

Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене



Виктор ГРЕЧИШНИКОВ
Victor A. GRECHISHNIKOV

Максим ШЕВЛЮГИН
Maxim V. SHEVLUGIN



Гречишников Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Шевлюгин Максим Валерьевич – кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия.

Рассмотрены этапы ввода рекуперативного торможения на Московском метрополитене. Даны результаты экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения и стационарного накопителя энергии. Описаны установка накопления энергии на тяговой подстанции и ее опытная эксплуатация. В ходе наблюдений подтверждена высокая корреляция показателей штатного режима с расчетными данными.

Ключевые слова: система электроснабжения, тяговая подстанция, стационарный накопитель энергии, рекуперативное торможение, опытная эксплуатация, метрополитен.

Каждый день Московский метрополитен перевозит порядка 9 млн человек, что составляет около 60% от всего пассажиропотока столицы [1], и является самым мощным энергопотребителем мегаполиса. Для обеспечения потребностей подземки расходуется примерно 1,8 млрд кВт·ч электроэнергии в год, при этом до 70% идет непосредственно на тягу поездов [2]. Если добавить сюда, что потребление энергии ежегодно растёт со скоростью около 20 млн кВт·ч, то станет тем более понятно, почему руководство Московского метрополитена настойчиво акцентирует внимание на внедрении энергосберегающих технологий именно в системе тягового электроснабжения (СТЭ).

Проведенный топливно-энергетический анализ показал, что значительный эффект энергосбережения на линиях метрополитена может дать использование электроподвижным составом (ЭПС) режимов рекуперативного торможения. Начиная с 2008 года ведется большая исследовательская и практическая работа с привлечением специалистов отраслевых служб, а также МИИТ и ВНИИЖТ в отношении энергосберегающих режимов для

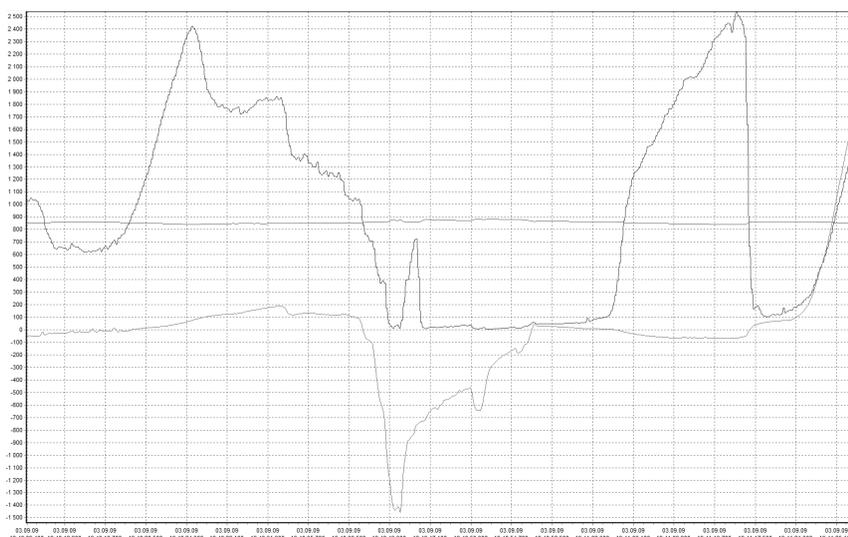


Рис. 1.
Фрагмент осциллограмм тока ТП, тока фидера и напряжения на шинах при «запертой» тяговой подстанции.

ЭПС и, в частности, рекуперативного торможения, поиска эффективных технических решений [5].

Первыми были исследованы те линии, на которых курсировали на тот момент ЭПС с асинхронными двигателями типа 81.740 «Русич»: Филевская, Арбатско-Покровская, Кольцевая, Бутовская. Впоследствии аналогичные исследования проведены на Калининской линии, где запустили новый подвижной состав типа 81.760 «Ока».

В ходе изучения эксплуатационных возможностей ЭПС выявлено, что при рекуперативном торможении тяговый привод обеспечивает устойчивую работу. Во всем диапазоне рабочих скоростей величины тормозных путей в процессе рекуперативного торможения не превышают нормативных значений, а токовые перегрузки в тормозной цепи отсутствуют. Уровни действующих значений тока, его гармонический состав и импульсные характеристики, которые генерируются тяговым электрооборудованием в режиме рекуперации, в диапазоне частот, используемых в устройствах АРС СЦБ, не выходят за допустимые пределы.

Особое внимание уделялось процессу рекуперации энергии в тяговую сеть при проходе ЭПС через непрекрываемый токораздел. Экспериментальные замеры показали, что перенапряжения на шинах ТП при проходе непрекрываемого токораздела ЭПС в режиме рекуперативного торможения, когда возникает разрыв в це-

пи тока, зафиксированы не были. Амплитуда мгновенных перенапряжений на ЭПС не превышает 1400 В, а наибольшая длительность превышения уровня 1050 В импульсами напряжения составляет 43 мс, что не выше величин, указанных в нормах. После прохождения непрекрываемого токораздела вагоны ЭПС снова входили в режим рекуперативного торможения [5].

С целью оценки условий для рекуперации на тяговых подстанциях четырёх линий проводились системные замеры – непрерывно, в различных точках силовой цепи, в течение нескольких суток с частотой 1 кГц [3]. Для реализации нужного тормозного усилия при рекуперации напряжение на вагоне в зависимости от ситуации в СТЭ может существенно повыситься, но не выше уровня в 925 В, ограниченного системой управления ЭПС. Возврат энергии рекуперации в СТЭ носит случайный характер как по величине тока, так и количеству рекуперировавшихся вагонов в зависимости от условий в тяговой сети, определяемых главным образом расположением поездов и их режимами работы. Результаты замеров на тяговых подстанциях позволили оценить величину мощности, перетекающую от рекуперировавшихся составов на исследуемой фидерной зоне через шины подстанций на другие фидерные зоны, и исследовать её характер.

При экспериментальных замерах на тяговых подстанциях Т-23 и Т-24 Филевской линии были зафиксированы факты использования режимов рекуперативного тормо-





Рис. 2. Накопительные шкафы НЭ на Т-23.



Рис. 3. Накопительные модули внутри шкафа.

жения (эффект «запираания» подстанции, эффект транзита тока через шины подстанций при отрицательном токе фидерной зоны) [3].

На рис. 1 демонстрируются полутораминутный фрагмент записанной осциллограммы токов ТП и одного из фидеров, а также напряжения на шинах тяговой подстанции Т-23. Виден переток мощности от рекуперирующего ЭПС через шины ТП с одной зоны на другие. При этом ток фидера (Иф) имеет отрицательное значение на уровне 1400 А. О том, что данный переток является следствием рекуперации, говорит тот факт, что ТП «закрылась», т. е. ток ТП (Итп) равен нулю. Таким образом, ток рекуперации от тормозящего поезда

перетекает на другие зоны и там потребляется ЭПС, идущими в режиме тяги.

Имитационное моделирование работы СТЭ с определением мгновенных и интегральных показателей в различных режимах показало, что если весь парк подвижного состава Филевской линии при торможении будет использовать рекуперативный режим, то за счёт межпоездного обмена экономия может составить от 15 до 30% энергии, потребляемой на тягу [4].

Однако, как явствует отечественный и зарубежный опыт, довести до 100% межпоездной обмен не представляется возможным. Это связано с вероятностным импульсным характером графика энергопотребления в СТЭ, т. е. в тяговой сети не всегда есть поезда, идущие в режиме тяги и способные принять энергию рекуперации. Повышение эффективности рекуперации всех ЭПС возможно с использованием дополнительных технических средств, готовых принимать энергию рекуперации, не потреблённую при межпоездном обмене.

Одно из эффективных средств повышения эффективности рекуперации – применение локальной буферизации электроэнергии в СТЭ с помощью накопителей энергии (НЭ), установленных на ТП. Другими словами, в тяговой сети всегда будет находиться гарантированный приёмник рекуперативной электроэнергии. При этом обеспечивается повторное использование энергии торможения поездов, снижается установленная мощность ТП, улучшаются климатические условия в подземной части метрополитена и т. д.

При анализе различных типов НЭ, потенциально подходящих для использования на ТП метрополитена, наиболее привлекательно выглядят накопители управляемого или неуправляемого типа на основе аккумуляторов или суперконденсаторов.

Накопителями неуправляемого типа будем называть те НЭ, аккумулирующий элемент которых подключается непосредственно к шинам ТП, а режимы заряда или разряда определяются условиями циркулирующей энергии в тяговой сети.

Накопителями энергии управляемого типа будем считать те НЭ, аккумулирующий элемент которых подключается к шинам ТП через преобразовательный агрегат,

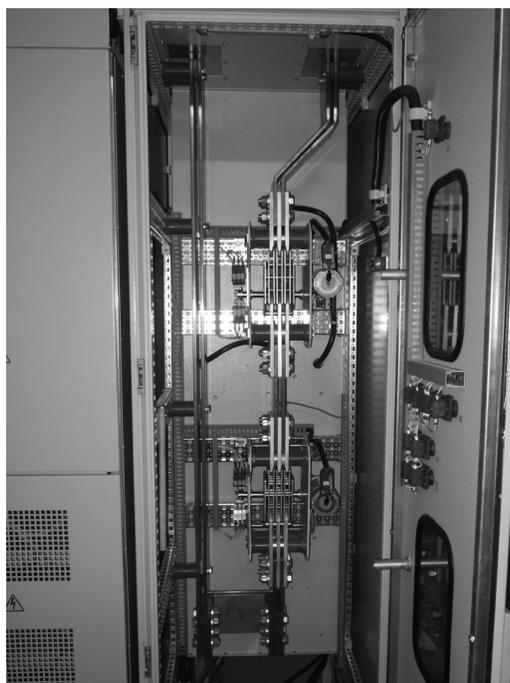


Рис. 4. Шкаф с разъединителями.

задающий режимы работы накопителя в соответствии с выбранным алгоритмом.

После детальных исследований на основе измерений и имитационных экспериментов было принято решение об установке двух накопителей энергии неуправляемого типа на тяговых подстанциях Т-23 и Т-24 Филевской линии Московского метрополитена.

Аккумулирующий элемент каждого НЭ состоит из электрохимических конденсаторов российской фирмы «ЭКЭ» («ЭЛ-ТОН»). Любой из накопителей представляет собой 14 шкафов производства ОАО «Завод конвертор» (рис. 2). Один шкаф содержит 11 накопительных модулей, соединенных последовательно (рис. 3). Общая ёмкость НЭ составляет 187 Ф, а максимальное рабочее напряжение — 990 В.

Подключение НЭ к шинам ТП осуществляется подобно стандартным КВ-агрегатам: по «плюсу» — через стандартную ячейку РУ-825В с быстродействующим выключателем, по «минусу» — через специально разработанную ячейку с разъединителями и вспомогательной аппаратурой (рис. 4).

Каждый накопительный шкаф имеет собственную систему диагностики и мониторинга. Ежесекундно оценивается ряд



Рис. 5. Главный компьютер НЭ.

электротехнических параметров: ток и напряжение модулей, температура в различных точках и прочее. Вся информация стекается на устройство логического контроля, которое следит за параметрами 11 накопительных модулей, оценивает ситуацию и при необходимости даёт команды управления, например, на включение принудительной вентиляции модуля, температура которого превысила заданный порог.

Параллельно с этим от каждого шкафа информация стекается на главный компьютер, который ведёт протокол по работе всего НЭ, то есть фиксирует все действия в каждом шкафу и по НЭ в целом, а также имеет возможность автоматического отключения накопителя от шин ТП при неисправности или перегрузке. На сенсорном экране главного компьютера представлены мнемосхема подключения НЭ с отображением состояния коммутационной аппаратуры и всех 14 шкафов со своими параметрами (рис. 5).

Управление НЭ может осуществляться как с помощью местного управления, так и посредством телемеханики энергодиспетчером, у которого есть своя мнемосхема, где также отображается вся необходимая информация о состоянии НЭ.





В данный момент НЭ на тяговой подстанции Т-23 включен в опытную эксплуатацию. Первые показатели работы НЭ в штатном режиме отражают высокую корреляцию с расчётными данными. А именно:

- максимальные токи заряда составили порядка 1800 А;
- максимальные токи разряда – примерно 2300 А;
- максимальная принятая энергия за один цикл перезаряда – 10,5 МДж;
- максимальная отданная энергия за один цикл перезаряда – 11 МДж;
- среднесуточный КПД составил 95,5%;
- потребляемая мощность ТП снижена на 13,4%.

Мониторинг начальной эксплуатации показал, что установка НЭ на Т-23 позволила частично сгладить график энергопотребления ТП, снизить просадку напряжения на шинах ТП и повысить энергетиче-

скую надежность тягового электроснабжения. На очереди включение в опытную эксплуатацию НЭ на Т-24.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаев Д. В. Московский метрополитен сегодня// Метро и тоннели. – 2005. – Спецвыпуск 5. – С. 12–13.
2. Комиссаров Н. Н. Состояние и совершенствование системы энергоснабжения метрополитена// Метро и тоннели. – 2005. – Спецвыпуск 5. – С.30.
3. Баранов Л. А., Гречишников В. А., Мелешин И. С., Шевлюгин М. В. Экспериментальная оценка эффективности рекуперации энергии торможения в СТЭ Московского метрополитена// Безопасность движения поездов. Труды X научно-практ. конференции. – М.: МИИТ, 2009. – С. VI-14 – VI-15.
4. Андреев В. В., Балакина Е. П., Баранов Л. А., Гречишников В. А., Шевлюгин М. В. Расчет системы тягового электроснабжения метрополитена с учетом частичной рекуперации вагонов типа 81–740.1/741.1// Безопасность движения поездов: Труды X научно-практ. конференции. – М.: МИИТ, 2009. – С. VI-15 – VI-16.
5. Гаев Д. В., Ершов А. В., Баранов Л. А., Гречишников В. А., Шевлюгин М. В. Внедрение энергосберегающих технологий// Мир транспорта. – 2010. – № 3. – С. 3–7.

OPERATION OF POWER STORAGE DEVICE IN MOSCOW METRO

Grechishnikov, Victor A. – Ph.D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Shevlyugin, Maxim V. – Ph.D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

The article refers to stages of implementation of regenerative braking system at Moscow metro. The authors publish the results of experimental measuring of operation rates of the system of traction power supply and of stationary power

storage device. The article describes installation process of storage device at the traction substation and its test operation. The monitoring confirmed high correlation of the rates of operation regime with previously calculated data.

Key words: electric power supply system, traction substation, metro, stationary power storage device, regenerative braking, test operation.

REFERENCES

1. Gaev D. V. Moscow Metro today [Moskovskiy metropoliten segodnya]. *Metro i tonneli*, 2005, special issue 5, pp. 12–13.
2. Komissarov N. N. Actual state and outlooks for enhancement of power supply system of metro [Sostoyaniye i sovershenstvovaniye sistemy energosnabzheniya metropolitena]. *Metro i tonneli*, 2005, special issue 5, p.30.
3. Baranov L. A., Grechishnikov V. A., Meleshin I. S., Shevlyugin M. V. Test assessment of efficiency of regeneration of braking energy in Moscow metro operation system [Eksperimental'naya otsenka effektivnosti rekupe-ratsii energii tormozheniya v STE Moskovskogo metropolitena]. Train traffic safety. Proceedings of 10th scientific and practical conference [Bezopasnost' dvizheniya poezdov. Trudy X nauchno-prakt. konferentsii]. Moscow, MIIT publ., 2009, pp.. VI-14 – VI-15.
4. Andreev V. V., Balakina E. P., Baranov L. A., Grechishnikov V. A., Shevlyugin M. V. Computation of the system of traction electric power supply of metro with the account for partial regeneration of coaches of type 81–740.1/741.1 [Raschet sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya metropolitena s uchetom chastichnoy rekupe-ratsii vagonov tipa 81–740.1/741.1]. Train traffic safety. Proceedings of 10th scientific and practical conference [Bezopasnost' dvizheniya poezdov. Trudy X nauchno-prakt. konferentsii]. Moscow, MIIT publ., 2009, pp. VI-15 – VI-16.
5. Gaev, Dmitry V., Ershov, Alexander V., Baranov, Leonid A., Grechishnikov, Victor A., Shevlyugin, Maxim V. Adoption of Power Saving Technology at the Underground Lines. *Mir Transporta* [World of Transport and Transportation] *Journal*, 2010, Vol. 31, No 3, pp. 3–7.

Координаты авторов (contact information): Гречишников В. А. (Grechishnikov V. A.) – + 7 (495) 684–2157, Шевлюгин М. В. (Shevlyugin M. V.) – Max Shevlyugin <mx_sh@mail.ru>

Статья поступила в редакцию / article received 13.10.2013
Принята к публикации / article accepted 03.11.2013