

Нововведения и инновационные процессы в тяговом электроснабжении



В. В. Хананов,
главный инженер
Управления
электрификации
и электроснабжения
Центральной дирекции
инфраструктуры
ОАО «РЖД»



А. Т. Бурков,
доктор техн. наук,
профессор кафедры
«Электроснабжение
железных дорог»
Петербургского
государственного
университета путей
сообщения (ПГУПС)



Д. В. Барч,
аспирант ПГУПС

Перед железными дорогами России стоит широкомасштабная цель обеспечить себе лидирующую позицию на рынке транспортных услуг, полностью удовлетворяя потребности экономики в грузовых и пассажирских перевозках. Эта цель достижима при условии успешного решения задач по повышению энергетической эффективности, экономической и функциональной безопасности и устойчивости отечественного железнодорожного транспорта.

Составляющие инновационного менеджмента, направленного на совершенствование системы электрообеспечения тяги поездов, отражены в коллективных трудах ученых и специалистов Международного симпозиума «Элтранс», проводимого каждые два года в стенах Петербургского государственного университета путей сообщения.

Общие тенденции развития тягового электроснабжения

Электрическая тяга современного железнодорожного транспорта обеспечивает конкурентные показатели перевозочного процесса в условиях выполнения особых требований к качеству электроснабжения. Это объясняется заметными изменениями в условиях эксплуатации и техническом уровне электроподвижного состава, тяговых подстанций, контактной сети и других устройств.

В последнее десятилетие интенсивно развивается технология силовой электроники. На железнодорожном транспорте достижения в данной области привели, например, к постепенной замене традиционных коллекторных двигателей постоянного тока на бесколлекторные асинхронные двигатели трехфазного тока, получающие питание от электронных преобразователей с регулируемым напряжением и частотой. Соответственно, система тягового электроснабжения в новых условиях повышения мощности и скорости движения, достигаемых за счет эффективных средств современного тягового подвижного состава, развивается по об-

щим принципам научно-технического прогресса, способствующим повышению качества электроснабжения тяги поездов.

Прогрессу в силовом, преобразовательном и регулирующем электрооборудовании, с одной стороны, сопутствовал прогресс в измерительной технике и системе технического обслуживания и ремонта. С другой стороны, изменились параметры многих компонентов системы электроснабжения, стали применяться новые материалы и конструкции. Например, получила распространение практика повышенного натяжения контактных проводов для обеспечения требуемых динамических характеристик качественного токосяема при движении высокоскоростных поездов. Разработаны новые материалы проводов электротяговой сети и контактных вставок токоприемников, характеризующиеся высокой сопротивляемостью изнашиванию. На электрифицированных линиях применяются новые энергетические комплексы с управляемыми преобразователями, обеспечивающими требуемый уровень напряжения у токоприемников движущихся поездов. Намечались тенденции к повышению уровня напряжения в контактной сети.

Общие направления в развитии электроснабжения железных дорог в мире связаны с совершенствованием устройств системы постоянного тока напряжением 3,0 кВ и переменного тока напряжением 25 кВ, 50 Гц (рис. 1).

Система постоянного тока является традиционной для большинства железных дорог в мире. В настоящее время она используется на ранее электрифици-

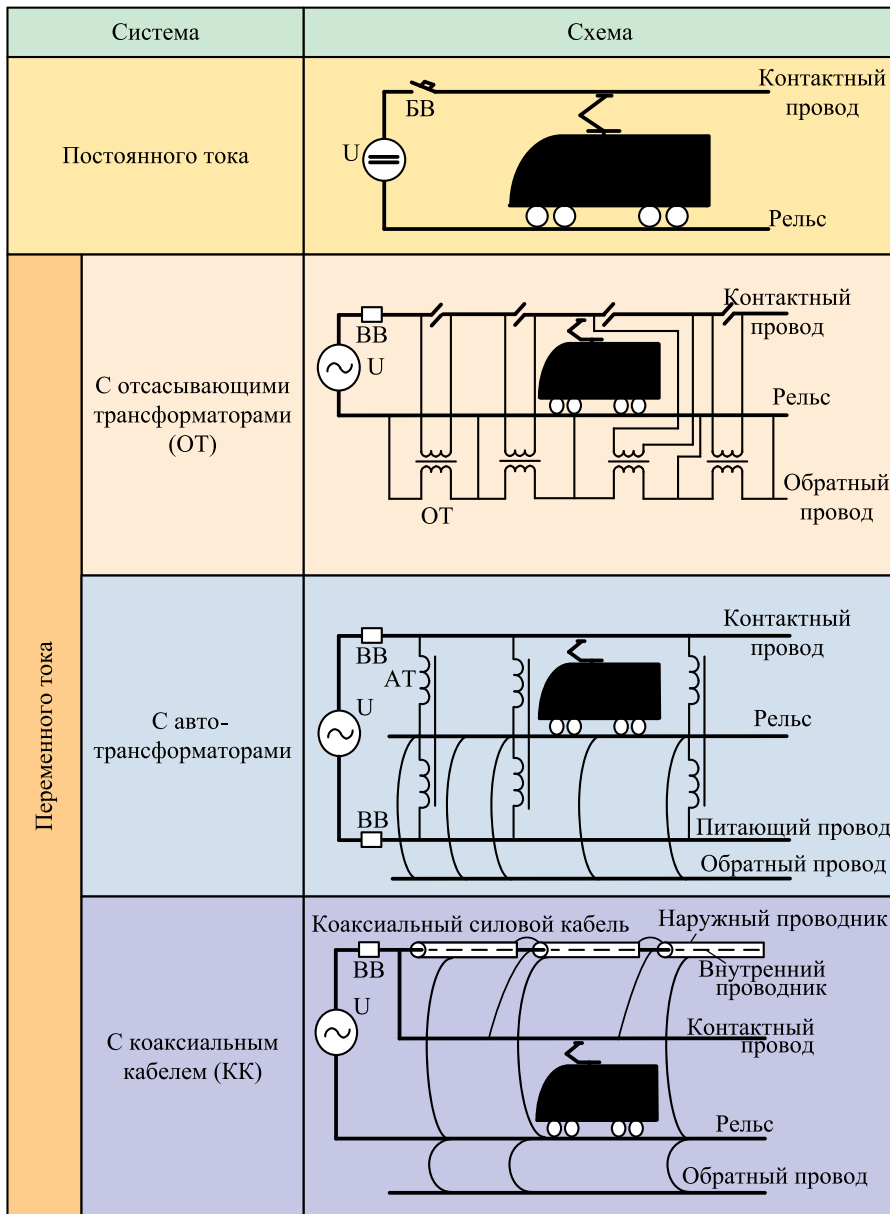


Рис. 1. Принципиальные схемы систем тягового электроснабжения в мировой практике

цированных линиях. Совершенствование данной системы достигается путем применения трехпроводной системы питания с продольной линией высокого напряжения (6 кВ и выше, до 18–24 кВ) с помощью преобразовательных пунктов для подведения питания в контактную сеть 3 кВ. Такая конфигурация относится к классу распределенных систем, обеспечивающих усиление электроснабжения грузонапряженных электрифицированных линий постоянного тока.

Для удовлетворения потребностей движения поездов, характеризующегося растущей интенсивностью, предложены и развиваются системы электрификации железных дорог однофазного переменного тока промышленной частоты. Простые системы с

трансформаторами по схеме Скотта и трехфазными трансформаторами, контактными и усиливающими проводами и рельсовой обратной сетью начали применяться с 1950-х гг. Затем на первых линиях с повышенной интенсивностью использовались системы с отсасывающими трансформаторами (ОТ), экранирующими и усиливающими проводами. Очередной шаг в развитии переменного тока — это система трехпроводной распределенной схемы питания с автотрансформаторами (АТ), питающим и контактными проводами, рельсовой сетью с обратным проводом (система 2 × 25 кВ). Наконец, новым этапом в совершенствовании электротяговой сети стало применение коаксиального кабеля (КК), наружный проводник которого соединен с рельсовой сетью, а внутрен-

ний — с контактными проводами.

Модифицированные системы переменного тока позволили значительно увеличить расстояние между подстанциями, снизить потери в контактной сети и уменьшить напряженность электрического и магнитного полей в зоне влияния контактной сети, повысить скорость движения пассажирских экспрессов до 300–350 км/ч.

В настоящее время эксплуатационная длина электрифицированного полигона российских железных дорог — 43,2 тыс. км (развернутая длина контактной сети — 119,3 тыс. км), что составляет 50,6 % от общей протяженности сети железных дорог России. По протяженности электрифицированных железных дорог наша страна занимает первое место в мире. По электрифицированным линиям российских железных дорог доставляется более 85 % грузов. При этом по системе переменного тока 25кВ 50Гц работает 24,7 тыс. км (около 57 % полигона электрификации). Большая часть этих линий электрифицирована по простой схеме с трехфазными трансформаторами без ОТ, АТ и КК.

Факторы, влияющие на электрическую нагрузку высокоскоростных и грузонапряженных линий

Взаимосвязь факторов, определяющих нагрузку грузонапряженных и высокоскоростных линий, и вытекающая из этого необходимость в новых подходах к концепции системы тягового электроснабжения отражены на схеме (рис. 2).

С развитием грузонапряженного и высокоскоростного пассажирского движения характер тяговых нагрузок и исходные параметры для проектирования изменились. Время движения тягового подвижного состава по межподстанционной зоне сократилось, а высокая установленная мощность электровозов и электропоездов привела к возникновению пиков нагрузочных токов. Обусловленные импульсными нагрузками режимы уже не соответствуют среднестатистическим нагрузкам, с ориентацией на которые выбирались элементы тяговых подстанций, особенно трансформаторы и выпрямители, узлы контактной сети, в том числе провода контактных подвесок.

Статистические варианты исследования электропотребления с использованием приведенной модели

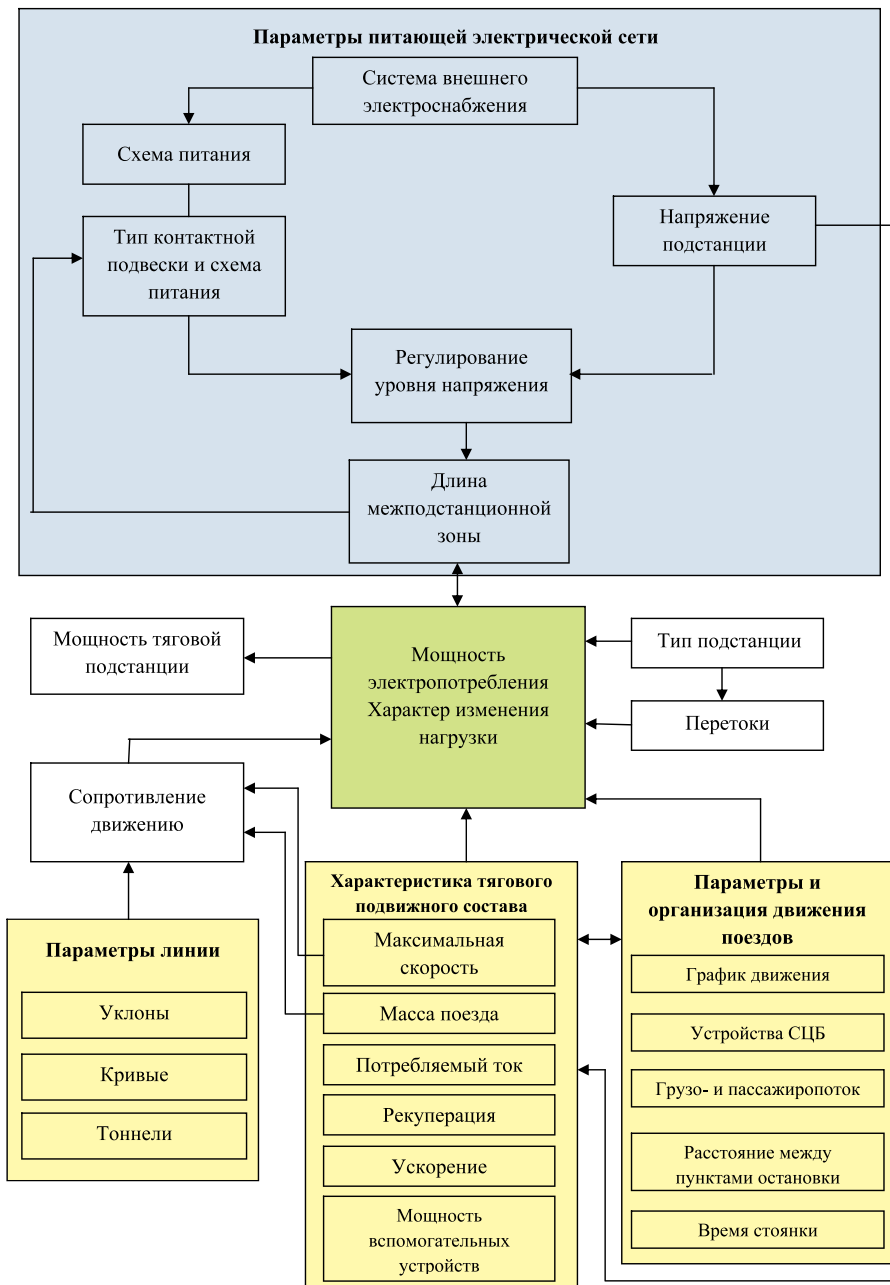


Рис. 2. Взаимодействие факторов, влияющих на характер и мощность нагрузок электротяговой сети

влияющих факторов [1] и опытных данных по высокоскоростным линиям позволили выявить закономерности формирования нагрузок при наличии тактовых графиков движения. Эти нагрузки не могут быть отображены в виде случайных значений теоретической функции распределения, как при обычных графиках. Отображение характера нагрузки при тактовом графике, в том числе при высокоскоростном движении, можно получить методом математического моделирования. Упрощенное отображение нагрузок может быть использовано для оценочных приближенных расчетов параметров электротяговой сети и ее компонентов, в том числе тяговых

подстанций.

В результате моделирования получены кривые изменения во времени тока I или полной мощности S на шинах тяговой подстанции или в зоне питающих линий. Функции $I(t)$ и $S(t)$ являются исходными величинами для расчета устройств электроснабжения. На рис. 3 приведен пример, демонстрирующий особенность формирования графиков токовой нагрузки контактной подвески, питающих линий и оборудования тяговых подстанций на линии переменного тока 25 кВ 50Гц [2].

Тепловая нагрузка проводов контактной сети и других токоведущих элементов электроснабжения может быть вычислена по графикам нагрузки (рис.

3а, б). Определение нагрузок этим методом достаточно трудоемко. Удобнее воспользоваться кривыми длительности действия нагрузки текущего значения (рис. 3в). Алгоритм расчетов по кривым длительности заключается в следующем:

- исходной является реальная временная зависимость нагрузки $I(t)$ или $S(t)$, обычно представляемая в виде дискретных величин с определенной шириной шага по времени t_D ;
 - определяется временной интервал (окно) шириной t^* , которое перемещается вдоль всего графика $I(t)$ продолжительностью T_c шагом t_D ;
 - для каждой позиции окна времени t^* рассчитывается среднее значение нагрузки. Найденное максимальное среднее значение нагрузки $I_{\text{макс}}$ или полной мощности $S_{\text{макс}}$ заносится в память компьютера вместе с шириной окна t^* :
- $$I_{\text{макс}}(t^*) = \max \left(\frac{1}{t^*} \sum_{i=t}^{t+t^*} |I_i| \cdot t_D \right);$$
- ширина окна варьируется от минимально возможного значения t_D до максимально возможного $t^* = T$;
 - в итоге получают функцию максимальных средних значений нагрузки, представленную шириной окна t^* . Такая функция названа уплотненной по времени функцией длительности нагрузки в средних значениях, или графиком пиковых значений.

Для формирования кривой длительности эффективных значений нагрузки используется аналогичная методика:

$$I_{\text{эф.макс}}(t^*) = \max \left(\sqrt{\frac{1}{t^*} \sum_{i=t}^{t+t^*} I_i^2 \cdot t_D} \right),$$

где $0 \leq t \leq (T - t^*)$ и $t_D \leq t^* \leq T$.

По уплотненной функции длительности нагрузки (например, полной мощности подстанции S) строится упрощенная кривая путем аппроксимации по характерным точкам (рис. 3в) с градацией по длительности их действия (рис. 4). При уменьшении тактового интервала увеличивается максимальная кратковременная нагрузка, возрастает длительность максимальных нагрузок и увеличивается длительная нагрузка.

С помощью упрощенной кривой нагрузки удаётся исследовать все факторы, влияющие на характерные точки. При этом особое значение имеют те величины, которые могут быть отнесены к

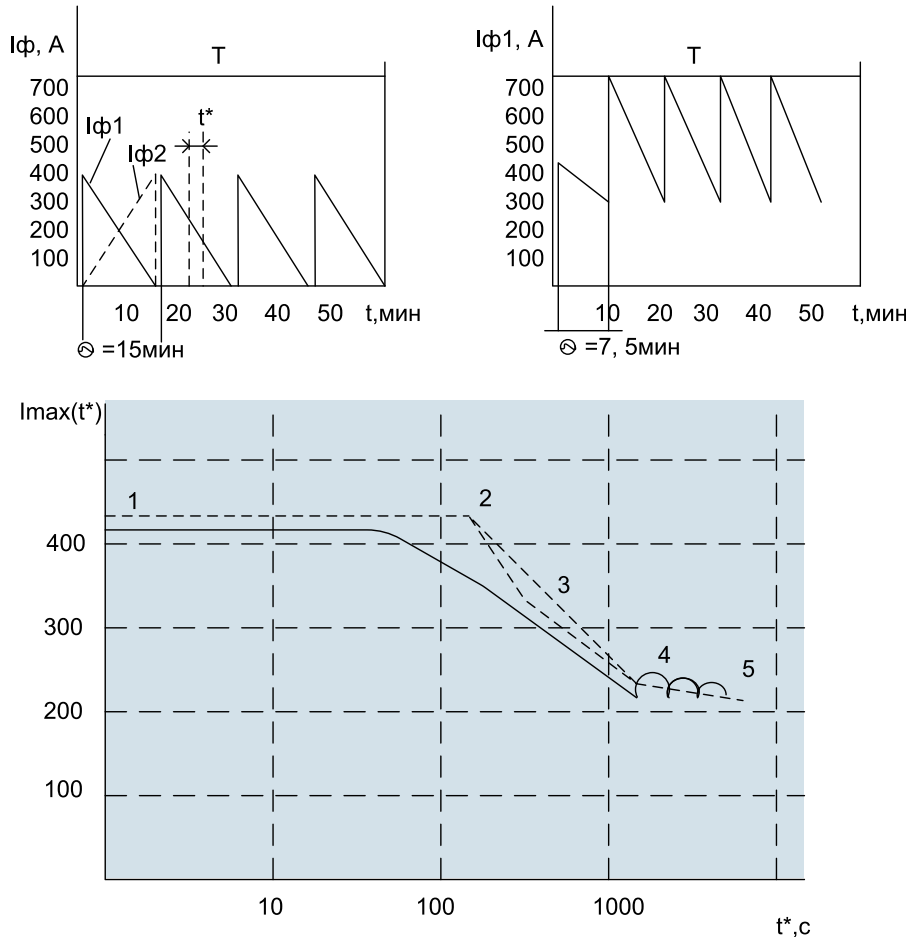


Рис. 3. Формирование токовых нагрузок тягового электроснабжения при пакетном графике движения со скоростью 250 км/ч и токами 430 А: а) при интервале 15 мин; б) при интервале 7,5 мин; в) функция длительности токовой нагрузки в средних значениях при интервале 15 мин. 1–5 – характерные точки для аппроксимации функции длительной нагрузки.

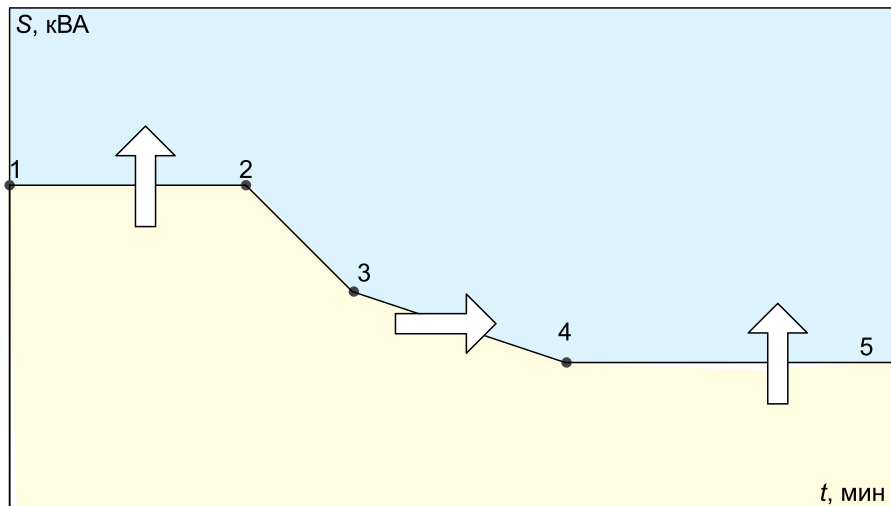


Рис. 4. Аппроксимированная кривая длительности нагрузки и влияния длительности межпоездного (тактового) интервала на ее характер

одной из категорий эксплуатационных параметров (рис. 1). Решающее влияние оказывает тактовый интервал.

Следующими по степени влияния нагрузки являются расстояние между подстанциями, вид системы тягового электроснабжения и разница в мощностях, по-

требляемой обращающимися поездами. Рассмотренный метод имеет преимущества при оценке вариантов в процессе проектирования. Для точного расчета следует применять пакеты программ моделирования систем тягового электроснабжения.

При проходе высокоскоростного

поезда по межподстанционной зоне напряжение у токоприемника непрерывно изменяется. Среднее полезное напряжение за время прохождения поезда или пакета поездов равно:

$$U_{\text{СП}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{Xi}} \int_0^{t_{Xi}} U_{\text{П}i} \cdot I_{\text{П}i} \cdot dt}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{Xi}} \int_0^{t_{Xi}} I_{\text{П}i} dt},$$

где $U_{\text{П}i}, I_{\text{П}i}, t_{Xi}$ — напряжение поездов, ток поезда, время хода по участку для поезда i соответственно;

n — число поездов в пакете.

Среднее полезное напряжение $U_{\text{СП}}$ является информационным параметром, наиболее точно отражающим качество электрического питания высокоскоростных поездов. Благодаря контролю уровня напряжения $U_{\text{СП}}$ при моделировании процесса перевозок определяются главные параметры тягового электроснабжения, включая род тока, мощность источников питания и тяговых подстанций, схему питания и секционирования, марку проводов и тип контактной подвески.

Совершенствование электроснабжения тяги поездов в системе интегрированной информационной среды

Инновационное развитие включает в себя такие понятия, как «собственно нововведения» и «инновационные процессы».

Слова «новшество», «новация», «нововведение», «инновация» в употребительном значении являются синонимами, однако как термины в области инновационной деятельности они означают отдельные компоненты этой деятельности в разных ее сферах: рынка новшеств (новаций), рынка капитала (инвестиций), рынка чистой конкуренции нововведений (инноваций).

Основным товаром рынка новшеств (новаций) является научный и научно-технический результат — продукт интеллектуальной деятельности, на который распространяются авторские и аналогичные права в соответствии с законодательными и нормативными актами. Процесс перевода новшества (новации) в нововведение (инновацию) требует затрат различных ресурсов, основными из которых являются инвестиции и время [2].

Под инновациями в широком понимании подразумевается рентабель-

ное (прибыльное) использование новшеств — новых технологий, видов продукции и услуг, организационно-технических и социально-экономических решений производственного, финансового, коммерческого, административного или иного характера.

Жизненным циклом инновации принято называть период, который начинается с зарождения идеи, включает в себя этапы фундаментальных и прикладных исследований, проектно-конструкторских разработок, создания и распространения новшества и завершается с началом его использования. Жизненный цикл в своей последовательности составляет инновационный процесс.

В рамках данных классических понятий применительно к электроэнергетической инфраструктуре железнодорожного транспорта важно определить условия рентабельного производства и обеспечения отрасли устройствами

электрообеспечения, необходимыми для надежной и энергоэффективной тяги.

Хозяйство электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» представляет собой сложную электроэнергетическую систему, развитие техники и технологий которой сопровождается рядом противоречий, характерных для всей мировой энергетики в целом и для электротяговой энергетики в частности [3]. В их числе:

- возрастание энергоёмкости производства и усиливающиеся требования к его энергетической эффективности;
- увеличение стоимости меди, алюминия, стали и столь же быстрое снижение цен на продукцию высоких технологий, системы обработки информации и передачи данных;
- соотношение удельных капитальных затрат на сооружение новых объектов и эксплуатационных расходов на содержание существующих тяговых подстанций и электротяговой сети;

- увеличение разрыва между показателями надежности и энергетической эффективности основного электрооборудования выпуска 1970–80-х гг. и современного оборудования.

В существующих экономических условиях увеличение вклада электроэнергетики в обеспечение конкурентоспособности железнодорожных перевозок можно обеспечить именно путем разрешения указанных противоречий на основе инноваций при создании электротехнической продукции, технологии преобразования и передачи электроэнергии и технологий управления. На рис. 5 приведена структурная схема управления конкурентоспособностью в электротяговой энергетике, составленная на базе концепции технологий интегрированной информационной поддержки (ИПИ-технологий) в рамках решения задач обеспечения качества и конкурентности продукции [4]. Здесь заложена оценка конкурентности на основе соотношения «цена (L) – качество (Q)».

Технические средства и процессы энергообеспечения с одной стороны и процессы эксплуатации, технического обслуживания и ремонта с другой объединены в единую логистическую систему: системы менеджмента ресурсов (СМР, ИСО15531), менеджмента качества (СМК, ИСО9000) и интегрированной логистической поддержки (ИЛП).

В многоконтурной системе контуры СМР и СМК отражают технические инновации.

В СМК включены электротехническая продукция и процессы преобразования и передачи электроэнергии к потребителям. Целью инновационных процессов является достижение максимума по Q.

В СМР входят эти же процессы, и целью является достижение минимума по L.

В ИЛП объединены процессы эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, а также технические инновации и процессы преобразования и передачи электрической энергии с обеспечением надежности, ремонтнопригодности и эксплуатационных технологий. В качестве инструментальных средств используются специализированные средства создания и ведения электронной документации. Целью подсистемы ИЛП является снижение затрат на эксплуатационных стадиях жизненного цикла, т. е. в конечном счете величина L.

В сфере ИПИ-технологий систематизировано все многообразие про-

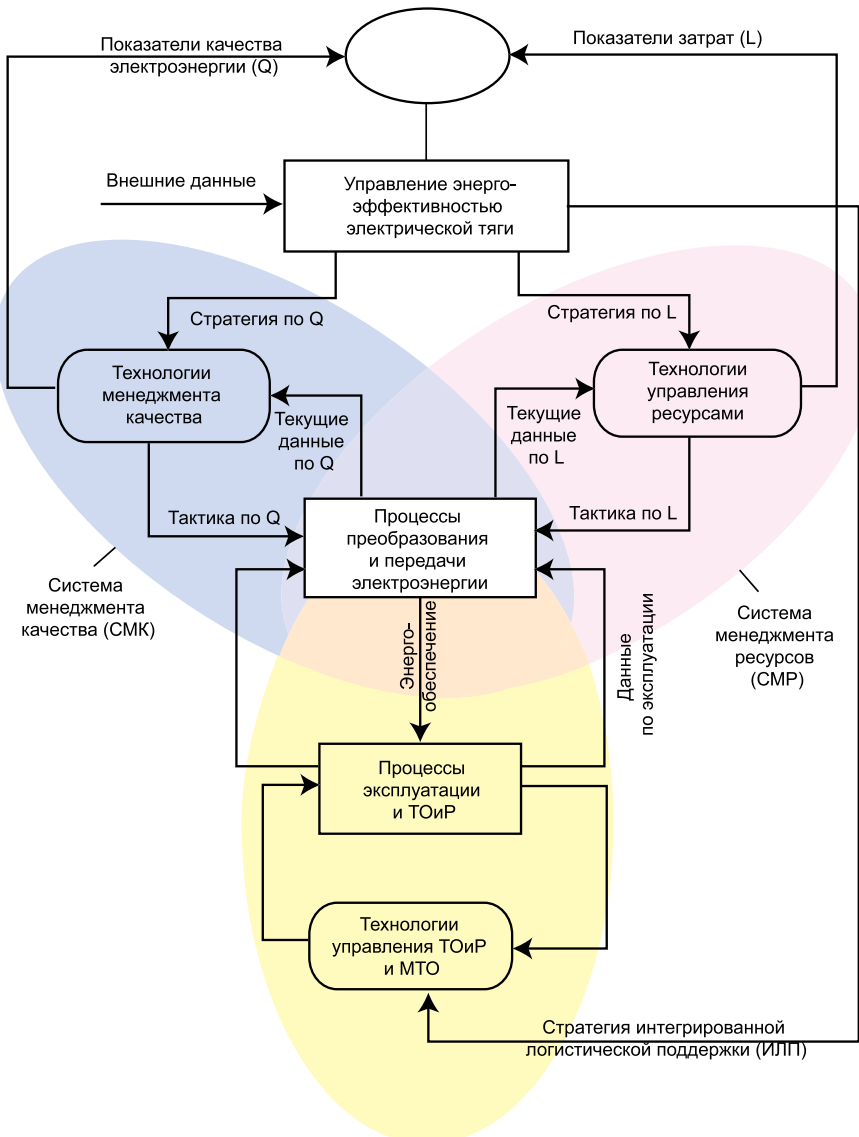


Рис. 5. Концептуальная схема управления в электротяговой энергетике

дукции, относящейся к устройствам электроснабжения, — с учетом функционального назначения, с выделением устройств контактной сети, тяговых подстанций, устройств нетягового электроснабжения, устройств контроля и диагностики.

Рассматривая инновационную продукцию контактной сети, следует выделить:

- низколегированные магнием медные и бронзовые контактные провода;
- новые модификации контактной сети на основе проектов КС-160 и КС-250 для различных условий эксплуатации;
- демонтажно-раскаточные комплексы;
- средства и технологии для демонтажа и утилизации опор.

Наивысший инновационный потенциал этих видов продукции обусловлен тем, что они позволяют достичь масштабного снижения капитальных затрат на строительство и реконструкцию объектов, а также позитивно влияют на показатели надежности.

Применительно к тяговым подстанциям важнейшими видами инновационных устройств являются:

- сухие трансформаторы;
- комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией;
- устройства компенсации реактивной мощности;
- функциональные системы технического диагностирования силовых трансформаторов.

Важнейшей составляющей инноваций электроснабжения являются технико-логистические инновации.

Все средства и устройства тестового и функционального диагностирования, которые служат для повышения надежности разного рода устройств, базирующихся на различных физических принципах, позволяют решать такие общие задачи, как:

- автоматизация сбора, передачи и анализа данных;
- углубление контроля качества проведения ремонта технических средств;
- расширение сферы контроля технического состояния устройств электроснабжения;
- переход от планово-предупредительного ремонта к ремонту по фактическому состоянию;
- оценка качества ремонта технических средств.

Наряду со средствами технического диагностирования среди инноваций технико-логистического характера выделяются технологии сооружения объектов, прежде всего тяговых подстанций на базе мобильных зданий.

Следующим по значимости видом инноваций являются инновации организационно-управленческого характера, базирующиеся на процессах оптимальной организации производства. Важно отметить, что данный вид инноваций подразумевает в числе прочего преодоление инерции руководителей, специалистов, проектировщиков и работников эксплуатации.

Инновации информационного характера направлены главным образом

на повышение достоверности и оперативности получения данных.

При системном применении всего нормативного, методического, технологического и программно-технического комплекса интегральной информационной поддержки в условиях разумно расходуемых ресурсов возможно дальнейшее совершенствование электроэнергетической инфраструктуры железнодорожного транспорта, которое будет осуществляться на базе инноваций в продукции и инновационных технологических процессов на протяжении жизненного цикла оборудования. **□**

Литература

1. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт. Системы и устройства. Подвижной состав. Организация перевозок. (Обобщение отечественного и зарубежного опыта.) Т. 2. СПб.: Информационный центр «Выбор», 2003. 448 с.
2. Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте. Мат-лы V Междунар. симп. «Элтранс-2009», 20–23 октября 2009 г. СПб.: ПГУПС, 2010. 637 с.
3. Концепция развития и внедрения технического диагностирования в хозяйстве электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» от 15.09.2011 г., № 00-02-06/2252
4. Схема управления эффективностью поставок. Руководство по оценке стоимости жизненного цикла продукции (LCC). Стандарт ОАО «РЖД» СТО РЖД 1.05.509.15-2008.

Специализированное издание
о достижениях отечественной науки
и производства по всем видам транспорта

НАУКА и ТРАНСПОРТ

Целевая аудитория —
ведущие специалисты
транспортного комплекса
и смежных отраслей.

График выхода издания и темы номеров:
29.03.2013 **Морской и речной транспорт**
31.05.2013 **Модернизация железнодорожного транспорта**
16.08.2013 **Гражданская авиация**
15.11.2013 **Транспортное строительство**

Тираж 7000 экз.
Формат А4
Полноцветная печать

По вопросам подписки и размещения рекламы обращайтесь в редакцию:
ООО «Т-ПРЕССА», 190031, Санкт-Петербург, Московский пр. д.9, офис 8-149
Тел. (812)310-40-97 www.rostransport.com