

# Стационарные накопители энергии на метрополитене Гамбурга

Гамбургское транспортное предприятие **Hamburger Hochbahn (ННА)** организовано и действует на правах частного предприятия, владельцем которого является город Гамбург. Насчитывая 4300 квалифицированных сотрудников и перевозя ежедневно около 1 млн. пассажиров, оно является вторым по величине оператором местных сообщений в Германии и крупнейшим партнером транспортной компании Гамбурга **HVV**. Предприятие **ННА** предоставляет населению Гамбурга и его окрестностей транспортные услуги высокого качества, реализуемые на трех линиях метро и 100 автобусных маршрутах.

На электрифицированном рельсовом транспорте местного сообщения (метрополитены, городские железные дороги, трамвай) значительное количество электрической энергии при торможении подвижного состава пре-

вращается в тепловые потери. Стационарные накопители энергии обеспечивают промежуточное накопление рекуперированной энергии и ее дальнейшее целенаправленное использование соответствующими потребителями.



Рис. 1. Электропоезд серии DT4 метрополитена Гамбурга

## Накопители энергии с инерционными массами

Применение стационарного накопителя энергии с инерционной массой на одной из тяговых подстанций системы электроснабжения метрополитена Гамбурга способствует экологичному и технически эффективному использованию энергии, выделяющейся в процессе рекуперативного торможения подвижного состава. Применение такого накопителя позволяет также проверить целесообразность использования других накопителей энергии на сети метрополитена предприятия **ННА**. В противном случае энергия, выделяющаяся в процессе торможения электропоездов метрополитена серии **DT4** (рис. 1), оснащенных рекуперативным тормозом, при отсутствии потребителей энергии, которыми являются другие поезда на линии, будет превращаться в тормозных резисторах в тепло, бесполезно излучаемое в пространство.

В результате устранения жесткой временной связи между моментами получения тормозной энергии и возникновения возможности ее потребления появляются условия для ее эффективного использования в удобный момент времени. Следует отметить, что накопители не только сохраняют энергию торможения, но также за счет снижения потребления первичной энергии способствуют уменьшению загрязнения атмосферы выбросами углекислого газа.

Существуют стационарные накопители энергии различных систем: с вращающимися инерционными массами и статические. Требовалось выбрать такую систему, которая обеспечивала бы полностью автоматизированный режим работы под дистанционным контролем, а также была бы надежной, не требовала большого объема работ по техническому обслуживанию и имела

бы длительный срок службы. Кроме того, выбранный накопитель энергии должен не только обладать эффективными рабочими характеристиками, но также быть экологичным как в эксплуатации, так и при утилизации.

Системы накопления энергии с использованием традиционных аккумуляторов, таких, как свинцово-кислотные, никель-кадмиевые, бром-цинковые и др., не рассматривались ввиду их относительно непродолжительного срока службы и инерционности.

Накопители энергии могут использоваться в следующих целях:

- стабилизация напряжения в контактной сети,
- снижение расхода энергии;
- минимизация пиков нагрузки в тяговой сети постоянного тока.

Единственной целью использования накопителей энергии на предприятии ННА являлось снижение расхода энергии. В связи с этим при выборе типа накопителей внимание было сосредоточено на таких способах накопления энергии, при которых в результате быстрых циклов зарядки и разрядки в течение короткого времени могла бы накапливаться и отдаваться большая мощность. Исходя из такого назначения и критериев экономической эффективности, было принято решение в пользу кинетических накопителей энергии компании Piller Power Systems (таблица). Энергия в системах такого вида накапливается в электромеханической форме за счет вращения цилиндрического тела (инерционной массы) вокруг его оси. Величина энергии при этом пропорциональна массе цилиндрического тела и квадрату частоты его вращения.

Накопитель энергии с инерционной массой состоит из вращающегося цилиндра или диска, изготовленного из стали, узла накопления и преобразования энергии и блока силовой электроники (рис. 2, 3). Ось инерционной мас-

**Технические данные инерционного накопителя компании Piller Power Systems**

Параметр	Значение
Мощность, кВт	1650
Частота вращения, об/мин	1800 – 3300
Общая масса, кг	6000
Масса ротора, кг	2900
Потери холостого хода, кВт	10
Периодичность смазывания подшипников, мес	6
Срок службы подшипников, лет	8

Примечание: внутренний объем заполнен гелием.

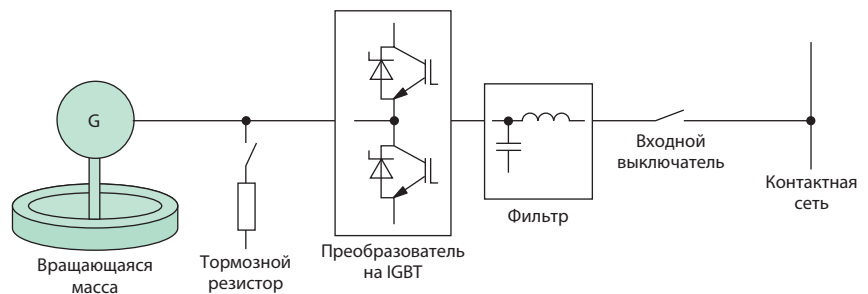


Рис. 2. Схема стационарного инерционного накопителя энергии

сы является в то же время валом комбинированного агрегата двигатель/генератор, который практически не содержит изнашивающихся деталей. Благодаря этому здесь, так же как и в устройствах силовой

электроники, можно рассчитывать на продолжительный срок службы и низкие расходы по эксплуатации и обслуживанию.

### Ожидаемая экономия энергии и экологический фактор

Для количественной оценки ожидаемой экономии энергии были произведены измерения на тормозных резисторах поездов типа DT4 в зоне тяговой подстанции Оксенцолль линии 1 метрополитена Гамбурга.

Диапазон действия накопителя энергии определяется падением напряжения в контактной сети между поездом и накопителем. Если оно составляет 50 В, максимальная величина тормозной энергии, приходящейся на один поезд в зоне тяговой подстанции Оксенцолль, идущий из центра Нордерштедт-Митте в направлении Ольштедт/Гроссхансдорф, составляет 5,05 кВт·ч. Максимальная величина тормозной энергии одного поезда в обратном направлении равна 4,32 кВт·ч.

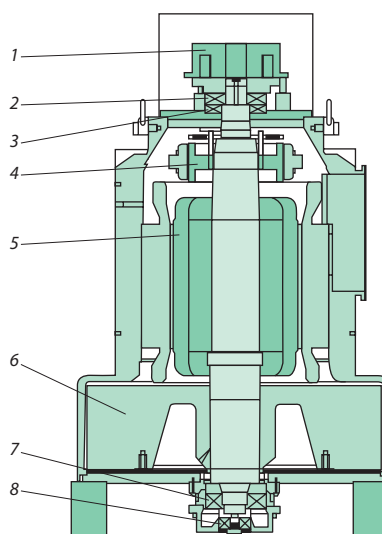


Рис. 3. Инерционный накопитель компании Piller:

1 – тормозной магнит; 2, 3 – верхние подшипники; 4 – возбудитель; 5 – главная электрическая машина; 6 – вращающаяся инерционная масса; 7, 8 – нижние подшипники

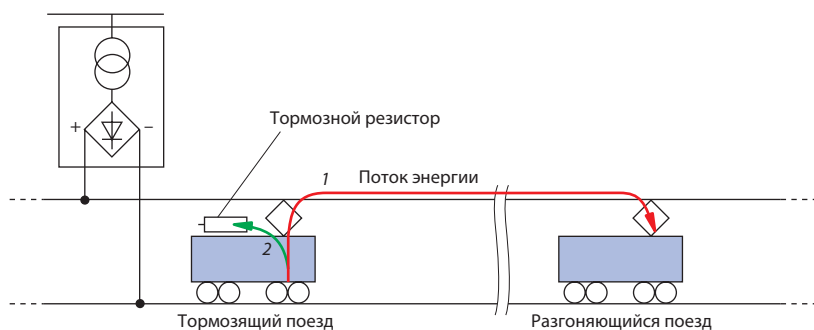


Рис. 4. Схема использования энергии рекуперации

С учетом КПД накопителя энергии, равного 0,85, и числа поездок величина тормозной энергии, которая может быть сэкономлена за год, предприятием ННА оценена в 353 тыс. кВт·ч.

Прежде чем принять решение о приобретении накопителя энергии, ННА потребовало от выбранного поставщика также определить размер возможной экономии. По расчетам этой компании она должна составить 311 тыс. кВт·ч. Благодаря указанному снижению потребления энергии уменьшение выбросов CO<sub>2</sub> должно составить 180 т в год.

## Описание проекта

Эксплуатируемый предприятием ННА подвижной состав метрополитена работает на постоянном токе. При этом энергия подается по контактной сети (контактному рельсу), а в качестве обратной цепи используются ходовые рельсы.

Напряжение в тяговую сеть подается от тяговых подстанций, ко-

торые распределены по всей сети метрополитена с шагом 1 – 3 км. Система тяговых подстанций являются связующим звеном между региональной распределительной сетью переменного тока среднего (10 кВ) напряжения и тяговой сетью метрополитена с напряжением постоянного тока 750 В. Основными составными частями подстанций являются трансформаторы с подключенными к ним выпрямителями.

Поезда метрополитена серии DT4, эксплуатируемые предприятием ННА, оснащены системой рекуперации энергии, которая позволяет при торможении преобразовывать кинетическую энергию поезда в электрическую. При этом тяговые двигатели в процессе торможения работают в режиме генератора (рис. 4). Вырабатываемая электрическая энергия может возвращаться в контактную сеть. В оптимальном случае она сразу же используется другими поездами на стадии трогания и разгона. Это приводит к

более низкому потреблению энергии от подстанций, чем при работе без рекуперации энергии. Однако если при торможении подвижного состава нет в наличии соответствующего потребителя энергии (например, поблизости нет другого поезда, способного потреблять излишек энергии), последняя преобразуется в тепло в тормозных резисторах поезда и не может быть полезно использована.

Это связано с тем, что при рекуперативном торможении одного или нескольких поездов и отсутствии поездов-потребителей напряжение в контактной сети возрастает, так как тяговая подстанция не способна возвращать энергию в контактную сеть обратно в распределительную трехфазную сеть 10 кВ. Как показано на рис. 4, поток энергии, вырабатываемой тормозящим поездом, переключается с контактного провода на тормозные резисторы, как только величина напряжения в контактной сети превышает определенное значение.

Измерительные поездки, проводившиеся предприятием ННА, показали, что использование системы накопления энергии особенно целесообразно на линии 1 метрополитена Гамбурга в районе тяговой подстанции Оксенцолль. После изучения диаграммы напряжений стало ясно, что это место является целесообразным и с точки зрения возможностей регулирования.

Анализ результатов измерений показал, что в центральной части города с наиболее густой сетью тягового электроснабжения постоянно тока широко используется рекуперативное торможение и, таким образом, энергия практически не теряется на тормозных резисторах. Отсюда следует, что потенциальные места установки накопителей энергии находятся в основном на ответвлениях.

На рис. 5 и 6 показаны процессы разгона и торможения электропоездов DT4 в районе подстанции

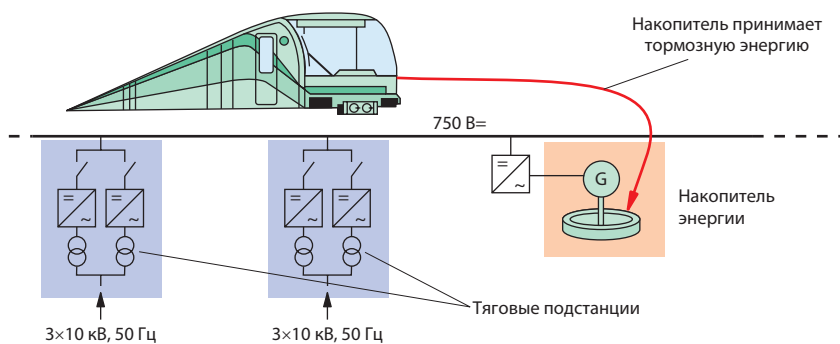


Рис. 5. Схема передачи энергии торможения от поезда к накопителю

Окзенцолль. Энергия, вырабатываемая при торможении, аккумулируется стационарным накопителем энергии и снова используется для разгона подвижного состава.

Сигналом для запуска накопителя энергии является достижение определенного уровня напряжения в контактной сети. При торможении подвижного состава напряжение в контактном рельсе повышается. Если при этом превышает определенное значение напряжения, накопитель получает сигнал на прием избыточной энергии. За счет этого обеспечивается такой режим, при котором накопитель действительно принимает только избыточную тормозную энергию от поездов, а не от ближайшей подстанции.

В процессе торможения поезда накопитель заряжается и по окончании процесса торможения стремится поддержать уровень напряжения в сети, т. е. отдать в нее энергию. Процесс разрядки накопителя начинается в момент, когда в зоне его действия находится какой-либо поезд, для которого требуется энергия. Процесс разрядки прекращается, если в этой зоне нет поезда-потребителя или если накопитель полностью разряжен.

Таким образом, функцией накопителя энергии является промежуточное хранение неостребованной энергии, в результате чего снижается ее потребление через подстанции из распределительной сети среднего напряжения.

Накопитель энергии через быстросрабатывающий автоматический выключатель постоянного тока, обеспечивающий защиту от перегрузки и короткого замыкания, подключается к сборной шине постоянного напряжения подстанции. В случае неисправности накопителя гарантируется надежное его отключение от сборной шины. Кроме того, накопитель оснащен разрядником на входе и максимальной токовой защитой.

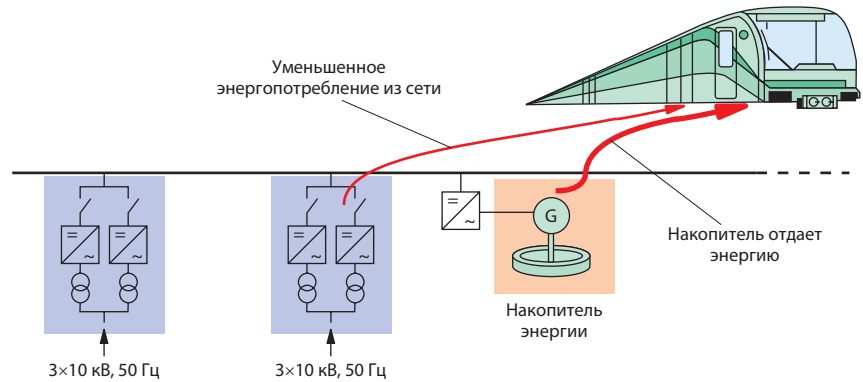


Рис. 6. Схема потребления разгоняющимся поездом тока от накопителя и ближайшей тяговой подстанции

### Первые результаты эксплуатации

Накопитель энергии был введен в эксплуатацию в июле 2007 г. После нескольких недель проверочных и регулировочных работ он был настроен таким образом, чтобы обеспечивалась его стабильная работа в продолжительном режиме и можно было получить первые результаты по экономии энергии.

Когда накопитель находится в состоянии полной зарядки, его инерционная масса, составляющая 1800 кг, вращается с частотой 3300 об/мин. В разряженном состоянии частота вращения инерционной массы составляет 1800 об/мин.

Как показано на рис. 7, накопитель постоянно подвергается процессам полной зарядки и разрядки. Максимальная мощность, которую может отдавать накопитель, составляет 1000 кВт при полезно используемой энергии 5 кВт·ч.

При вводе накопителя в эксплуатацию стало ясно, что уровень шума, измеренный вне здания, в котором он установлен, выше, чем ожидалось. В связи с этим время его работы было ограничено с 7.00 до 20.00 с понедельника по пятницу. Несмотря на такое ограничение времени эксплуатации, было очевидно, что экономия энергии может составить значительно больше ожидавшихся 311 тыс. кВт·ч.

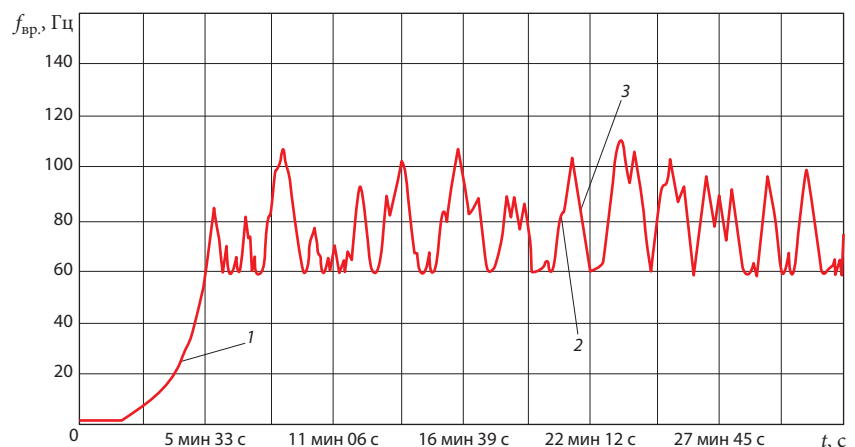


Рис. 7. Изменение в функции времени частоты вращения накопителя при разрядке и зарядке:

$f_{вр}$  — частота вращения инерционной массы;  $t$  — время; 1 — зарядка до рабочей частоты вращения; 2 — процесс заряда; 3 — процесс разряда

Что касается уровня шума, то было решено изменить концепцию отвода охлаждающего воздуха таким образом, чтобы можно было установить глушитель. После установки глушителя накопитель стали использовать в круглосуточном режиме работы. Однако последующий анализ эксплуатационных данных показал, что рано утром и в период обеденных перерывов работа накопителя нецелесообразна. В связи с этим его стали использовать с 6.00 до 24.00 в течение всех семи дней недели. Еженедельная экономия энергии, таким образом, стала еще больше. Согласно последним данным, экономия фактически составляет более 430 тыс. кВт·ч. С учетом этих данных и всех инвестиционных и эксплуатационных расходов продолжительность периода амортизации оценена в 9 лет. Если из объема капитальных затрат вычесть финансовые средства, выделенные из бюджета Гамбурга для стимулирования проекта, срок амортизации будет равен 7 годам. В случае повышения цен на электроэнергию сокращение срока амортизации будет еще большим.

Первые недели эксплуатации накопителя на метрополитене по-

казали также, что система требует усовершенствования с целью повышения стабильности ее работы с использованием всех функциональных возможностей. С увеличением прогнозируемого объема сэкономленной энергии возрастают также и потери. Они ведут к аккумуляции тепла в шкафу выпрямителя. Эту проблему удалось решить путем установки вентилятора более высокой производительности. Кроме того, имели место отключения с извещением о перенапряжении, которые удалось устранить путем адаптации контролирующих программ.

Применение накопителя энергии позволило наряду со снижением общего потребления энергии также снизить потребление энергии в часы пик. Так как эта величина достаточно точно может быть определена только после длительного срока эксплуатации, она не учитывалась при определении предположительного срока амортизации.

### Выводы и заключение

Весь проект планировалось реализовать в два этапа. Сначала должен пройти этап испытаний экспе-

риментальной установки в условиях, приближенных к эксплуатационным, с тем чтобы определить и оценить соответствующие параметры, такие, например, как величина аккумулируемой и отдаваемой энергии.

Если экспериментальная установка в течение длительного срока будет показывать ожидаемые результаты, можно будет сделать вывод об оснащении сети метрополитена Гамбурга несколькими накопителями энергии. Их местоположение будет уточнено в процессе эксплуатации.

За счет последовательной установки накопителей энергии в системе электроснабжения ННА рассчитывают получить существенную экономию природных энергоресурсов и уменьшить выбросы CO<sub>2</sub>. Данный проект является пилотным и представляет собой пример реализации инновационной и перспективной концепции.

---

*По материалам компаний Hamburger Hochbahn ([www.hochbahn.de/wps/portal/de/home/hochbahn/unternehmen/klima/klimaschutz\\_ubahn](http://www.hochbahn.de/wps/portal/de/home/hochbahn/unternehmen/klima/klimaschutz_ubahn)) и Piller Power Systems ([www.piller.com/site/8/Dynamic.asp](http://www.piller.com/site/8/Dynamic.asp)); [www.fven.de/standerforschung2.pdf](http://www.fven.de/standerforschung2.pdf).*

## Редакция журнала

### «Железные дороги мира»

**приглашает на внештатную работу переводчиков с английского, немецкого и французского языков, имеющих опыт работы на железнодорожном транспорте и проживающих в Москве или Московской области.  
Обращаться по телефону (499) 317-55-65 или по электронной почте [zdm@css-rzd.ru](mailto:zdm@css-rzd.ru).**