

ных графиков движения поездов для определения максимальных рабочих токов и, как следствие, правильного выбора оборудования тяговых подстанций.

#### Список литературы

1 **Ананьева, О. С.** Методика расчета переходных процессов при совместной работе системы тягового электроснабжения метрополитена с накопителями электрической энергии / О. С. Ананьева, В. Н. Подольская // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – Гомель, 2017. – № 2 (35). – С. 17–21.

2 Имитационная модель совместной работы систем тягового электроснабжения и электрического подвижного состава / В. С. Могила [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск, 2017. – № 2 (54). – С. 191–196.

3 **Ананьева, О. С.** Модель совместной работы системы тягового электроснабжения и электрического подвижного состава с учетом изменения напряжения / О. С. Ананьева, В. А. Загорцев, В. Н. Подольская // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2018 г.). Т. 1. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. – С. 198–201.

4 **Ананьева, О. С.** Тяговая подстанция постоянного тока с накопителями электрической энергии / О. С. Ананьева, В. А. Загорцев, В. Н. Подольская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 26–27 ноября, 2020 г.) : в 5 ч. Ч. 5 ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – С. 7–8.

УДК 621.311:621.331

## СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

*В. А. ЗАГОРЦЕВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*С. А. ТЕРЛЯКОВИЧ*

*Брестская дистанция электроснабжения, Республика Беларусь*

Системы тягового электроснабжения предназначены для питания электрического подвижного состава (тяговой нагрузки) и нетяговых потребителей. Как известно характер изменения тяговой нагрузки (значения потребляемой и возвращаемой мощности) носит случайный характер, что может приводить к таким режимам работы, при которых будет возникать несимметрия токов и напряжений (по обратной последовательности) тяговых трансформаторов подстанций, влияющая на качество электрической энергии в точках общего присоединения (места подключения тяговых подстанций к системам внешнего энергоснабжения) [1].

Процесс рекуперативного торможения сопровождается возвратом рекуперирующим электровозом электрической энергии в контактную сеть. При этом энергия рекуперации потребляется электровозами, находящимися с ним на одном участке и работающими в тяговом режиме, либо возвращается в питающую энергосистему, либо распределяется по присоединениям, получающим питание с шин тяговых подстанций [2].

В настоящее время в системах тягового электроснабжения доля подвижного состава с возможностью осуществления рекуперативного торможения постоянно увеличивается, а следовательно, энергия рекуперации, которая не была потреблена в границах тяговой сети, поступает к тяговым подстанциям, затем возвращается в систему внешнего электроснабжения и оказывает заметное влияние на качество электрической энергии в точках общего присоединения [3]. Поэтому в исследовании были разработаны и проанализированы возможные методы по утилизации энергии рекуперации в границах тяговой сети, максимально уменьшая ее возврат в систему внешнего электроснабжения. Для этих целей были рассмотрены следующие способы:

- оптимизация графиков движения поездов;
- установка пунктов параллельного соединения;
- изменение схемы питания контактной сети;
- изменение системы тягового электроснабжения.

Разработанная методика оценки эффективности способов повышения качества электрической энергии в точках общего присоединения подразумевает оценку эффективности снижения количества избыточной энергии рекуперации и состоит из следующих этапов:

- выбор расчетного участка электрифицированной железнодорожной линии, размеров движения, масс и типов поездов;

- выполнение тяговых расчетов для расчетного участка с использованием электрического подвижного состава, осуществляющего рекуперацию электрической энергии в тяговую сеть;
- выполнение электрических расчетов для выбранного участка и итоговый анализ процента избыточной энергии рекуперации, а также сопутствующих факторов, влияющих на энергоэффективность применения предложенных способов (потери в тяговой сети, оценка пропускной способности и др.).

При оценке эффективности предложенного мероприятия «оптимизация графиков движения поездов» для расчетных участков моделировались случайные графики движения поездов с последующим анализом процента рекуперации электрической энергии в систему внешнего энергоснабжения. По результатам расчетов было установлено, что график движения в значительной степени влияет на величину возвращаемой энергии в точках общего присоединения и, при наиболее благоприятном распределении поездов, процент возвращаемой энергии может быть снижен на 10–15 %. Дополнительно установлено, что оптимизация графика движения также позволяет уменьшить потери в тяговой сети на 15–20 %, таким образом, данное мероприятие дает весьма значительный положительный эффект.

Пункты параллельного соединения контактной сети предназначены для электрического соединения секций контактной сети главных путей двухпутного участка железнодорожной линии с целью снижения потерь напряжения и электрической энергии. При оценке их влияния на процент возвращаемой электрической энергии в систему внешнего энергоснабжения было установлено, что применение пунктов параллельного соединения не оказывает существенного влияния на возврат энергии рекуперации.

При оценке влияния схемы питания контактной сети на количество возвращаемой энергии в систему внешнего электроснабжения были рассмотрены две схемы одностороннего питания: встречно-консольная и встречно-кольцевая. Как показали расчеты, при встречно-кольцевой схеме питания, когда контактные подвески главных путей на конце участка электрически соединяются, процент возвращаемой энергии в систему внешнего электроснабжения уменьшается на 40 %, а потери в тяговой сети – на 28 %, что объясняется лучшим токораспределением между контактными подвесками соседних путей, по сравнению со встречно-консольной схемой питания, когда контактные подвески главных путей получают питание отдельно. Таким образом, схема питания контактной сети влияет на процент энергии рекуперации, возвращаемой в систему внешнего электроснабжения, и тем самым влияет на качество электроэнергии.

Заключительным пунктом в исследовании стояла задача установить возможное влияние разновидности системы тягового электроснабжения на количество возвращаемой энергии в систему внешнего электроснабжения. Для одинаковых типов и масс поездов, профилей пути и графиков движения были выполнены электрические расчеты для участка с двумя вариантами системы тягового электроснабжения переменного тока:  $1 \times 25$  кВ и  $2 \times 25$  кВ. В результате расчетов оказалось, что процент возвращаемой энергии при системе  $2 \times 25$  кВ на 8 % больше, чем в системе  $1 \times 25$  кВ. Это может быть связано с тем, что в системе тягового электроснабжения  $2 \times 25$  кВ энергия рекуперации от электрического подвижного состава возвращается на тяговые подстанции при более высоком напряжении (50 кВ) в сравнении с системой  $1 \times 25$  кВ, а значит, ее потери при передаче будут меньшими. При этом по результатам расчетов общие потери в тяговой сети в системе  $2 \times 25$  кВ на 35 % меньше, чем в системе  $1 \times 25$  кВ. Важно отметить, что одинаковая тяговая нагрузка в каждой из систем приведет к неодинаковому результату: коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности в системе  $2 \times 25$  кВ будет намного меньше, чем для системы  $1 \times 25$  кВ, поэтому уменьшение количества возвращаемой энергии и ее влияние на качество энергии в токах общего присоединения для системы тягового электроснабжения  $2 \times 25$  кВ будет менее заметно.

Таким образом, в исследовании предложены мероприятия по снижению несимметрии напряжений за счет изменения энергобаланса систем тягового и внешнего электроснабжения при осуществлении рекуперативного торможения электрическим подвижным составом, эксплуатируемым на Белорусской железной дороге, и выполнена оценка влияния предложенных мероприятий на уменьшение потерь энергии в тяговой сети. Наиболее эффективными с точки зрения уменьшения несимметрии напряжений являются оптимизация графика движения поездов и изменение схемы питания контактной сети. Применение предложенных мероприятий позволит улучшить качество электрической энергии в сетях внешнего электроснабжения электрифицированных участков железной дороги, а также уменьшить потери электрической энергии в тяговых сетях.

## Список литературы

1 **Могила, В. С.** Анализ качества напряжения в точках общего присоединения / В. С. Могила, В. А. Загорцев // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VII Междунар. науч.- практ. конф. ; под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 343 с.

2 **Никифоров, М. М.** Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, В. А. Кандаев // Известия Транссиба : сб. науч. ст. / ОмГУПС (ОмИИТ). – 2012. – № 1 (9). – С. 72–78.

3 **ГОСТ 32144–2013.** Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М. : Межгос. совет по стандартизации: Рос. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2014. – 19 с.

УДК 621.08

## АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА 2ТЭ116

*С. Т. КАЛИЕВА, Т. В. ЩЕРБИЦКАЯ, В. В. ИВАНОВ*

*Самарский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация*

Надежность локомотивов является одним из важнейших условий, определяющих ритмичную и устойчивую работу железных дорог. Локомотив представляет собой сложную техническую систему, состоящую из множества элементов и подсистем. В этом случае наиболее объективную информацию о надёжности можно получить на основании обработки статистических данных о неисправностях и отказах, полученных путем наблюдения за эксплуатацией генеральной совокупности.

Генеральной называется совокупность всех мыслимых значений наблюдений, которые могут быть получены при данном комплексе условий.

Однако на практике в большинстве случаев получить сведения обо всех элементах множества, образующего генеральную совокупность, не представляется возможным. В такой ситуации используется случайная выборка, то есть часть генеральной совокупности, состоящая из элементов, отобранных случайным образом. Выборка должна быть репрезентативной. Тогда определяемые по выборке значения показателей, характеризующих то или иное свойство, представляют собой статистические оценки параметров, существующих в генеральной совокупности.

Поэтому при выполнении расчетов необходимо использовать основные положения теории вероятности и математической статистики, то есть оперировать следующими понятиями: случайные события, вероятность события, статистическая вероятность (частота), сложения и умножения вероятностей, несовместимые и независимые события, случайная величина, распределения случайной величины, среднее значение и математическое ожидание случайной величины, дисперсия, среднее квадратическое отклонение, функции распределения, плотность распределения, законы распределения, случайной вероятности и т. п.

Важно также усвоить основные термины и определения теории надежности: работоспособное и исправное состояние, отказ и повреждение, внезапные и постепенные отказы, восстанавливаемые и невосстанавливаемые, ремонтируемые и неремонтируемые изделия, предельное состояние, наработка и продолжительность эксплуатации, ресурс, срок службы, безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость, надежность.

Необходимо также получить основные представления о повышении надежности путем резервирования. Прежде всего имеется в виду структурное резервирование. Необходимо усвоить понятия «основной и резервный элемент», «нагруженный резерв», «кратность резерва», «дублирование», «общее резервирование» и др.

Из множества используемых на практике показателей надежности рассчитывается вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа и интенсивность отказов. Эти показатели обычно рассчитываются для невосстанавливаемых объектов, а для восстанавливаемых – только применительно к периоду эксплуатации до первого отказа. Тем не менее эти показатели достаточно широко используются для оценки безотказности как на стадии проектирования и испытаний объектов, так и при их эксплуатации.

Анализ данных статистической отчетности СЛД и ОАО «РЖД» и результатов проведенных исследований позволяет выделить на тепловозе основные группы оборудования и узлы, относящиеся к наименее надежным: тепловозный дизель, являющийся причиной более 40 % отказов и неплановых ре-