технико-экономическая эффективность работы электрических сетей // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2015. № 2 (15). С. 281–287.
19. Методические рекомендации по определению эффекта от использования внедренных в ОАО «РЖД» ресурсосберегающих технических средств и технологий. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 13.07.2015 г. № 1720р.
20. Методические подходы при оценке эффективности работ плана научно-технического развития ОАО «РЖД». Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 2666/р от 26.12.2016 г.

**КАШТАНОВ Алексей Леонидович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), начальник научной школы «Энергосбережение и энергоэффективность на железнодорожном транспорте».

SPIN-код: 2831-3881

AuthorID (РИНЦ): 649136

Адрес для переписки: al.kashtanov@mail.ru

**ПЛОТНИКОВ Юрий Викторович**, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог».

SPIN-код: 4808-6390

AuthorID (РИНЦ): 929526

Адрес для переписки ra9mjr@mail.ru

#### Для цитирования

Каштанов А. Л., Плотников Ю. В. Методика выбора мест установки систем автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 63–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-63-66.

Статья поступила в редакцию 28.06.2021 г.

© А. Л. Каштанов, Ю. В. Плотников