

изменение мощности в регулируемом цилиндре, но и перераспределение нагрузки между цилиндрами. После каждой итерации (а их может быть и 10–20) требуется проведение индицирования, и время, потраченное на индицирование одним датчиком (8 минут для 8-цилиндрового дизеля, умноженные на 10–20 итераций) существенно отличается от нескольких секунд, умноженных на 10–20 итераций, при индицировании всех цилиндров одновременно.



Рисунок 1 – Датчики давления газа ДДГ, установленные на все цилиндры тепловозного дизеля Д49

При проведении регулировки для достижения оптимального варианта приходится последовательно изменять настройки каждого цилиндра несколько раз. Каждое изменение любой настройки регистрируется комплексом, что позволяет точно определять, какие характеристики и на какую величину необходимо менять в каждом цилиндре.

УДК 621.331

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*В. А. ЗАГОРЦЕВ, О. С. АНАНЬЕВА, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Известно, что различные режимы работы электрического подвижного состава, такие как тяга и рекуперативное торможение влияют на параметры работы систем тягового электроснабжения: уровень напряжения в контактной сети при большой загрузке плеч питания тяговых подстанций может значительно отличаться от номинального и влиять на скорость движения поездов и, как следствие, на пропускную способность; величина потерь электрической энергии в тяговой сети, зависит кроме всего прочего от величины токов в ее элементах и длины пути его протекания, при этом применение рекуперации хоть и дает положительный эффект в виде снижения расхода электрической энергии на тягу поездов, тем не менее увеличивает величину потерь энергии в контактной сети за счет протекания токов от рекуперирующего электрического подвижного состава к ее потребителям в границах тяговой сети или в системе внешнего энергоснабжения. Качество электрической энергии в точках общего присоединения тяговых подстанций к системам внешнего энергоснабжения, в частности коэффициент несимметрии токов и напряжений по обратной последовательности при определенной комбинации режимов тяги и рекуперации на плечах питания тяговой подстанции может выходить за предельно допустимые значения, что отрицательно сказывается на остальных потребителях. Поэтому разработка имитационных моделей совместной работы систем тягового электроснабжения и электрического транспорта по-прежнему актуальна, особенно в части применения в границах тяговой сети или на подвижном составе устройств, повышающих их надежность и энергоэффективность.

Одними из таких устройств являются накопители электрической энергии. В настоящее время существует много направлений по изучению их эффективности при установке как в системах тягового электроснабжения, так и на электрическом подвижном составе.

Место размещения накопителей электрической энергии будет влиять на переходные процессы (заряд – разряд), протекающие в электрических сетях [1]. Поэтому при помощи соответствующей имитационной модели станет возможным оценить, как повлияет установка накопителей на надеж-

ность работы систем тягового электроснабжения с учетом выбранных параметров и места размещения накопителей электрической энергии. Для этого необходимо знать, в том числе, специфику работы рельсового транспорта. Например, для метрополитена более рациональным является размещение накопителей электрической энергии непосредственно на тяговых подстанциях, т. к. разгон и торможение поезда осуществляют в основном около них, а по перегону состав движется на выбеге. На железнодорожном транспорте задача размещения накопителей электрической энергии несколько усложняется ввиду того, что из-за большой протяженности участков между подстанциями на режимы движения поездов серьезное влияние оказывает профиль пути, и поэтому более рациональным с точки зрения уровня напряжения в контактной сети может быть размещение накопителей электрической энергии возле участков с крутыми спусками или подъемами. В этом случае требуются дополнительные расчеты по анализу профиля пути и режимов работы электрического подвижного состава на рассматриваемом участке.

Для анализа надежности работы систем тягового электроснабжения с применением накопителей электрической энергии авторами ведется разработка программного обеспечения, позволяющего учитывать установку накопителей в границах тяговой сети, осуществлять выбор рационального места их размещения и оптимальных параметров для заданных режимов движения. В настоящее время разработана имитационная модель системы тягового электроснабжения на постоянном токе для метрополитена [2]. Она позволяет выполнять тяговые расчеты для заданных профилей пути и типов поездов, и по заданному графику производит расчет нагрузок системы тягового электроснабжения с определением токов фидеров питающих и отсасывающих линий, максимальных нагрузочных токов преобразователей, напряжения на шинах тяговых подстанций и на токоприемниках электрического подвижного состава и др.

Следующим этапом после оценки адекватности результатов расчетов, полученных при помощи разработанной модели, станет внедрение возможности установки накопителей электрической энергии в тяговой сети и оценка их эффективности в плане повышения надежности работы тяговых подстанций, а затем и одновременное выполнение тяговых и электрических расчетов для учета изменения напряжения на токоприемниках электрического подвижного состава [3] и, как следствие, повышения точности расчетов.

Авторами предложена полезная модель тяговой подстанции постоянного тока с накопителями электрической энергии [4], эффективность установки которых и планируется оценить в дальнейшем при разработке имитационной модели. Предполагается, что накопители электрической энергии, предварительно заряженные от тяговой сети, будут совместно с тяговыми подстанциями обеспечивать питание электрического подвижного состава, работающего в режимах тяги, тем самым снижая нагрузку на преобразователи тяговых подстанций и выравнивая ее во времени. В результате, зная параметры работы элементов системы электроснабжения, можно будет выбирать соответствующее оборудование, место установки и емкость накопителей электрической энергии, при которых будет обеспечиваться надежное электроснабжение тяговой нагрузки.

В основе имитационной модели работы системы тягового электроснабжения лежат матричные методы расчета электрических цепей, в частности используется модифицированный метод расчета узловых потенциалов матричным способом. Его особенность состоит в разделении матриц проводимостей, инцидентностей и др. на подматрицы, составление которых значительно проще алгоритмизировать и реализовать в программном коде. При этом становится возможным одновременный расчет большого числа тяговых подстанций и электрического подвижного состава на перегонах, что дает большую точность в определении нагрузок элементов системы тягового электроснабжения. Также этот метод позволит, при последующей установке накопителей электрической энергии в границах тяговой сети, относительно просто учесть их при составлении мгновенных схем системы тягового электроснабжения, то есть разрабатываемая модель хорошо масштабируется.

Таким образом, основными целями при разработке данной имитационной модели являются одновременный учет максимального количества влияющих факторов при оценке надежности работы систем тягового электроснабжения; оценка эффективности применения накопителей электрической энергии, а также подбор их параметров и выбор места установки; учет и оценка влияния изменения напряжения на токоприемниках электрического подвижного состава на результаты тяговых и электрических расчетов и, как следствие, на выбор устройств систем тягового электроснабжения; автоматизация расчетов и возможность расчета большого числа случай-

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;