

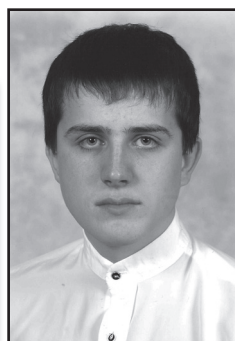
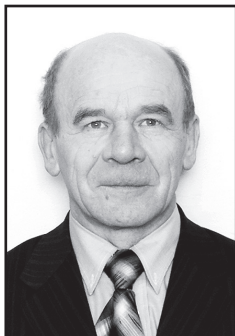


Выбор параметров двухсистемного грузового электровоза



Юрий ИНЬКОВ
Yuri M. INKOV

Виктор ЛИТОВЧЕНКО
Viktor V. LITOVCHENKO



Дмитрий НАЗАРОВ
Dmitry V. NAZAROV

Валерий ФЕОКТИСТОВ
Valery P. FEOKTISTOV



В статье приведены классификация параметров электровозов с комментарием по поводу действующих ограничений и структурная схема двухсистемного электровоза. Показаны способы формирования его грузового варианта на базе гибкого типажа с учетом различных групп параметров. При этом подчеркивается, что надежность локомотива оценивают по большому количеству показателей, но главным среди них остается коэффициент готовности, который вычисляется за фиксированный промежуток времени между капитальными ремонтами и на уровне нормы предполагает сейчас 0,95. Эту цифру авторы считают пригодной и на перспективу.

Ключевые слова: двухсистемный электровоз, параметры, структурная схема, гибкий типаж, железная дорога.

Иньков Юрий Моисеевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Литовченко Виктор Васильевич — кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия. Назаров Дмитрий Валерьевич — аспирант МИИТ, Москва, Россия.

Феоктистов Валерий Павлович — доктор технических наук, профессор МИИТ, Москва, Россия.

Классификация параметров электровозов с учётом действующих ограничений дана в таблице 1. Фактически многие из них достаточно инерционны с точки зрения каких-либо изменений в перспективе или закреплены действующими нормативными документами и опытом эксплуатации. Анализ развития железнодорожного транспорта, между тем, позволяет обосновывать базовые параметры на перспективу, что связано в первую очередь с задачей установить нормативный срок эксплуатации (ресурс).

Первые электровозы имели ресурс 50 лет, потом он был снижен до 30–35 лет, что объясняется моральным старением оборудования, в основном электрического. Однако его замену можно выполнить при

заводских ремонтах. Кроме того, начали широко применять капитальный ремонт с продлением ресурса на 15 лет (КРП). Сейчас КРП выполняется для электровозов ЧС2 и ВЛ10. И эти факторы должны быть учтены при обосновании ресурса.

Особо сложно будет учесть разнообразные условия эксплуатации с учётом того, что вся сеть дорог с электрической тягой должна обслуживаться минимальным числом типов электровозов, в идеале — одним типом. Важным здесь является то, что изначально задан двухсистемный электровоз, поскольку обе системы электрической тяги (постоянный ток 3 кВ и переменный ток 25 кВ) сохраняются и в дальнейшем. При этом опыт зарубежного и отечественного электровозостроения (ЭП10, ЭП20, 2ЭС5) показывает, что современная электротехника в сочетании с асинхронными тяговыми двигателями способна обеспечивать выпуск грузовых локомотивов с мощностью до 1200–1300 кВт/ось. Причем проектирование двухсистемного электровоза должно учитывать возможность производства на его базе односистемных электровозов постоянного и переменного тока, как на базе ЭП10 были предусмотрены варианты ЭП2 и ЭП3.

ВАРИАНТЫ ГИБКОГО ТИПАЖА

Проблема универсального электровоза, то есть приспособляемого к различным условиям грузового движения, решается на базе гибкого типажа (таблица 2). При этом можно формировать электровоз из различного числа однотипных секций. Между крайними секциями, которые имеют кабины управления, могут быть установлены одна-две такие же секции (ВЛ11, ВЛ80С) или бустерные секции без кабин управления, но полностью унифицированные с крайними секциями. (2ЭС5К). Применение бустерных секций характерно для железных дорог США (в тепловозной тяге). Это дает определенные преимущества, поскольку бустер дешевле секции с кабиной управления на 15–20%, но имеются и недостатки. Они связаны с ситуацией, когда 3-секционные электровозы передислоцируют в другие депо, где необходимо перестраивать их в 2-секционные.

В конечном счете принятие решения по бустерам для перспективных электро-

возов зависит не столько от экономических соображений, сколько от фактора стабильности грузопотоков во времени и пространстве. Поэтому при выборе типажа нужно учесть и прогноз развития основных грузообразующих отраслей промышленности (металлургия, тяжелое машиностроение, заготовка леса). В любом случае рассматривать варианты гибкого типажа следует, принимая во внимание всю совокупность существующих сегодня условий.

Вариант на базе 4-осных секций фактически уже реализован с абсолютно идентичными секциями (ВЛ11, ВЛ80С) и применением бустерных секций в середине сцепа (2ЭС5К). При этом возможное число осей электровоза 8, 12, 16. Широко используют составность 8 и 12 осей, то есть две или три секции. 12-осные электровозы 2ЭС5 с бустерной секцией также имеют большой полигон эксплуатации (Транссибирская магистраль и БАМ). Поскольку здесь отмечается самый большой рост перевозок, потребность в них будет стабильной.

Вариант на базе 6-осных секций обеспечивает формирование 2-секционных 12-осных электровозов (ВЛ85, ВЛ15). Возможно подключение третьей секции (18 осей), но здесь накладывается ограничение по прочности автосцепки 120 тс. Поэтому при необходимости увеличения силы тяги на горных участках следует использовать подталкивание с подстановкой дополнительного электровоза в хвост состава, что делается обычно на Транссибирской магистрали.

В программах развития ОАО «РЖД» предусмотрено введение составных поездов со схемами формирования ЭСЭС (Э — электровоз, С — состав из грузовых вагонов) массой до 2·6000 т или массой до 3·6000 т. Для реализации идеи составных поездов в большинстве случаев достаточны 8-осные электровозы с телеуправлением по радиоканалу (СМЕТ-Р), которое было опробовано на Московско-Рязанском отделении на поездах Э2СЭ, где 2С — 12 тыс. т.

Если на горных участках ($i = 16–25\%$) будет фигурировать указанная весовая норма, то требуются 12-осные электровозы. То есть сфера применения электровозов на базе 6-осных секций (ВЛ85 и ВЛ15)





сохраняется в перспективе для горных участков, которые имеются на большинстве тяговых плеч Транссибирской магистрали и БАМа, а также на уральских перевалах. Но при этом заводам придется выпускать два типа электровозов постоянного и два типа переменного тока или два типа двухсистемных электровозов, что отразится на их цене.

Вариант на базе совместного использования 4- и 6-осных секций тоже рассматривается в научных работах по гибкому типуажу. Причем можно формировать электровозы с числом осей 8 (4+4), 10 (4+6), 12 (6+6), 14 (4+4+6), 16 (6+6+4), 18 (6+6+6), для всех этих случаев типажный шаг равен 2. Однако такой вариант сложен с точки зрения производства, ремонта и эксплуатации.

Вариант на базе 8-осной секции не включен в классификацию в таблице 2 ввиду достаточно редкой его реализации на локомотивах, хотя 8-осное исполнение используется для грузовых вагонов. Что касается локомотивов, то единственным примером серийного исполнения являются тепловозы ТЭП-80 с осевой формулой (2+2—2+2); их выпущено более 100 единиц. Тот же Коломенский завод изготовил два электровоза ЭП200 с такой же осевой формулой. Зарубежных precedентов нет, кроме проекта завода «Шкода» (электровоз ЧС12, реализованный только в макетном образце).

Для грузовых электровозов этот вариант не годится из-за невозможности формирования гибкого типажа.

Таким образом, на перспективу следует рекомендовать вариант на базе 4-осных секций.

ПОСТОЯННЫЕ ПАРАМЕТРЫ (ГРУППА 1)

Вернемся к таблице 1, где согласно классификации параметры перспективного грузового электровоза делятся на постоянные, условно-постоянные и варьируемые. Постоянные, имея в виду их отношение к физической природе, включают коэффициент сцепления и температурный диапазон.

Коэффициент сцепления отражает процессы в зоне контакта колеса и рельса. Он во многом зависит от формы контактируе-

мых поверхностей, скорости вращения колеса (точнее, скорости перемещения контактной зоны), силы сжатия в этой зоне и др. Существенно влияние загрязнения контактируемых поверхностей, в том числе их увлажнение. Теоретически этот коэффициент можно измерить только на лабораторном стенде, где удастся задавать силу нажатия колеса на рельс, скорость перемещения контактной зоны, загрязнение контактируемых поверхностей, форму головки рельса и рабочей поверхности колеса.

Реально на электровозе имеем коэффициент тяги K_T , то есть отношение максимальной силы тяги на ободу колес к весу локомотива:

$$K_T = \frac{F_{k-\max}}{P}; K_{i-сц} = \frac{F_{i-кп}}{q_{i-кп}}; K_T < K_{сц},$$

где K_T — коэффициент тяги;

$K_{i-сц}$ — коэффициент сцепления для i -й оси;

$F_{k-\max}$ — максимальная касательная сила тяги локомотива;

P — вес локомотива;

$F_{i-кп}, q_{i-кп}$ — максимальная сила тяги колесной пары и нагрузка от нее на рельсы.

Снижение K_T по отношению к $K_{сц}$ связано с изменением осевых нагрузок (качество развески локомотива, динамическое перераспределение нагрузки колес при движении из-за неровностей пути и по причине опрокидывающего момента при действии сил тяги и торможения). Заметно также влияние загрязнений контактной зоны, колебаний в рессорном подвешивании, поперечных усилий — например, в кривых участках пути. Однако в инструкциях МПС и РЖД, а также в учебной литературе и даже часто в научных изданиях обычно употребляют только термин «коэффициент сцепления», в том числе и имея в виду «коэффициент тяги». Допустим, в правилах тяговых расчетов (1985 г.) приведены разные формулы для коэффициента сцепления, включая

$$\psi = \frac{1}{A + BV},$$

где A, B — постоянные коэффициенты, полученные путем аппроксимации результатов испытаний; V — скорость электровоза.

Результаты по этой формуле получают-ся более высокими для электровозов пере-

Таблица 1

Классификация параметров электровозов

Параметры перспективного грузового электровоза		
1. Постоянные по физической природе (коэффициент сцепления, температурный диапазон)	2. Условно-постоянные (вагонный парк, автосцепка, путь, электроснабжение)	3. Варьируемые (число осей, секций, номинальные значения мощности, силы тяги, скорости)

Таблица 2

Классификация возможных решений по гибкому типу

Базовая секция электровоза		
4-осная 2–2	6-осная 2–2–2 или 3–3	4- и 6-осные секции
Только секции с кабиной управления		
Секции с кабиной и бустерные секции		

менного тока по сравнению с электровозами постоянного тока. Дело в жестких характеристиках $F(V)$ и $I(V)$ на переменном токе, поскольку тяговые двигатели электровоза соединены параллельно.

На перспективных электровозах целесообразно использовать асинхронные тяговые двигатели, которые имеют более жесткие характеристики, чем коллекторные двигатели. Кроме того, в тяговом электроприводе обязательно предусмотрены системы автоматики и защиты от боксования-юза. С учетом этого, а также результатов испытаний можно принять (рис. 1) значение расчетного коэффициента сцепления при трогании ($V = 0$, точка 1) $\Psi_T = 0,4$, а при расчетной скорости V_p , то есть при движении по руководящему подъёму – $\Psi_p = 0,28–0,32$ [9]. Это значение зависит от V_p , а величина V_p связана с номинальной мощностью электровоза N_n соотношением

$$N_n = F_p \cdot V_p = \Psi_p \cdot P \cdot V_p,$$

где F_p – сила тяги на расчетном подъеме; P – вес электровоза.

Из формулы следует, что с повышением мощности электровоза, которая пропорциональна мощности тягового двигателя N_d , примерно так же растет V_p и незначительно снижается Ψ_p . В зоне правее точки 2 находится точка расчетного (номинального) режима. У эксплуатируемых электровозов (ВЛ11, ВЛ85) $N_d = 800–900$ кВт и $V_p = 43–48$ км/ч. Соответственно при АД $N_d = 1100–1200$ кВт можно принять $V_p = 55–60$ км/ч, но уменьшение Ψ_p будет компенсировано улучшением противобоксовых свойств АД, так что с учетом всех факторов $\Psi_p = 0,28–0,32$.

Величина V_p , особенно при длинных руководящих подъемах, оказывает большое влияние на величину пропускной способности тягового плеча. Поэтому увеличение V_p выгодно с точки зрения организации движения поездов.

Температурный диапазон отражает реальные условия эксплуатации на всем полигоне железных дорог с шириной колеи 1520 мм. При температуре наружного воздуха от -50°C до $+40^{\circ}\text{C}$ этот диапазон имеет существенное значение при выборе элементной базы аппаратуры и изоляции высоковольтных цепей и обмоток электрических машин.

Принципиальных сложностей при решении подобной задачи нет, но ряд позиций требует внимания. Сюда относятся:

- повышение надежности изоляции тяговых электродвигателей путем автоматического регулирования мотор-вентилаторов с непрерывным регулированием их производительности по воздуху;
- улучшение стойкости наиболее напряженных стальных конструкций к низким температурам (холодостойкость), в первую очередь это касается рам тележек и осей колесных пар;
- совершенствование системы климатического контроля для кабины машиниста во всем диапазоне температур наружного воздуха.

УСЛОВНО-ПОСТОЯННЫЕ ПАРАМЕТРЫ (ГРУППА 2)

Постоянность этих параметров объясняется не их физической природой, а решениями, принимаемыми при проектировании подсистем железнодорожного



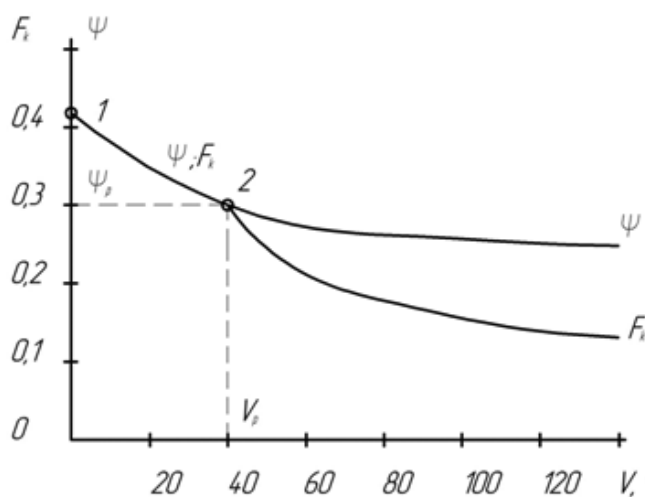


Рис. 1. Определение параметров электровоза для характерных режимов: 1 – трогание поезда; 2 – движение поезда по руководящему подъему.

транспорта. Наиболее стабильны параметры, определяющие взаимодействие электровоза с путевой структурой, а именно:

- ширина колеи 1520 мм;
- габарит подвижного состава, причем на линиях с электрической тягой используют только габарит 0-Т;
- профиль рабочей поверхности головки рельса, определяющий профиль поверхности катания колес электровоза;
- допустимая нагрузка от каждой оси электровоза на рельсы — сейчас для грузовых электровозов она равна 25 т/ось, но в программных документах ОАО «РЖД» предусматривается 28 т/ось для отдельных наиболее загруженных направлений;
- руководящие подъемы для разных тяговых плеч, причем на этапе проектирования все участки разделены на шесть категорий с предельными уклонами 10–20 пром.;
- минимальный радиус кривых участков пути принят равным 300 м, что оказывает влияние на конструкцию ходовой части электровоза.

Парк грузовых вагонов определяет следующие параметры локомотива:

- предельная сила тяги, зависящая от автосцепки, составляет 120 тс (предел прочности 200 тс). Разработка перспективных сцепок ориентирована не на повышение ее прочности, а на улучшение динамики при резких изменениях продольных усилий;

— конструктивная скорость большинства грузовых вагонов — 120 км/ч, что предопределяет и конструкционную скорость грузовых локомотивов. Имеется тенденция к повышению конструкционной скорости отдельных типов вагонов, например контейнерных платформ, но доля их в вагонном парке не превышает 1,5%. В перспективе возможна эксплуатация ускоренных контейнерных поездов, как в ЕС, но они будут иметь небольшую длину (до 40 вагонов) и соответственно вес не более 2000 т. Поэтому для них следует использовать специальные грузопассажирские или пассажирские электровозы;

- норма осевой нагрузки, как уже отмечалось, соотносится с путевой структурой — основная доля грузовых вагонов имеет предельную осевую нагрузку 25 т/ось, что является дополнительным соображением при обосновании аналогичной нормы для электровозов.

Энергоснабжение электрифицированных железных дорог оказывает влияние на концепцию перспективного электровоза следующим образом: он должен быть двухсистемным, что при современном уровне развития силовой электроники и систем управления вполне реализуемо. Переключение электровоза с одной системы на другую возможно на ходу, при прохождении нейтральной вставки в контактной сети — это существенно упростит станции стыкования (Вязьма, Владимир,

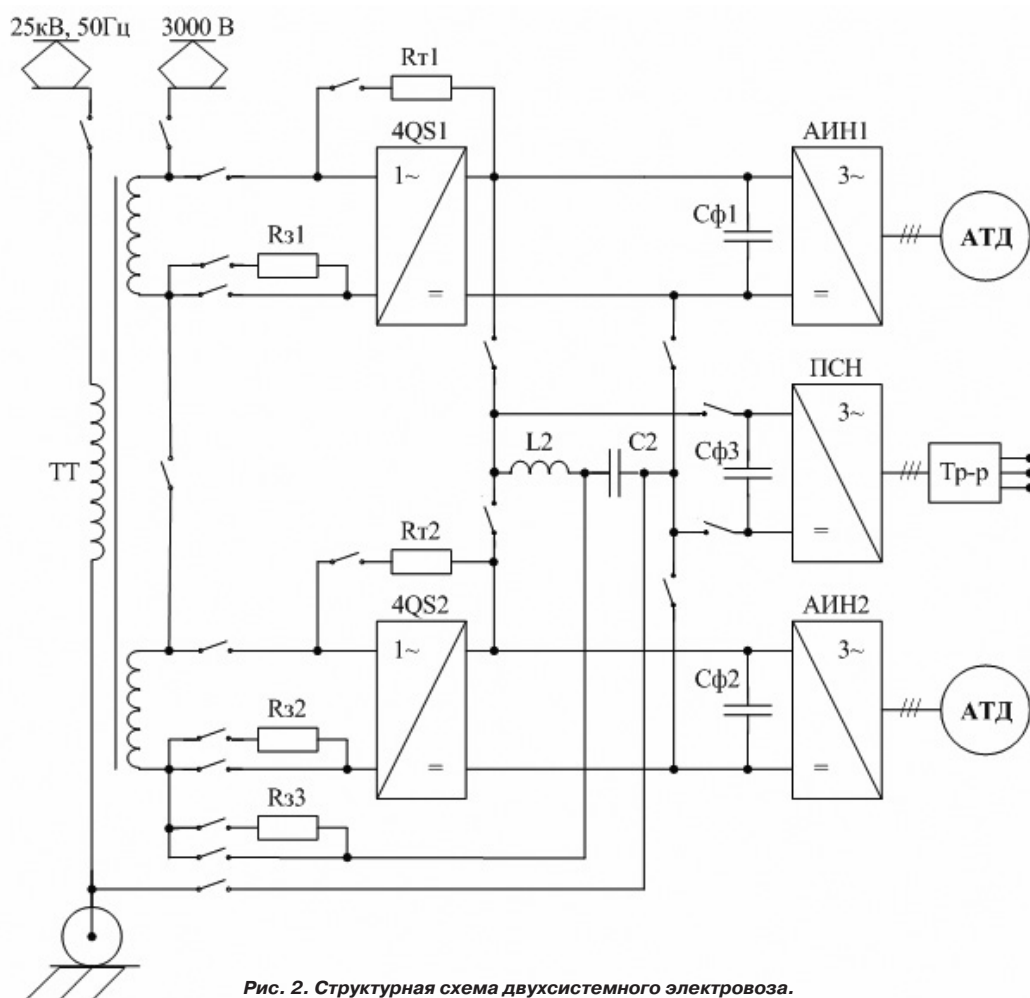


Рис. 2. Структурная схема двухсистемного электровоза.

Мариинск и др. — всего около 20 станций) и позволит удлинить тяговые плечи. Учитывая, что предусматривается создание гибкого типажа, целесообразно в качестве базового тягового модуля для двухсистемного электровоза принять комплект оборудования двухосной тележки с индивидуальным приводом каждой оси от собственного тягового двигателя. При этом модульность конструкции не должна ограничиваться только механической частью. Этот принцип необходимо распространить и на электрическое оборудование.

В состав тягового модуля, кроме двух АТД, должны входить тяговый преобразователь, обеспечивающий индивидуальное осевое управление тяговыми двигателями, а также преобразователь для питания собственных нужд при работе от контактной сети как постоянного, так и переменного

тока. В отличие от тяговых преобразователей двухсистемного электропоезда «Сапсан», для электровоза ЭП10 предлагается использовать вторичные обмотки тягового трансформатора и дроссель резонансного 100-герцового фильтра в качестве дросселей входного фильтра при работе от контактной сети постоянного тока, как это было предусмотрено силовой схемой тягового привода электропоезда «Сокол».

С системой энергоснабжения тесно связана реализация электрического торможения. На переменном токе 25 кВ тяговые подстанции всегда готовы к приему энергии рекуперации. При этом на электровозе АТД работают в генераторном режиме, АИН в режиме управляемого выпрямителя, а УВ в режиме зависимого инвертора. На постоянном токе необходимо рекуперативно-реостатное торможение. При рекуперации АТД и АИН





опять же работают, а *ИП* реверсируют. Если отсутствуют приемники энергии рекуперации, автоматически включается бесконтактный выключатель и энергию гасят на реостате.

ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ (ГРУППА 3)

В основном эти параметры однозначно определяются или ограничиваются уже рассмотренными параметрами групп 1–2. В ходе эксплуатации двухсистемных электровозов локомотивное хозяйство организует свою работу в соответствии со следующими заданными нормативными параметрами.

Весовая норма состава рассчитывается по величине руководящего подъема с учетом усредненных характеристик состава, то есть вагонов. Среди этих характеристик главной является средняя осевая нагрузка в составе поезда q'' . Тогда сопротивление движению поезда на руководящем подъеме

$$i_p' = w_o(V_p) + w_i = (P \cdot w_o' + Q \cdot w_o'') + (P + Q) \cdot i_p,$$

где P, Q — вес локомотива и состава;

w_o', w_o'' — основное удельное сопротивление для локомотива и состава, причем

$$w_o' = a_1 V_p^2 + a_2 V_p + a_3;$$

$$w_o'' = (b_1 V_p^2 + b_2 V_p + b_3) / q.$$

Эти расчеты выполняют на этапе взаимодействия заказчика (ОАО «РЖД») и изготовителя электровозов, включая разработчика. Заключительный этап расчетов имеет цельную реализацию унифицированных весовых норм для протяженных магистральных направлений со стабильными грузопотоками (Транссибирская магистраль, Москва — Воронеж — Ростов и др.).

Например, для Транссибирской магистрали установлена норма в 6000 т, но поскольку входящие в него тяговые плечи включают разные руководящие подъемы и соответственно разные индивидуальные весовые нормы, то унифицированная норма должна удовлетворять ограничениям:

— тяга состава электровозом в голове поезда (8- или 12-осный электровоз) при необходимости с добавлением подталкивающего электровоза;

— соответствие длины поезда длине станционных путей, по крайней мере, на участковых станциях.

Идея унифицированных весовых норм существует около 30 лет. Ее реализация начата на базе электровозов с коллекторными тяговыми двигателями. Перспективные электровозы с АТД проектируются с мощностью на ось на 20% больше, чем при коллекторных двигателях. Это позволяет сделать вывод, что перспективные электровозы не будут лимитировать реализацию унифицированных норм.

Но при эксплуатации многоосных электровозов существует проблема использования их мощности. Дело в том, что полностью мощность электровоза реализуется только в том случае, если вес состава соответствует норме; но и при этом полная мощность имеет место только в небольшом диапазоне скорости — при V_p и несколько более высоких скоростях. Поэтому была реализована **система посекционного регулирования**, которая при токе и соответственно силе тяги электровоза меньше номинальных отключает часть тяговых двигателей, а у остальных увеличивает ток, чтобы сохранить силу тяги на уровне до отключения. Такая система в виде блоков управления ОРМЛ внедрена на электровозах ВЛ80С, где можно отключать двигатели попарно. Здесь энергосбережение осуществляется за счет перевода двигателей в зону максимального КПД, которая соответствует номинальному току.

Дополнительная экономия обеспечивается путем регулирования производительности (частоты вращения) мотор-вентиляторов (МВ) силового оборудования, в зависимости от их нагруженности. Идеальным является регулирование по температуре якоря или ротора тягового двигателя, но замеры во вращающихся частях весьма сложны. Поэтому в реализованных системах регулируют МВ по току тяговых двигателей с учетом температуры наружного воздуха. Это дает экономию электроэнергии до 16–18%.

На перспективных электровозах в качестве МВ целесообразно использовать асинхронные двигатели с питанием от автономных инверторов; это позво-

ляет плавно регулировать частоту вращения МВ. Здесь необходимо не снижать эту частоту меньше чем на 12–14% от номинальной, чтобы обеспечить подпор воздуха при вентиляции тяговых двигателей (во избежание поступления наружного воздуха в двигатель).

Надежность электровозов оценивают по большому количеству показателей, но главным является коэффициент готовности, всегда указываемый в нормативных документах ОАО «РЖД» (ТУ и ТЗ). Его вычисляют за фиксированный промежуток времени между капитальными ремонтами по формуле

$$K_r = \frac{\Sigma T_{\text{сп}} + \Sigma T_{\text{нд}}}{\Sigma T_{\text{сп}} + \Sigma T_{\text{тор}} + \Sigma T_{\text{нд}} + \Sigma T_{\text{нр}} + \Sigma T_{\text{по}}},$$

где $\Sigma T_{\text{сп}}$ — сумма отрезков времени, в течение которых электровоз находится в распоряжении службы перевозок, будучи в рабочем состоянии;

$\Sigma T_{\text{нд}}$ — суммарное время нахождения электровоза в депо в рабочем состоянии;

$\Sigma T_{\text{тор}}$ — суммарное время нахождения электровоза на плановом техническом обслуживании и ремонте, включая их ожидание;

$\Sigma T_{\text{нр}}$ — продолжительность неплановых ремонтов, включая их ожидание;

$\Sigma T_{\text{по}}$ — суммарное время нахождения электровоза в состоянии полного отказа вне депо.

В идеальном случае имеем $\Sigma T_{\text{нр}} = 0$; $\Sigma T_{\text{по}} = 0$, так что на коэффициент готовности можно влиять, только увеличивая $\Sigma T_{\text{сп}}$ и уменьшая $\Sigma T_{\text{тор}}$ и $\Sigma T_{\text{нд}}$. Увеличивать дальше коэффициент удастся лишь путем улучшения использования электровозов в службе перевозок и сокращения затрат времени на техническое обслуживание и ремонт.

Сейчас коэффициент готовности на заказываемых электровозах принят за 0,95. Эту норму можно сохранить и на перспективу.

Межремонтные пробеги следует увеличить за счет повышения надежности лимитирующих компонентов электровоза. Базовым видом планового ремонта является подъемочный; его периодичность определяется сменой бандажей колесных пар при достижении ими предельного износа. Сейчас соответст-

вующий пробег составляет 350–550 тыс. км, но в директивных документах ОАО «РЖД» поставлена задача увеличить его до 1–1,15 млн км. Это достигается упрочнением поверхности катания бандажа (лазерное, плазменное упрочнение).

Автоматизация электровоза грузового движения призвана базироваться на:

- ограничении тока тяговых двигателей и стабилизации скорости движения в соответствии с уставками, заданными на контроллере машиниста (система МСУД разработки ВЭЛНИИ);

- системах автоведения САВПЭ или РПДА.

Бортовая система технической диагностики необходима:

- для обнаружения предотказных состояний наиболее ответственных узлов (буксы, изоляция силовых цепей, особенно тяговых двигателей);

- для регистрации фактического состояния основного оборудования при движении электровоза под полной нагрузкой (эта информация должна быть использована при планировании очередных ремонтов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубенко А. А. Сцепление колеса с рельсом. — Киев: ВИПОЛ, 1993. — 296 с.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. — М.: Транспорт, 1985. — 287 с.
3. Феоктистов В. П. Концепция грузовых и грузопассажирских электровозов нового поколения // Материалы международного симпозиума Eltrans. — СПб.: ПГУПС, 2002. — С. 200–202.
4. Осипов С. И., Осипов С. С., Феоктистов В. П. Теория электрической тяги. — М.: УМЦ, 2005. — С. 436
5. Коломийченко В. В. Автосцепное устройство подвижного состава железных дорог. — М.: Транспорт, 2002. — 230 с.
6. Лещев А. И. Электровоз двойного питания ЭП10 // Локомотив. — 1999. — № 11. — С. 28–32.
7. Грунтов П. С. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте. — М.: Транспорт, 1994. — С. 543.
8. Бакланов А. А., Мурзин Д. В., Талызин А. С. Параметры перспективных электровозов для питания участка Мариинск-Карымская Транссибирской магистрали // Тезисы докладов третьего международного симпозиума Eltrans 2007. — СПб., 2007. — С. 497–499.
9. Литовченко В. В., Широченко Ю. Н. Расчет предельных характеристик для электровозов // Мир транспорта. — 2009. — № 3. — С. 58–65.
10. Иньков Ю. М., Литовченко В. В., Феоктистов В. П. Двухсистемный грузовой электровоз для железных дорог Российской Федерации // Электротехника. — 2014. — № 3. — С. 57–64.

