

го напряжения на токоприемниках близок к номинальному. В свою очередь установка напряжения +5 % на шинах СТП приводит к достаточно большому отклонению в потреблении электроэнергии, и оно оказывается завышенным почти на 10 %. То есть нагрузка элементов СТЭ также оказывается завышенной, что может сказаться на итоговом выборе ее основных элементов.

Выполнение электрических расчетов «с корректировкой тока поезда» позволяет исключить завышение нагрузки элементов СТЭ при изменении уровня напряжения в тяговой сети как в случае его корректировки регулированием на стороне 10 кВ СТП, так и в случае отклонения параметров смежных тяговых подстанций (например, мощности коротких замыканий).

#### Список литературы

1 Загорцев, В. А. Разработка имитационной модели системы тягового электроснабжения / В. А. Загорцев, О. С. Ананьева, В. Н. Подольская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 24–25 ноября 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 119–121.

УДК 621.311:625.42

## ПРИМЕНЕНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

*В. А. ЗАГОРЦЕВ, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Исследование эффективности применения накопителей электрической энергии (НЭЭ), как в системах тягового электроснабжения (СТЭ), так и на электрическом подвижном составе (ЭПС) является актуальной тематикой многих научно-исследовательских работ, выполняемых в настоящее время. Не стала исключением и данная работа, в рамках которой исследовалась эффективность применения накопителей на ЭПС постоянного тока метрополитена.

Как известно, при рекуперативном торможении электрическая энергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, возвращается с токоприемника 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 [1]. На Минском метрополитене, на примере которого выполнялись тяговые и электрические расчеты, возврат энергии рекуперации в систему внешнего электроснабжения невозможен, так как на тяговых подстанциях установлены выпрямительные агрегаты, без возможности инвертирования мощности от тяговой сети. Поэтому для данного типа систем тягового электроснабжения (СТЭ) наиболее актуальными могут быть следующие способы сохранения и использования энергии рекуперации: установка накопителей на электрическом подвижном составе, на совмещенных тяговых подстанциях (СТП) или на межподстанционной зоне. В рамках разработки программного обеспечения по расчету режимов совместной работы ЭПС и систем тягового электроснабжения [2] была реализована возможность моделирования НЭЭ на электроподвижном составе, с дальнейшим определением параметров работы СТЭ.

В разработанной модели был реализован следующий алгоритм применения НЭЭ:

- за основу был принят НЭЭ с параметрами, схожими с реальным прототипом, использованным в работе [3];
- заряд и разряд НЭЭ происходил с некоторыми потерями (принято 15 % [3]), а также было установлено ограничение по максимальному разрядному току (4000 А), т. е. в случае если ток поезда превышал данное ограничение, недостающее количество потреблялось из тяговой сети;
- процесс заряда НЭЭ происходил в режиме рекуперативного торможения и показан на рисунке 1, а, где отрицательное значение тока  $I_{\text{НЭЭ}}$  соответствует заряду НЭЭ, при этом напряжение  $U_{\text{НЭЭ}}$  увеличивается;
- разряд НЭЭ происходил при движении поезда в режиме тяги (при разгоне поезда со станции после остановки), при этом положительное значение тока  $I_{\text{НЭЭ}}$  (см. рисунок 1, а) и уменьшение напряжения  $U_{\text{НЭЭ}}$  свидетельствуют о разряде накопителя;

– при выполнении моделирования, батареи НЭЭ приняты незаряженными и энергия, запасаемая в них, поступала только при рекуперативном торможении при остановках. Энергия, запасенная в НЭЭ, использовалась при разгоне поезда в случае, если накопитель был до этого заряжен, а по окончании заряда поезд разгонялся потребляя энергию из контактной сети. На рисунке 1, б показан такой случай: можно увидеть что при использовании НЭЭ на электроподвижном составе ток тяговой подстанции начинает потребляться только после того, как батарея НЭЭ будет разряжена, тогда как без НЭЭ загрузка подстанции начинается с момента трогания поезда со станции.

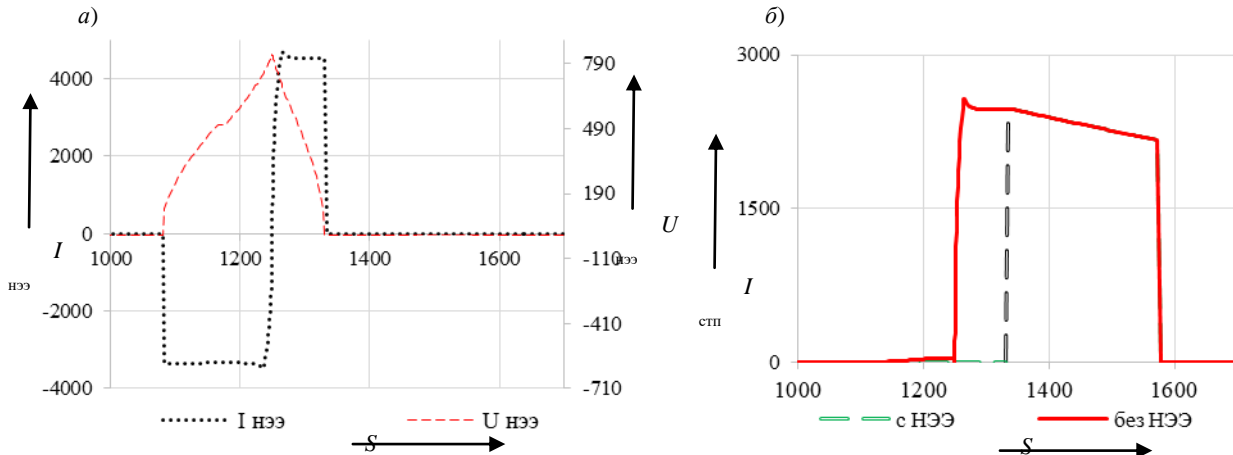


Рисунок 1 – Параметры работы НЭЭ и элементов СТЭ при движении поезда по участку:  
а – параметры работы НЭЭ; б – ток 311 СТП

Для оценки эффективности применения НЭЭ были выполнены тяговые и электрические расчеты для участка Минского метрополитена: количество СТП – 4; 14 питающих и 8 отсасывающих фидеров; марка питающих кабелей – ВБВнг (А)-LS-3, кабелей сети отсоса – ВБВнг(А)-LS-1 (с допустимыми длительными токами для сечений: 760 А / 300 мм<sup>2</sup>; 894 А / 400 мм<sup>2</sup>; 1054 А / 500 мм<sup>2</sup>); тип выпрямительных агрегатов – В-ТПЕД 1,6к-825В М2; тип тяговых трансформаторов – ТСПЗГЛ-1600/10; погонное сопротивление контактного и ходовых рельсов при температуре рельсов 40 °С – 0,021 Ом/км. В качестве электрического подвижного состава был принят 5-вагонный состав массой 225 т, состоящий из моторных вагонов серии М110/111 Швейцарской компании *Stadler*, следующий с интервалом 82 с (44 пары поездов в час), время стоянки на конечных и промежуточных станциях – 30 с. График движения поездов принят детерминированным, чтобы получить более корректное сравнение результатов с использованием НЭЭ на ЭПС и без НЭЭ.

В качестве исследуемых параметров элементов СТЭ определялись: эффективные токи СТП (токи тяговых трансформаторов за интервалы усреднения (2 ч, 75 с, 10 с, 5 с) и эффективные токи преобразовательных агрегатов за интервалы усреднения (2 ч, 75 с, 40 с, 10 с), эффективные токи питающих и отсасывающих фидеров (нагрузки кабелей) на интервале усреднения 2 ч.

В качестве расчетных режимов рассматривались [4]: *нормальный режим работы* участка метрополитена (напряжение холостого хода подстанции соответствует: для рассчитываемой подстанции 105 % номинального напряжения на шинах 10 кВ, для остальных подстанций – 100 % номинального); *аварийный режим работы* СТП с отключением одного преобразовательного агрегата на расчетной СТП; *проверка уровня напряжения на токоприемниках ЭПС*.

По итогам моделирования для *нормального режима работы* были получены следующие результаты: при использовании НЭЭ на электрическом подвижном составе уменьшаются эффективные токи преобразовательных агрегатов СТП и, как следствие, преобразовательных (тяговых) трансформаторов. Для трансформатора уменьшение нагрузки составило порядка 21,8 %, для преобразовательного агрегата – 26,3 %, для питающих фидеров (кабельных присоединений) максимальное уменьшение составило 41,3 %, а для отсасывающих – 37,2 %.

Следует отметить, что потенциальный эффект от применения НЭЭ на ЭПС может быть весьма весомым в плане требований к параметрам СТЭ, но при этом усложняется конструкция ЭПС и, как следствие, снижается надежность его работы.

## Список литературы

- 1 **Загорцев, В. А.** Оценка эффективности применения рекуперативного торможения на железнодорожном транспорте / В. А. Загорцев, Н. С. Чуешков // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа (Гомель, 16–17 ноября, 2023 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 35–36.
- 2 **Загорцев, В. А.** Разработка имитационной модели системы тягового электроснабжения / В. А. Загорцев, О. С. Ананьева, В. Н. Подольская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 24–25 ноября, 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 119–121.
- 3 **Плетнев, Д. С.** Бортовой накопитель энергии на электроподвижном составе метрополитена: дис. ... канд. техн. наук : 2.4.2 / Д. С. Плетнев ; РУТ(МИИТ). – М., 2024. – 176 л.
- 4 СН 3.03.05-2020. Строительные нормы Республики Беларусь. Метрополитены. – Введ. 28.12.2023. – Минск : Мин-стройархитектуры, 2024. – 99 с.

УДК 006.015.8:625.1

## АКТУАЛИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СЕРТИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПРОДУКЦИИ

*В. С. ЗАЙЧИК, А. А. КЕБИКОВ, М. А. РОГОВЕНКО*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время на всей территории Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС) оценка соответствия железнодорожной продукции требованиям безопасности осуществляется в соответствии с техническими регламентами ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» и ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» [1, 2]. Указанные технические регламенты содержат исчерпывающие требования безопасности, соблюдение которых является обязательным на всех стадиях жизненного цикла подвижного состава и его составных частей, а также элементов составных частей подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта.

ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» [3] устанавливает отдельные требования к подвижному составу и элементам инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта, что особенно актуально при проектировании и перспективном строительстве высокоскоростных магистралей на территории ЕАЭС.

Вместе с тем идеология построения технических регламентов предусматривает установление базовых требований безопасности, которые не всегда установлены в тексте самого нормативного документа. Таким образом, требования безопасности [1–3] могут быть классифицированы на три группы:

- 1) применяемые напрямую из [1–3];
- 2) применяемые частично вместе с требованиями безопасности поддерживающих [1–3] технических нормативных правовых актов (далее – ТНПА);
- 3) применяемые через требования безопасности, установленные в поддерживающих ТНПА.

Примером требования безопасности первой группы является п. 73 [1], в котором установлено прямое требование взрывобезопасности аккумуляторного бокса.

Ко второй группе относится, например, требование маркировки составных частей железнодорожного подвижного состава (п. 101 [1]), которое требует обязательного наличия:

- единого знака обращения на рынке ЕАЭС;
- наименования изготовителя;
- наименования продукции;
- обозначения продукции в соответствии с конструкторской документацией;
- даты изготовления.

Однако требования п. 101 [1] могут быть недостаточны для некоторых видов продукции, и дополнительные требования к маркировке могут быть описаны в поддерживающих ТНПА. Так, поддерживающий по отношению к [2] ГОСТ 33184-2014 [4], в п. 5.2.1 и 5.2.3 устанавливает следующие дополнительные требования по маркировке:

- сорт накладок;
- масса партии в тоннах;