

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*В. А. ЗАГОРЦЕВ, Н. С. ЧУЕШКОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Современный электрический подвижной состав (ЭПС) с преобразователями, построенными на базе силовых IGBT-транзисторов, который предназначен для эксплуатации на электрифицированных участках железных дорог, в качестве регулировочного торможения обычно применяет рекуперативное. Это актуально для ЭПС с асинхронным тяговым приводом, эксплуатируемым на Белорусской железной дороге – грузовых электровозов БКГ1, БКГ2 и пассажирских электропоездов серии ЭП (швейцарской фирмы Stadler).

Как известно, при рекуперативном торможении электрическая энергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, поступает с токоприёмника электрического локомотива в контактную сеть. При этом ее потребителями могут выступать другие локомотивы, работающие в режиме тяги в зоне питания тяговой подстанции и нетяговые потребители, получающие питание от тяговой сети. В случае избытка рекуперированной электроэнергии или при отсутствии потребителей происходит ее поступление в систему внешнего электроснабжения из тяговой сети.

Электрическое (рекуперативное) торможение не является основным видом тормоза на электроподвижном составе, тем не менее его применение дает достаточно весомые преимущества: снижение расхода электрической энергии на тягу поездов, повышение скорости движения поездов по участку (за счет точного регулирования скорости движения на спусках), повышение безопасности движения поездов (торможение электродвигателями не расходует воздух, необходимый для пневматической тормозной системы, и позволяет гарантированно остановить поезд в случае необходимости), снижение износа тормозных колодок и др.

Для возможности применения рекуперативного торможения электрическим подвижным составом, кроме всего прочего, необходимо чтобы уровень напряжения на токоприемнике рекуперированного ЭПС был выше, чем уровень напряжения в контактной сети. Следовательно, применение рекуперативного торможения повышает среднее значение напряжения в контактной сети на участках электроснабжения и влияет на их пропускную способность.

Наличная пропускная способность системы тягового электроснабжения расчетного участка представляет собой наибольшее число поездов, которое может быть пропущено в каждом направлении движения исходя из нагрузочной способности силового оборудования тяговых подстанций, напряжения на токоприемниках ЭПС и температуры нагрева проводов контактной сети [1].

Для оценки влияния рекуперативного торможения на пропускную способность участков электроснабжения были выполнены тяговые и электрические расчеты для двух железнодорожных участков Белорусской железной дороги: Осиповичи – Минск, электрифицированный по системе тягового электроснабжения (СТЭ) 1×25 кВ и Гомель – Жлобин, электрифицированный по СТЭ 2×25 кВ. Расчет пропускной способности выполнялся в режиме нагрузки при параллельном графике [1], когда осуществлялся пропуск пакета из четырех поездов (один поезд максимальной (критической) массы 7500 т и три поезда средней массы 4500 т) и потока поездов средней массы во встречном направлении с интервалом 10 мин для двух типов локомотивов: ВЛ80<sup>С</sup> и БКГ1. При этом на электровозах БКГ1 применялось рекуперативное торможение.

По результатам расчетов было установлено, что провозная способность участка при постоянном межпоездном интервале зависит от напряжения в контактной сети. При уменьшении напряжения происходит снижение средней массы поездов, следующих по данному участку. Применение рекуперации на ЭПС позволяет уменьшить негативный эффект от снижения напряжения, и, как следствие, массы поездов оказываются выше, чем для тех же условий, но без применения рекуперации.

На электрифицированных участках с очень интенсивным движением, как правило, почти вся рекуперированная энергия потребляется электровозами или электропоездами, работающими в режиме тяги. При критичном заполнении графика движения поездов (выше 90 %) рекуперация стано-

вится абсолютно необходимой по условиям обеспечения перевозок. Таким образом, эффективность рекуперации зависит от регулирования графика движения поездов [2].

Как известно, для обеспечения устойчивого режима рекуперации необходима надежная передача вырабатываемой электроэнергии в систему тягового электроснабжения (СТЭ), при этом возможны два основных случая ее утилизации: энергия рекуперации будет потребляться в границах СТЭ или (в случае отсутствия потребителей) возвращаться в систему внешнего энергоснабжения.

Возврат энергии рекуперации в сеть внешнего энергоснабжения носит случайный характер, при этом сама энергия рекуперации имеет низкое качество (из-за несимметрии токов и напряжений, связанных с особенностью работы систем тягового электроснабжения однофазного переменного тока), поэтому продавать ее не представляется возможным. Наиболее рационально использовать эту энергию исключительно в границах СТЭ для нужд тяги поездов и нетяговых потребителей, что требует оптимизации графика движения поездов и, возможно, расположения в зоне питания накопителей электрической энергии [3, 4].

Для оценки эффективности использования электроэнергии, вырабатываемой ЭПС при рекуперативном торможении, и процента ее потребления на тягу поездов были выполнены тяговые и электрические расчеты для указанных выше участков Белорусской железной дороги. Расчеты выполнялись по следующей методике:

- для выбранных участков железной дороги были выполнены тяговые расчеты с применением рекуперативного торможения электровозами БКГ1 и определен возврат электрической энергии за поездку;

- было составлено 30 случайных суточных графиков движения для каждого из участков с заданными размерами движения и типами поездов (грузовые критической массы 7500 т и средней массы 4500 т);

- для рассматриваемых электрифицированных участков (Осиповичи – Минск 1×25 кВ и Гомель – Жлобин 2×25 кВ) выполнялись электрические расчеты по составленным ранее графикам движения поездов, по результатам которых определялось количество электроэнергии рекуперации, возвращаемой в систему внешнего электроснабжения (за расчетные сутки);

- для составленных суточных графиков движения поездов исходя из результатов единичных тяговых расчетов было определено общее количество электроэнергии, рекуперированной ЭПС на рассматриваемых участках, за каждые сутки, и по итогу определялась полезная доля энергии рекуперации, потребленная именно на тягу поездов.

Как показали расчеты, значение полезной доли энергии рекуперации, потребляемой на тягу поездов, лежит в пределах от 48,5 до 64,6 % от общей энергии рекуперации для СТЭ 2×25 кВ и от 62,4 до 74,9 % для СТЭ 1×25 кВ. То есть значительная часть (более половины) электроэнергии, возвращаемой ЭПС при работе в режиме рекуперативного торможения, потребляется другими поездами на этом участке; около 25–50 % возвращается в систему внешнего электроснабжения. При этом общий процент рекуперации электроэнергии в систему внешнего энергоснабжения по результатам электрических расчетов за расчетные 30 суточных графиков движения составил 5,6 % для СТЭ 2×25 кВ и 6,8 % – для СТЭ 1×25 кВ.

#### Список литературы

1 Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог : утв. 10.11.2010 г. № 128. – М., 2010. – 305 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. – Омск : ОмГУПС (ОмИИТ), 2012. – № 1(9). – С. 72–78.

3 Загорцев, В. А. Способы улучшения качества электрической энергии в системах с тяговой нагрузкой / В. А. Загорцев, А. С. Терлякович // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 24–25 ноября, 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 119–121.

4 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.