

# Энергоэффективные решения для систем управления на железнодорожном транспорте



**Д. В. Ефанов,**  
д. т. н., доцент, руководи-  
тель направления систем  
мониторинга и диагно-  
стики ООО «ЛокоТех-Сиг-  
нал», профессор кафедры  
«Автоматика, телемеха-  
ника и связь на железно-  
дорожном транспорте»  
Российского университета  
транспорта (МИИТ)



**Г. В. Осадчий,**  
технический директор  
ООО НТЦ «Комплексные  
системы мониторинга»

Концепция внедрения «зеленых» технологий в управлении движением поездов с введением классов энергопотребления основана на использовании «умных» электросетей, возобновляемых источников энергии и реализации децентрализованного расположения источников энергоснабжения и средств управления в непосредственной близости к объектам автоматики. Новый подход к построению архитектуры систем управления движением продиктован появлением перспективных информационных технологий, экономическими предпосылками и новыми экологическими нормами.

Развитие современного транспортно-коммуникационного комплекса связано с эффективностью и доступностью энергетических ресурсов. Задача электрификации всей транспортной инфраструктуры решается на протяжении последнего столетия, а ее начало положила третья технологическая революция. Сначала приоритетными были технические решения с использованием постоянного тока, позже они стали уступать место технологиям, ориентированным на использование переменного тока.

Становление транспорта изначально не имело под собой долгосрочной стратегической опоры, все определялось технической и экономической доступностью ресурсов. Однако в наши дни определяющим фактором при выборе той или иной технологии стала ее экологическая безопасность, показателем которой выступает уровень выброса углекислого газа [1]. С помощью этого комплексного показателя можно учитывать прямые и косвенные воздействия на окружающую среду. Сегодня на первый план выходит использование «зеленых» технологий, позволяющих получить максимальную отдачу от энергосбережения и энергоэффективности, в частности для объектов инфраструктуры всех видов транспорта, включая железнодорожный.

В связи с этим в РФ, как и во всем мире, сформирован ряд законодательных актов, нормативов, программ и инициатив [2–8], устанавливающих целевые показатели в части достижения энергосбережения и энергоэффективности. Программы, имеющие горизонт планирования до 50-ти лет, определяют развитие

каждой отрасли, включая и магистральный железнодорожный транспорт.

Для европейских стран основным показателем достижения требуемого энергосбережения и энергоэффективности служит не только общее сокращение потребляемой энергии, но и переход промышленности, включая транспортную сферу, на возобновляемые источники энергии. В России по эффективности и оказанию негативного влияния на окружающую среду доля железнодорожного транспорта составляет около одного процента от всех видов транспорта. РФ является одной из ведущих стран мира по объему электрификации железных дорог — около 43,4 тыс. км [9], однако вследствие применения разных методик в оценке ущерба значение указанного показателя нельзя прямо сравнивать с аналогичными западными оценками.

Таким образом, разработка технологий и методов, позволяющих повысить эффективность использования энергоресурсов на железнодорожном транспорте (как на тягу поездов, так и на другие нужды), весьма актуальна.

## Ключевые показатели энергоэффективности

Проанализируем, какова доля показателя энергоэффективности в общей массе затрат. Существует определенное разделение потребителей энергии. Из мирового потребления энергии 37 % приходится на производственную сферу (промышленность, в частности горнодобывающая, сельское хозяйство, строительство); 20 % — на транспорт; 11 % — на хозяйственные нужды (личное отопление,

освещение, снабжение электроприборов и пр.); 5 % — на коммерческое потребление [10]. Из 20 % энергозатрат, приходящихся на транспорт, на железнодорожный кластер отводится около трети. В ней до 70 % составляют затраты на электропривод рабочих машин (что близко к среднему значению по промышленности — около 60 %).

Рассмотрим подробнее, какие цели энергосбережения и энергоэффективности сейчас установлены в Евросоюзе и РФ применительно к железнодорожному транспорту. В Евросоюзе поставлена задача к 2020 г. снизить вредные выбросы в атмосферу на 20 % по сравнению с 1990 г. Определены краткосрочные и долгосрочные задачи. В частности, на железнодорожном транспорте мероприятия в долгосрочном плане фокусируются на планировании развития инфраструктуры, модальном перераспределении перевозок и обновлении подвижного состава. В краткосрочном плане это мероприятия по обучению машинистов методам вождения поездов, обеспечивающим экономию энергии на тягу [11].

Для решения указанных задач в Евросоюзе сформирована стратегия RailEnergy (инновационные комплексные энергоэффективные решения для железнодорожного подвижного состава, железнодорожного транспорта, инфраструктуры и эксплуатации поездов). Цель этого проекта, спонсируемого Европейской комиссией, заключается в повышении энергоэффективности железнодорожной системы, что способствует и сокращению затрат на обеспечение жизненного цикла транспорта, и уменьшению выбросов углекислого газа [12].

В рамках стратегии RailEnergy предусматривается провести оценку энергетических характеристик всех устройств и транспортных средств с учетом различных условий эксплуатации на основе построения глобальной имитационной модели. Особенности и функции данной модели следующие:

- открытая архитектура для всего спектра потребителей;
- принцип быстрого определения и конфигурирования (так называемая технология Plug & Play) для модулей имитации;
- масштабирование и сепарация — способность разбить глобальную модель по энергоэффективности RailEnergy на элементы;
- поддержка выбора оптимальных комбинаций технических и эксплуата-

ционных решений для экономии затрат на электроэнергию (на всех этапах жизненного цикла);

- специальные модули для оценки вклада новых технических решений, разработанных в рамках RailEnergy;
- обеспечение структурированного вклада для поддержки принятия решений;
- модификация — способность приспособить варианты новых технологий и различные профили нагрузок.

Таким образом, в Евросоюзе математическое моделирование выступает основным инструментом для поиска решений по сокращению энергопотребления, причем рассматриваются не только элементы, но и режимы их работы. Однако до сих пор не определены классы энергоэффективности для систем железнодорожной инфраструктуры.

В РФ относительно железнодорожного транспорта выделяют два направления в стратегии энергоэффективности. Они разделены по принципу отношения к тяговому и нетяговому показателям и включают, в частности, организационные мероприятия.

К тяговым показателям относят:

- повышение энергоэффективности перевозочного процесса;
- совершенствование методов управления движением поездов;
- повышение значений показателей использования локомотивов и показателей системы тягового электроснабжения.

Нетяговые показатели следующие:

- улучшение технического состояния подвижного состава и путевого хозяйства;
- повышение уровня возврата энергии рекуперации на электрической тяге;
- повышение энергоэффективности на нетяговые нужды;
- модернизация и оптимизация режимов работы систем отопления;
- оптимизация режимов работы систем освещения;
- повышение энергетической эффективности технологических процессов.

Обратимся к открытым статистическим данным действующей программы энергосбережения 2012 г. в ОАО «РЖД». По результатам работы компании были достигнуты следующие значения целевых показателей:

- снижение энергоемкости производственной деятельности на 2,7 кг у. т./10 тыс. прив. т-км нетто (–3,8 %);

- повышение энергетической эффективности производственной деятельности на 5,4 прив. т-км нетто/кг у. т. (3,9 %);

- обеспечение экономии топливно-энергетического ресурса (ТЭР) в объеме не менее 1082,6 тыс. т у. т. (в том числе Московская железная дорога — 144 тыс. т у. т., ориентировочно 2,4 млрд кВт·ч энергии;

- снижение выбросов парниковых газов вследствие реализации мероприятий программы в объеме не менее 1,6 млн т CO<sub>2</sub> экв. (в том числе Московская железная дорога — 200 тыс. т CO<sub>2</sub>-экв.);

- число пассажиров, перевезенных Московской железной дорогой, — 717 млн.

Для сравнительной оценки проанализируем идентичные показатели на примере такой страны Евросоюза, как Нидерланды, входящей в группу лидеров по внедрению «зеленых» технологий. Одно из последних достижений в рамках программы энергоэффективности заключается в том, что с 1 января 2017 г. все железнодорожное сообщение Нидерландов стало работать только на чистой, возобновляемой энергии ветра. Общая длина железнодорожных линий составляет 2809 км, 85 % из них электрифицировано (отметим для сравнения, что общая длина Крымской железной дороги, где вполне возможно внедрение «зеленых» технологий на основе энергии Солнца, составляет 1325 км, что более чем вдвое уступает железным дорогам Нидерландов). Крупнейшая железнодорожная компания Нидерландов Nederlandse Spoorwegen (NS) перевозит в год 219 млн пассажиров и тратит на это 1,2 млрд кВт·ч энергии. Эта величина сопоставима с энергетической потребностью всех жилых домов Амстердама (примерно 825 тыс. жителей). Сейчас общая выработка ветряных турбин составляет 7,4 млрд кВт·ч в год, тогда как энергопотребности страны в 2015 г. составляли приблизительно 12,5 млрд кВт·ч. Перевод железных дорог на питание от возобновляемых источников энергии позволит Нидерландам к 2020 г. сократить энергозатраты в пересчете на каждого пассажира на 35 % по сравнению с 2005 г., а выброс парниковых газов уменьшить на 30 %. Это обеспечит сокращение энергопотребления на два процента в год [13, 14] при целевом показателе один процент в год.

Возвращаясь к потреблению электрической энергии железными дорогами России, отметим, что в 2009 г. она составила

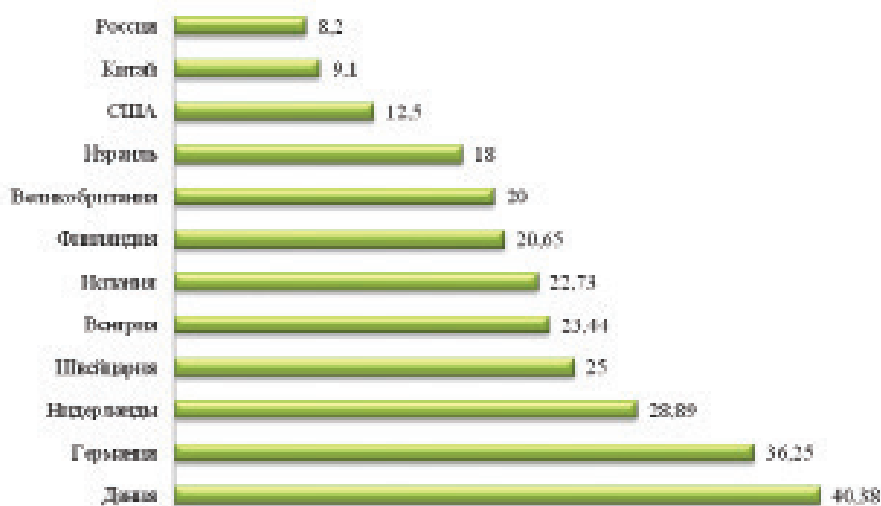


Рис. 1. Стоимость одного киловатта электроэнергии в различных странах (цены США)

42,8 млрд кВт·ч: на тягу поездов — 36,7 на железнодорожные узлы — 6,1 млрд кВт·ч. В структуре электропотребления железных дорог удельный вес расхода электроэнергии на тягу поездов составил 85,8 %, на эксплуатационные нужды — 10,6 %, на прочее потребление — 3,6 %. Доля электропотребления железных дорог от общего объема по России составляет 4,5 % [15].

Приведем основные примеры энергоэффективности на железных дорогах РФ [16]:

- оптимизация тяги за счет введения двенадцатиимпульсных выпрямительных преобразователей (повышают коэффициент мощности до 0,94–0,96, дают экономию до 2,5 % электроэнергии, расходуемой на тягу поездов, а также снижают потребление реактивной энергии в 2,5 раза) позволила сэкономить 11,03 млн кВт·ч электроэнергии за год;
- применение светодиодных систем освещения на четырех железнодорожных станциях сэкономило 3,63 млн кВт·ч электроэнергии за год;
- применение высокомагтовых осветительных установок с экономичными светильниками сэкономило 26,87 млн кВт·ч электроэнергии за год.

Развитию энергоэффективности в России препятствует, в частности, низкая стоимость электрической энергии [17]. Из рис. 1 следует, что стоимость электроэнергии в России в пять раз ниже, чем в Дании, и в 3,5 раза ниже, чем в Нидерландах. Это обстоятельство накладывает свой отпечаток на интенсивность развития и внедрение возобновляемых источников энергии в России.

Проанализируем удельный вес расходов в структуре железнодорожного транспорта. 27,1 % занимают расходы локо-

мотивного хозяйства, 24,9 % — хозяйства пути и 11,8 % — вагонного хозяйства. На долю этих хозяйств приходится 63,8 % общей суммы эксплуатационных расходов железных дорог. Удельный вес расходов распределяется следующим образом [18]:

- пассажирского хозяйства — 8,6 %;
- хозяйства перевозок — 4,5 %;
- сигнализации, централизации, блокировки и связи — 5,1 %;
- электрификации и электроснабжения — 3,8 %;
- грузовой и коммерческой работы — 1,9 %;
- гражданских сооружений, водоснабжения и водоотведения — 2,5 %;
- управления на уровне линейных подразделений дороги — 3,4 %;
- управления дороги и общедорожных организаций 6,0 %.

Очевидно, что доля энергозатрат составляет значительную часть в структуре расходов. После внедрения новых технологических решений можно значительно снизить вес подобных затрат, а также выполнить требования норм по энергоэффективности.

### Классы энергоэффективности для объектов железнодорожного транспорта

Сфокусируем внимание на решении задачи энергоэффективности такой части инфраструктурного комплекса магистрального железнодорожного транспорта, как системы управления движением поездов и, в частности, хозяйство автоматики и телемеханики. Ранее было упомянуто, что до 70 % затрат на транспорте приходится на электропривод рабочих машин. Часть таких машин сосредоточена в хозяйстве автоматики непосред-

ственно в системах управления движением поездов, а именно в стрелочных электроприводах. В России на железных дорогах эксплуатируется более 100 тыс. электроприводов различных марок. Авторами статьи ставятся следующие цели. Во-первых, изменить принципы энергоснабжения электроприводов в системах управления движением. Во-вторых, существенно уменьшить количество и длину кабельных трасс при переводе систем управления электроприводами на беспроводной интерфейс с использованием возобновляемых источников энергии. В-третьих, изменить принципы построения электропитающей установки станции. В-четвертых, ввести классы энергоэффективности для устройств и систем управления движением.

Эти решения позволяют существенно сократить прямые энергозатраты и косвенные, связанные со строительством инфраструктуры и с ее обслуживанием. В России в сфере разработки и производства электродвигателей с 01.06.2012 г. введен в действие национальный стандарт ГОСТ Р 54413–2011 [2], основанный на международном стандарте IEC 60034–30:2008 [5] и устанавливающий четыре класса энергоэффективности двигателей:

- IE 1 — нормальный (стандартный);
- IE 2 — повышенный;
- IE 3 — премиум;
- IE 4 — суперпремиум.

Стандартом предусмотрен ступенчатый переход производства на более высокие классы энергоэффективности. С января 2015 г. все выпускаемые электродвигатели мощностью 0,75–7,5 кВт должны иметь класс энергоэффективности не ниже IE 2, а мощностью 7,5–375 кВт — не ниже IE 3 или IE 2 (с обязательной комплектацией преобразователем частоты). С января 2017 г. все выпускаемые электродвигатели мощностью 0,75–375 кВт должны иметь класс энергоэффективности не ниже IE 3 или IE 2 (допускается при работе в частотно-регулируемом приводе).

Для объективной оценки принципы классификации энергоэффективности, применяемые для нормирования энергопотребления бытовой техники (холодильников, стиральных машин и т. д.), а также зданий, были скопированы и на промышленные устройства, системы и даже комплексно на операторов железнодорожных перевозок (рис. 2). В левой части рис. 2 показан пример классификации энергоэффективности оператора железнодорожных перевозок Нидерландов Nederlandse Spoorwegen (NS)

(класс А), в средней части — здания, в правой части для сравнения — классификатор энергоэффективности на примере стиральной машины (класс В).

Авторами статьи предлагается изменить существующую концепцию энергоснабжения устройств в системах управления (стрелочных электроприводов) на новое техническое решение, чем-то напоминающее использование стратегии питания, ранее известное как местное энергоснабжение [19]. Это позволяет предложить современный подход к реализации систем управления движением — «зеленые» технологии в управлении согласно новой концепции Green Interlocking (технологии GI-XXI).

Для технического решения за прототип взята, пожалуй, самая передовая система — бортовая система питания и управления в электромобиле. Особенность такой системы — питание по шине постоянного тока и управления по CAN-шине. Масштабируя те же принципы обеспечения питания и управления на все объекты — стрелочные электроприводы, расположенные в различных районах станции, можно отказаться от силовых магистральных кабелей от централизованного источника энергоснабжения и линий управления. С учетом взаимного расположения данных элементов можно утверждать, что новая схема питания позволит их объединить в группы, насчитывающие от одного до десяти объектов. Объединение в группу продиктовано как минимизацией потерь при передаче энер-

гии, так и уменьшением сечения кабеля, необходимого для подключения автономного источника питания к объекту управления.

Мощность используемых для железнодорожных приводов двигателей постоянного тока варьируется от 0,1 до 0,25 кВт при напряжении от 30 до 160 В. К главным недостаткам двигателя постоянного тока относят его малую мощность, что особенно существенно при централизованном питании и возросшем тяговом усилии при переводе острия стрелки. Потребность в применении более мощных электродвигателей стрелочных электроприводов напрямую связана с увеличением рабочего тока и необходимостью иметь в каждом проводе линейной цепи по две и более жил кабеля.

По статистике одна из основных причин отказов в работе системы электропитания заключается в нарастающей динамике износа и старения технических средств. Аналогичное положение отмечается для устройств тяговых подстанций: по сроку службы и по фактическому состоянию требуется реконструкция 763 подстанций (54 % общего количества), 3600 (81 %) понижающих и тяговых трансформаторов. Доля технических средств, ненадежных вследствие старения, на ряде дорог достигает 35–45 % общего количества. Очевидно, что такое состояние устройств энергоснабжения, смежных относительно систем управления и устройств автоматики, не может не оказывать негативного влияния на общее состояние надежности перевозочного процесса. Так, весьма показателен

пример Нидерландов, где энергосистема не могла справиться с нагрузкой. Поэтому на протяжении трех лет в стране проводят блок-аут, включая транспортную инфраструктуру аэропортов и железных дорог [20, 21].

### Концепция Green Interlocking

В реализации концепции Green Interlocking, предполагающей использование современных информационных технологий, выделяют несколько стадий. На первой стадии сохраняются традиционные напольные технологические объекты автоматики: рельсовые цепи, светофоры, стрелочные электроприводы. На второй стадии отказываются от традиционных способов передачи информации с помощью светофорной сигнализации, необходимые данные передают непосредственно на бортовые устройства автоматики. Третья стадия — модификация способа позиционирования подвижных единиц и отказ от электрических рельсовых цепей. В итоге из всех средств напольной автоматики сохраняются лишь стрелочные электроприводы.

Предлагаемая авторами концепция питания стрелочных электроприводов требует нескольких элементов для реализации. Система предполагает установку монокристаллических солнечных панелей величиной от трех до десяти кв. м., накопителя на основе литий-железо-фосфатного аккумулятора (LiFePO<sub>4</sub>, LFP) с расчетом обеспечения среднесуточного потребления до 30 кВт·ч и системы управления на

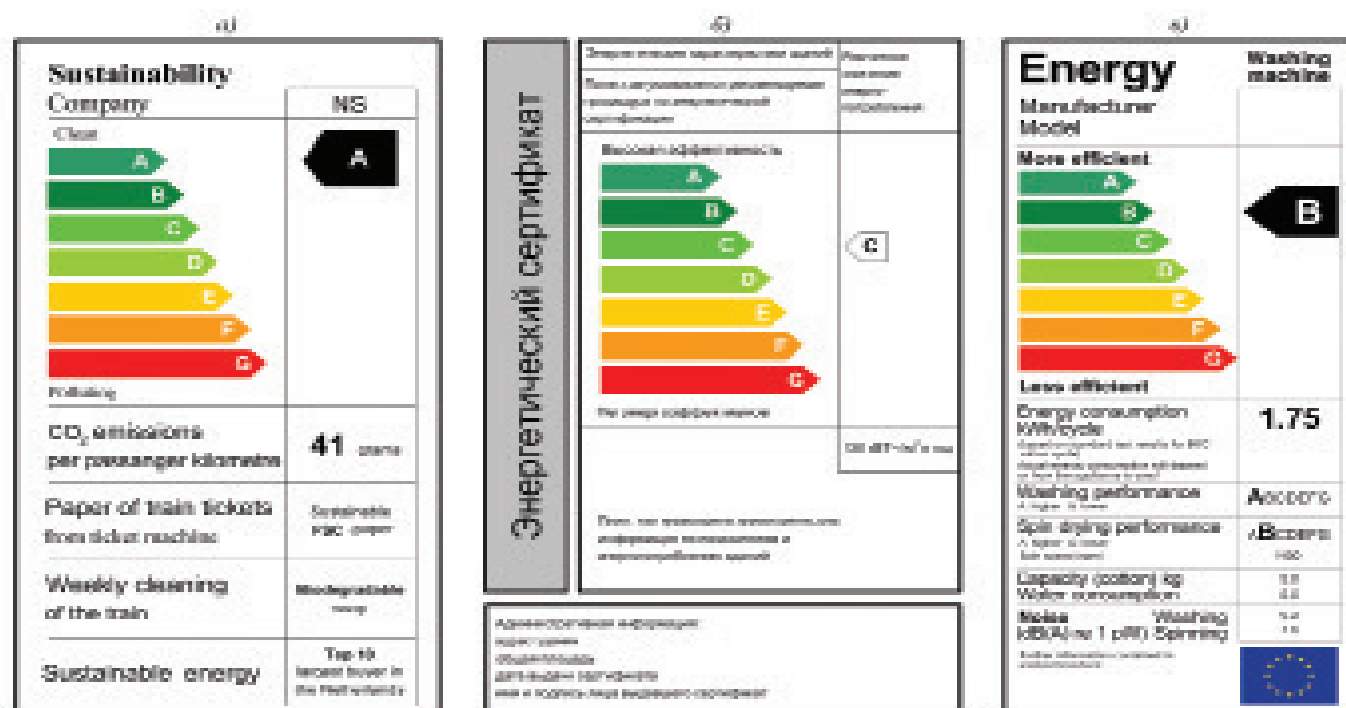


Рис. 2. Классы энергоэффективности в различных областях науки и техники: а) железнодорожная отрасль; б) градостроение; в) бытовая техника

основе дублированной технологии передачи данных симбиоза LI-WI и LoRaWAN.

Система разворачивается следующим образом. Панели могут быть установлены на конструкции опор энергоснабжения либо на жесткие поперечины, тем самым обеспечивается наиболее близкое расположение потребителей (рис. 3). Возможен вариант с установкой панелей непосредственно возле объектов управления (рис. 4).

Система автономного питания легко масштабируется и наращивается. При этом не требуется перекрытия движения и проведения земляных работ. Обслуживание системы и замена элементов в случае отказа сводится к заменам блоков (система является малообслуживаемой). Очевидное преимущество предложенного решения заключается в том, что можно не затрачивать ресурсы на инфраструктуру заранее, «зарывая деньги в землю», а разворачивать ее с учетом фактической потребности, внедряя таким образом в энергетическую систему железнодорожной автоматики концепцию Green Interlocking.

Описанный подход позволяет осуществить переход к новому качеству управления технологическими процессами обслуживания, передачи, распределения и потребления электроэнергии на основе программных интеллектуальных электроэнергетических систем с активной адаптивной сетью. Построенные с использованием технологий Green Interlocking подсистемы электропитания систем управления движением включают следующие сегменты:

- источники электроэнергии, включая установки распределенной генерации;
- различные типы потребителей, принимающих непосредственное участие в регулировании качества электроэнергии и надежности;
- электрические сети разного напряжения и функционального назначения, имеющие развитые возможности адаптации различных типов (изменение параметров и топологии по текущим режимным условиям; оценку эффективности регулирования напряжения в узловых точках, обеспечивающего минимизацию потерь при соблюдении нормативных значений показателей качества электроэнергии; комплексный учет энергии на границах раздела сети и на элементах);
- поддерживающую любые режимы функционирования систему интеллектуального контроля с полномасштабным информационным обеспечением;
- киберзащищенный беспроводной канал, в котором для сообщений используется разработанный криптографический протокол на основе генетического алгоритма в компиляторе для обеспечения его максимальной энергоэффективности и реализованного по примеру шифрованного канала для мессенджера Telegram [22];
- уровень туманных вычислений (fog computing), хранение и передача данных реализованы с использованием блокчейн (blockchain) транзакций.

Следует отметить реализованную авторами программную концепцию Green

Interlocking для систем управления. Вследствие интеллектуального управления с умными сетями электроснабжения (smart grid) система подходит для потребителей с повышенным качеством функционирования и надежности. Кроме того, с помощью системы решается задача классификации данных о повреждаемости оборудования энергетического хозяйства для решения задачи прогнозирования состояния. Реализованные программные методы нечеткой кластеризации позволяют обеспечить более высокую надежность, чем при традиционном централизованном электропитании.

Предложенные в статье инновационные решения оказывают влияние на три составляющие:

1) технико-экономическую, что выражается в значительном сокращении загруженности сетей, устранении потерь, связанных с передачей энергии от источника до потребителя (до 15 % от общего объема); кроме того, очевиден кумулятивный эффект: отказ от строительства значительной площади сетей электроснабжения, что сокращает энергозатраты на сооружение сетей, инженерное обустройство объектов энергоснабжения на всем жизненном цикле;

2) социальную; вследствие использования автономных источников постоянного тока снижается риск травматизма персонала, согласно статистике несчастные случаи занимают первое место в рейтинге [SPR 2016 / Railway safety performance in the European Union, 2016];

3) энергосбережение и энергоэффективность; третий важнейший целевой показатель, непосредственно связанный с соблюдением тех условий, которые перечислены в концепции, принятой в Евросоюзе [Progress Report on energy efficiency in the European Union, 2014], вплоть до максимально жесткого варианта ее реализации, ратифицированной в Дании в рамках Project Zero [Energy Strategy 2050 — from coal, oil and gas to green energy (Denmark), 2011].

Использование предложенного подхода позволяет изменить стратегию содержания устройств железнодорожной автоматики, значительно повысить их ресурс, полностью перейти на обеспечение питанием от возобновляемых источников энергии, что представляет собой необходимое условие по соблюдению представленной программы по сокращению потребления энергии на один процент в год от невозобновляемых источников. Предлагаемое техническое ре-

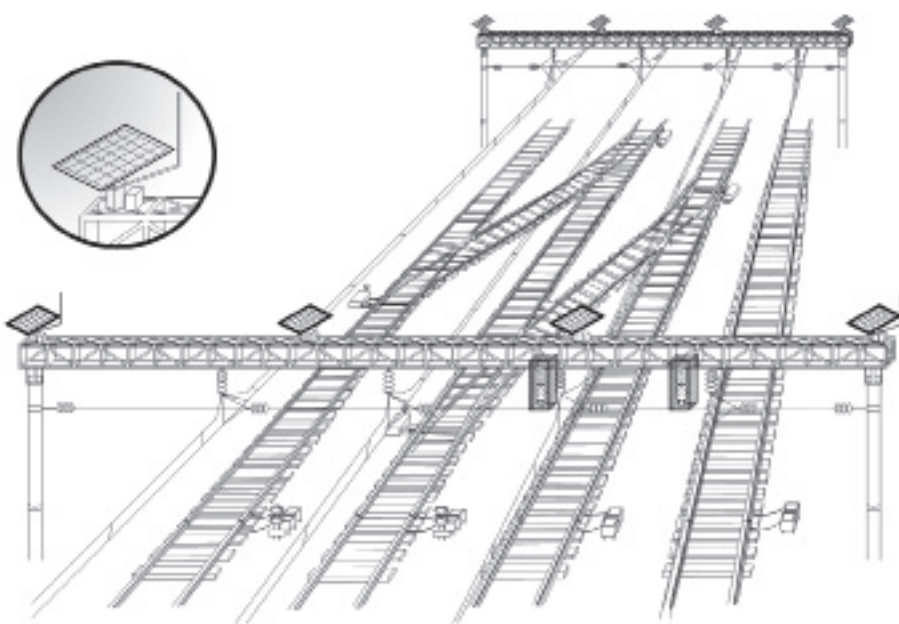


Рис. 3. Установка альтернативного источника энергоснабжения на жесткие поперечины железнодорожной контактной сети

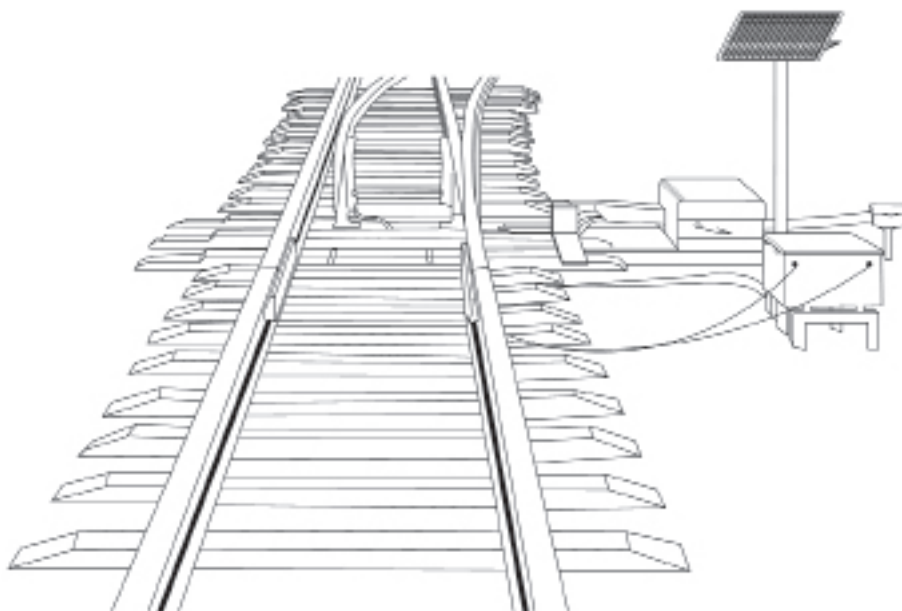


Рис. 4. Установка альтернативного источника энергоснабжения рядом с электроприводом железнодорожной стрелки

шение не только дает возможность исключить до 90 % силовых цепей питания для напольных устройств систем управления, но и представляет комплексное решение для обеспечения передачи данных по беспроводному интерфейсу с использованием технологии IoT с учетом применения в качестве протокола безопасности передачи данных технологии blockchain.

Новые технологии стирают границы между различными устройствами, появляется универсальное устройство, объединяющее в себе функции генерации и управления.

Предложенный авторами революционный подход Green Interlocking дает возможность обеспечить уровень персонализации энергоэффективности для конкретного устройства, установив для каждого объекта автоматика класс энергоэффективности. При этом, очевидно, снизится потребление энергии системами управления движением на железных дорогах, а также изменится способ их технического обслуживания. ■

#### Литература

1. Rail Transport and Environment Facts & Figures., International Union of Railways, Paris, France, November 2008, 40 p.
2. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
3. Geletukha G., Zheliezna T., Prakhovnik A. Analysis of energy strategies of EU and

world countries and role of renewables in their energy systems// UABio Position Paper. № 13. December 1, 2015.

4. Energieperspektiven 2050: Zusammenfassung. – Eidgenössisches Department für, Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Oktober 2013, 36 p.
5. Материалы Австрийского энергетического агентства (Austrian Energy Agency). [Электронный ресурс: <https://www.iea.org/russian/>. Дата обращения 29.03.2019]
6. Energy Policies of IEA Countries – Sweden 2013 Review/ Organization For Economic Co-Operation And Development (Oecd), France, 2013, 182 p.
7. Energy Policies of IEA Countries – Germany 2013 Review/ Organization For Economic Co-Operation And Development (Oecd), France, 2013, 206 p.
8. СТО РЖД 08.017–2012. Система управления энергоэффективностью производственных процессов. Основные положения: введ.01.03.2013. – М., 2013. – 29 с.
9. Efanov D., Osadchy G., Sedykh D. et al. Monitoring System of Vibration Impacts on the Structure of Overhead Catenary of High-Speed Railway Lines // Proceed. 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2016). Yerevan, 2016. P. 201–208. doi: 10.1109/EWDTs.2016.7807691.
10. International Energy Outlook 2014. United States Department of Energy, Washington, DC. – URL: US EIA – 2014 <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/index.cfm> (Дата обращения 30.11.2014).

11. Энергосбережение: текущие задачи и перспективы: по материалам сетевой школы передового опыта // Железн. дор. мира. 2010. № 12. С. 42–44.
12. Facchinetti E. Sustainable and intelligent management of energy for smarter railway systems in Europe: an integrated optimization approach D1.1 Railway network key elements and main sub-systems specification Due date of deliverable – Report, 03.12.2013. – 145 p.
13. Krohn O., Ledbury M., Schwarz H. Rail transport and environment: facts & figures. – CER, Brussels, 2009.
14. Visser M. Renewable Energy in the Netherlands. 2006, 73 p. [Электронный ресурс: <https://research.hanze.nl/en/publications/renewable-energy-in-the-netherlands-march-2016>. Дата обращения 25.03.2019].
15. Не тянуть с экономией // Гудок.15.04.2010.
16. Годовой отчет за 2009 г. ОАО «РЖД».
17. Макаров А. А., Митрова Т. А., Григорьев Л. М. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. – М. : ИНЭИ РАН, АЦ, 2013. – 107 с.
18. Себестоимость железнодорожных перевозок: учеб. для вузов железнодорожного транспорта / Н. Г. Смахова, А. И. Купоров, Ю. Н. Кожевников и др.; под ред. Н. Г. Смаховой, А. И. Купорова. – М. : Маршрут, 2003. – 494 с.
19. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В. Концепция современных систем управления на основе информационных технологий // Автоматика, связь, информатика. – 2018. № 5. С. 20–23.
20. Chaos at Schiphol airport after power cut, flights delayed and cancelled 30/04/2018 DutchNews: [Электронный ресурс: <https://www.dutchnews.nl/news/2018/04/chaos-at-schiphol-airport-after-power-cut-flights-delayed-and-cancelled/>. Дата обращения 25.03.2019].
21. Escritt T. Power returns to Amsterdam after outage hits a million homes 27/03/2015 Reuters/World News [Электронный ресурс: <https://www.reuters.com/article/us-dutch-power-outages/power-returns-to-amsterdam-after-outage-hits-a-million-homes-idUSKBN0MN0UJ20150327>. Дата обращения 25.03.2019]
22. Hsu C. H., Kremer U. The Design, Implementation, and Evaluation of a Compiler Algorithm for CPU Energy Reduction // PLDI '03 Proceedings of the ACM SIGPLAN 2003 conference on Programming language design and implementation, 9–11 June 2003, San Diego, CA, USA, Vol. 38, Issue 5, P. 38–48.