

UDC 629.423.2.016.2

О. N. Nazarov. Evaluation of perspective dc electric trains energy efficiency // Vestnik VNIIZhT. 1998. No. 6. P. 35 - 39.

The technical level of operating and perspective suburban dc electric trains is observed. The methods are presented for comparison of their energy efficiency enabling to definite operating conditions in aspects of energy consumption minimization.

УДК 629.423.2.016.2

Назаров О. Н. К оценке энергетической эффективности перспективных пригородных электропоездов постоянного тока // Вестник ВНИИЖТ. 1998. № 6. С. 35 - 39.

Рассмотрен технический уровень пригородных электропоездов постоянного тока, находящихся в эксплуатации и перспективных. Показана методика сравнения их энергетической эффективности, позволяющая определять условия эксплуатации с точки зрения минимизации расхода электроэнергии для различных типов поездов. Ил. 3, библиогр. 4 назв.

Инж. О. Н. НАЗАРОВ

К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИГОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основной объем перевозок в пригородном сообщении осуществляется электропоездами постоянного тока (74 % парка), наиболее загруженными

являются Московский и С.-Петербургский пригородные узлы.

O. N. Nazarow. O ocenie energetycznej efektywnosci przyszlych podmiejskich zespolow trakcyjnych pradu stalego

Analiza poziomu technicznego eksploatowanych I przyszlych podmiejskich zespolow trakcyjnych pradu stalego, warunkow eksploatacji i metodyki rowmania ich energetycznej efektywnosci pozwalajacej okreslic warunki eksploatacji z punktu widzenia minimalizacji strat energii elektrycznej dla roznych typow pociagow.

Анализируя отечественную и зарубежную практику, можно условно разделить пригородные электропоезда постоянного тока по качественным показателям на четыре поколения (рис. 1). К первому поколению относятся электропоезда со ступенчатым контакторным регулированием напряжения на коллекторных тяговых двигателях (КТД) постоянного тока. Второе поколение характеризуется применением плавного тиристорного регулирования напряжения на КТД с помощью широтно-импульсных прерывателей (ШИП). К третьему поколению относятся

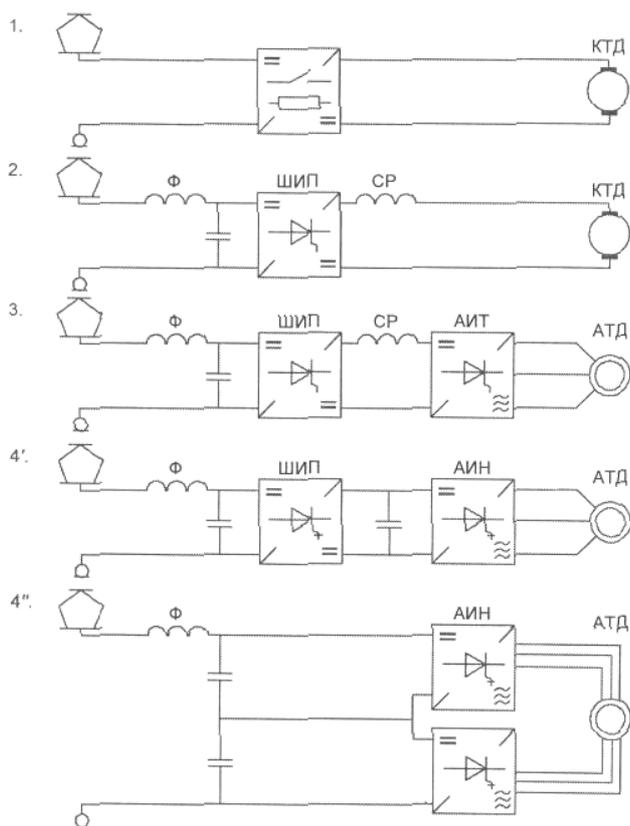


Рис. 1. Условные структурные схемы тяговых приводов электропоездов:

1...4 — поколения электропоездов; ШИП — широтно-импульсный прерыватель; АИТ — автономный инвертор тока; АИН — автономный инвертор напряжения; КТД — коллекторный тяговый двигатель постоянного тока; АТД — асинхронный тяговый двигатель переменного тока; Ф — входной фильтр

электропоезда с асинхронными тяговыми двигателями (АТД) переменного тока и двойным преобразованием энергии с использованием ШИП и тиристорных автономных инверторов тока (АИТ). На электропоездах четвертого поколения используются ШИП и автономные инверторы напряжения (АИН) с применением запираемых тириستоров.

В настоящее время на железных дорогах России эксплуатируются и серийно выпускаются пригородные электропоезда только первого поколения. Для повышения надежности и эффективности работы систем электропоездов их конструкция постоянно совершенствовалась [1]. На электропоездах применены более мощные тяговые двигатели усовершенствованы силовые контакторы, внедрена система рекуперативно-реостатного торможения, разработаны новые преобразователи для питания цепей собственных нужд. Появилась возможность формирования поездов различной составности. Изменения произошли и в механической части. Разработаны новые тележки, произошел переход на новую базовую длину кузова 21,5 м за счет увеличения тамбуров.

Несмотря на это, в целом по конструкции, параметрам и свойствам серийно выпускаемые отечественные пригородные электропоезда отстают от со-

временного технического уровня в основном из-за значительной массы тары вагонов и электрооборудования, наличия контактного ступенчатого регулирования напряжения на КТД и повышенного расхода электроэнергии на тягу.

Улучшение тягово-энергетических и эксплуатационных показателей электропоездов — задача комплексная, включающая в себя разработку новых кузовов, тележек и электрооборудования или их модернизацию с целью уменьшения эксплуатационных затрат депо, наибольшую долю которых в настоящее время составляют расходы на электроэнергию (около 50 %). Ниже рассмотрены некоторые возможные варианты и направления работ по снижению расхода электроэнергии пригородных электропоездов постоянного тока и проведена оценка их энергетической эффективности.

Одно из возможных направлений — совершенствование электропоездов первого поколения с использованием КТД номинальным напряжением 1500 В (условное обозначение в расчетах ЭП1500). Уменьшение потребления электроэнергии для данного варианта достигается за счет применения двух группировок ТД, уменьшения потерь электроэнергии при пуске и увеличения ее возврата при электрическом торможении благодаря снижению скорости окончания рекуперации до 26...27 км/ч (на существующих электропоездах — 48...50 км/ч).

Другое направление работ — создание электропоезда второго поколения с тиристорным импульсным регулированием напряжения на коллекторных ТД в режиме пуска и рекуперативного торможения. На основе опыта эксплуатации электропоездов ЭР 12 и ЭР2И был разработан технический проект поезда ЭР30 и изготовлены три комплекта тиристорных преобразователей. Однако в силу ряда причин опытный электропоезд ЭР30 не был построен.

Работы по созданию электропоездов постоянного тока третьего и четвертого поколений проводятся РАО «ВСМ» (ЭТ4) и ОАО «ДМЗ» (ЭД6). Электропоезда с АТД характеризуются применением более совершенной элементной базы, прежде всего запираемых тиристоров и силовых транзисторов, а также использованием микропроцессорной техники для управления и контроля параметров движения, диагностики оборудования.

Зарубежный опыт внедрения электропоездов с АТД позволил сформулировать основные достоинства и недостатки новой системы привода. Достоинства системы: номинальная мощность АТД может быть использована во всем диапазоне скоростей движения до конструктивной включительно; более полно, практически на пределе по сцеплению может быть реализовано развиваемое АТД усилие; при одинаковой мощности и других равных параметрах АТД имеет меньшую массу, чем коллекторный; существенно уменьшается расход активных материалов

(меди, стали); снижается трудоемкость изготовления АТД и их обслуживания в эксплуатации. Вместе с тем применение АТД привело к усложнению преобразователя и системы управления.

Несмотря на то что предполагаемая стоимость новых электропоездов будет выше серийных, затраты должны окупиться экономией эксплуатационных расходов за счет уменьшения расхода электроэнергии и снижения трудоемкости обслуживания и ремонта.

Определение параметров пригородных электропоездов постоянного тока в отечественной практике производилось в расчетном режиме движения на перегоне длиной 3 км с технической скоростью 70...72 км/ч при коэффициенте заполнения салонов вагонов пассажирами $K_3 = 1,5$ (заняты все места для сидения, и 50 % пассажиров от числа мест для сидения стоят).

В расчетном режиме движения тяговые и тормозные свойства электропоездов определяются исходя из условия реализации расчетного коэффициента сцепления колес с рельсами. Расчетное значение коэффициента сцепления Ψ_K определенное путем обобщения опыта эксплуатации, результатов тягово-энергетических и эксплуатационных испытаний пригородных электропоездов, описывается формулой:

$$\Psi_K = \frac{A_C \cdot K_A}{100 + v},$$

где A_C — коэффициент, учитывающий соединение ТД; K_A — коэффициент, учитывающий плавность регулирования силы тяги; v — скорость, км/ч.

При четырех последовательно соединенных ТД (коллекторных или асинхронных) $A_C = 19$, при двух последовательно соединенных ТД $A_C = 22$, при параллельном соединении ТД $A_C = 25$. Коэффициент $K_A = 1,0$ при ступенчатом регулировании напряжения на ТД, $K_A = 1,15$ при плавном регулировании ТД.

Расчетный коэффициент сцепления задается на моторный вагон без учета перераспределения сцепного веса по осям и используется для выбора пусковой и тормозной диаграммы, величины сил в которых не должны превышать расчетного ограничения по сцеплению.

Определение расчетного режима движения при создании новых электропоездов преследует цель обеспечить запас в загрузке их электрооборудования по сравнению с реальными условиями движения электропоездов на линии.

Это необходимо для выполнения графика движения в условиях эксплуатации, обеспечения работоспособности оборудования при возникновении аварийной (нештатной) ситуации (вывод из тяги одного или двух моторных вагонов поезда), а также для обеспечения заданного срока службы оборудования.

Необходимость такого подхода к расчетному режиму движения определяется условиями эксплуатации электропоездов в России. Пригородные электро-

поезда, рассчитанные на радиус действия 150 км, широко используются в местном сообщении на плечах протяженностью свыше 150 км. Средневзвешенный суточный пробег по участкам эксплуатации пригородных электропоездов постоянного тока составляет 358,8 км при среднетехнической скорости 50,4 км/ч. Разброс показателей среднесуточного пробега и технической скорости по дорогам составляет соответственно от 162 до 430 км и от 36,8 до 56,0 км/ч. При сравнении показателей работы электропоездов различных поколений достоверная оценка их по расходу электроэнергии может быть получена лишь с помощью анализа данных в приближенном к условиям эксплуатации режиме движения (соответствующая длина перегона и техническая скорость; пониженный по сравнению с расчетным значением коэффициент сцепления; среднее эксплуатационное значение коэффициента K_3). Однако, учитывая большой разброс эксплуатационных показателей на полигоне железных дорог, целесообразно определять эффективность использования каждого варианта для различных условий.

Были проанализированы условия работы пригородных электропоездов в девяти депо Московской и Октябрьской дорог. По каждому из депо были выделены протяженности участков обращения, число пар поездов, средняя техническая скорость, средняя участковая скорость, профиль участков, ограничения скоростей [2].

Для проведения сравнения показателей работы электропоездов различных типов на основании статистической обработки эксплуатационных данных был определен ряд условных расчетных участков (рис. 2), характеризующихся различной средней длиной перегона (от 2 до 6 км) и ограничением скорости движения (от 50 до 120 км/ч).

На расход электроэнергии в эксплуатации оказывают влияние как конструкционные особенности

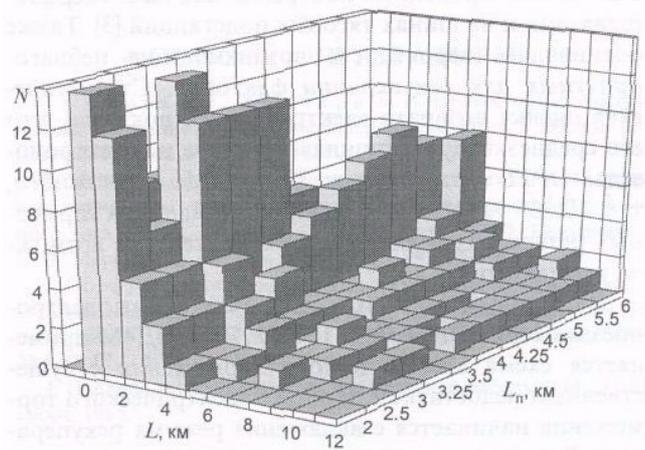


Рис. 2. Гистограмма распределения длин перегонов на расчетных участках, полученных на основе статистического анализа: L_n — средняя длина перегона расчетного участка; L — длина перегона; N — число перегонов длиной L на расчетном участке

электропоезда, так и условия эксплуатации (скорость движения, режимы ведения поезда, загрузка вагонов пассажирами, условия электроснабжения). Оценка условий эксплуатации осуществлялась на основании данных, полученных в экспериментальных поездках на серийных электропоездах с пассажирами в Московском пригородном узле.

Одной из специфических особенностей работы моторвагонного подвижного состава является изменение загрузки поезда во времени и по зонам участка. Непосредственное измерение населенности вагонов, которое проводилось во время экспериментальных поездок, показало, что загрузка вагонов меняется от $K_3 = 2,0$ (200 % от числа мест для сидения) в часы «пик» до $K_3 = 0,1$. По результатам статистического анализа можно принять среднее значение загрузки $K_3 = 1,0$.

На величину реализуемых в условиях эксплуатации тяговых и тормозных усилий оказывают влияние различные факторы (местные особенности, загрязненность рельсов, погодные условия, установившаяся среди машинистов практика, опоздание поезда и др.)- Однако статистический анализ показывает, что среднеэксплуатационным можно считать значение тяговых и тормозных усилий, соответствующих 85 % величины расчетного коэффициента сцепления для соответствующей модели электропоезда.

При номинальном напряжении на шинах тяговых подстанций 3,3 кВ напряжение на токоприемнике в процессе движения по участку изменяется в зависимости от расстояния до подстанции, интенсивности движения по участку, мощностей питающей и контактной сетей, применения рекуперативного торможения. Во ВНИИЖТе проводились специальные исследования по оценке влияния указанных факторов на возможность и величину возврата электроэнергии при рекуперативном торможении в пригородной зоне Московского железнодорожного узла с проведением одновременных измерений как на электропоездах, так и на шинах тяговых подстанций [3]. Также оценивалась вероятность возникновения неблагоприятных для рекуперации факторов. Статистическая оценка возврата электроэнергии показала, что его среднеэксплуатационная величина на электропоездах ЭР2Т составляет от 70 до 90 % возможного, т. е. 10...30 % электроэнергии рассеивается в тормозных резисторах в диапазоне скоростей, где возможна рекуперация.

На эксплуатируемых в настоящее время электропоездах серий ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2, ЭД4, ЭД4М применяется схема электрического торможения с существенным недостатком. Процесс электрического торможения начинается с включения режима рекуперации. В случае возникновения в процессе рекуперативного торможения неблагоприятного фактора (исчезновение потребителя тока рекуперации или появление еще одного источника рекуперированной энер-

гии) на одном или нескольких вагонах происходит замещение рекуперативного тормоза реостатным с независимым возбуждением ТД. Недостаток заключается в том, что при восстановлении в процессе торможения благоприятных условий обратного переключения в режим рекуперации не происходит. Необходимо применять системы со следящим рекуперативно-реостатным торможением на электропоездах с плавным регулированием ТД, которые позволяют увеличить возврат электроэнергии.

Целью исследования являлось сравнение существующих и перспективных электропоездов различных поколений в широком диапазоне возможных условий эксплуатации и определение областей их применения с точки зрения минимизации затрат электроэнергии на тягу.

Для каждого типа электропоезда были проведены тяговые расчеты на условных расчетных участках (см. рис. 2). Расчеты производились с применением программного обеспечения, разработанного в лаборатории электропоездов ВНИИЖТа, в соответствии с [4]. Расходы электроэнергии по всем расчетным участкам для каждого варианта электропоезда были приведены к средней длине перегона и технической скорости на данном участке, после чего сравнивались расходы электроэнергии различными вариантами электропоездов при движении по участкам с одинаковыми средней длиной перегона и технической скоростью.

Были проведены также расчеты упрощенным методом, который заключался в определении расхода электроэнергии на расчетных перегонах, т. е. при движении электропоезда по одному расчетному перегону с нулевым профилем и определенной технической скоростью. Длины перегонов и технические скорости соответствовали средней длине перегона и среднеквадратической технической скорости на расчетных участках. Цель проведения расчетов — сравнение двух методов и оценка возможности использования для сравнения электропоездов второго метода.

В качестве исходных данных использовались эксплуатационные параметры, определенные статистическими методами. Тяговые и тормозные диаграммы перспективных электропоездов и их энергетические показатели задавались в соответствии с проектными данными или результатами испытаний экспериментальных образцов. В данное сравнение электропоезд ЭД6 четвертого поколения из-за отсутствия достоверных технических данных и характеристик включен не был. В расчетах использовался режим движения с минимальным расходом электроэнергии (разгон — выбег — рекуперативное торможение).

Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы по использованию методики сравнения вариантов электропоездов:

1. Результаты расчетов двумя методами различаются по абсолютной величине расхода электроэнергии. Для достоверного определения абсолютной величины энергопотребления на тягу поездов следует использовать метод расчета по участку.

2. Достоверность относительного сравнения различных типов электропоездов или электропоездов одного типа различной составности обеспечивается по результатам расчета упрощенным методом.

3. Оптимальный выбор типа, соотношения моторных и прицепных вагонов электропоездов и их составности для конкретного пригородного узла или направления по расходу электроэнергии или по нагреву основного силового электрооборудования возможен с использованием упрощенного метода и поправочных коэффициентов, учитывающих «сложность» профиля и распределение длин перегонов на участке.

Результаты расчетов показывают, что все варианты перспективных электропоездов энергетически более экономичны по сравнению с существующими типами в основном за счет снижения расхода электроэнергии при разгоне и более широкого диапазона рекуперативного торможения.

Если принять в качестве характеристики участка обращения поезда среднюю длину перегона и соответствующую техническую скорость, то сравнение расхода электроэнергии на тягу электропоездами различных типов в одинаковых условиях эксплуатации позволяет определить области применения того или иного типа подвижного состава (рис. 3). Как видно из рис. 3, рациональность использования с точки зрения минимизации расхода электроэнергии определяется конкретными условиями эксплуатации на пригородном участке. Например, на участках или направлениях со средней длиной перегона 3,0 км эксплуатация электропоездов серии ЭТ4 более предпочтительна при реализации технической скорости выше 67,0 км/ч, серии ЭП1500 — при реализации технической скорости 39,0...67,0 км/ч.

Сравнение трех перспективных вариантов электропоездов показывает, что с точки зрения потребления электроэнергии применение электропоездов второго и третьего поколений предпочтительнее на участках с преобладанием коротких перегонов (до 3 км) или с высокими скоростями движения. В большинстве остальных случаев потребление электроэнергии будет минимальным при использовании электропоездов первого поколения, оборудованных коллекторными ТД с номинальным напряжением 1500В.

Выводы. С использованием рассмотренной методики можно определить области энергетически оптимальной эксплуатации существующего парка электропоездов. Прикрепление поездов к маршрутам, выделенным по результатам расчета, позволит

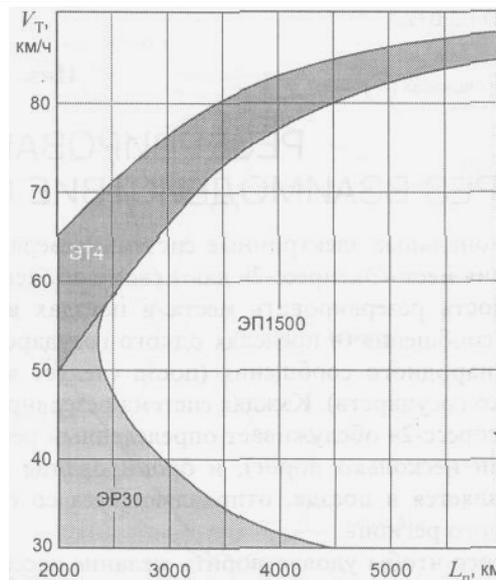


Рис. 3. Области оптимальной эксплуатации перспективных электропоездов по минимуму расходуемой электроэнергии: $L_{п}$ — средняя длина перегона; $V_{т}$ — техническая скорость

снизить общее потребление электроэнергии в эксплуатации.

В заключение следует отметить, что расход электроэнергии — только один из факторов экономии эксплуатационных затрат, хотя и самый значимый в условиях пригородного движения в России. Конструктивные особенности перспективных электропоездов предоставляют дополнительные возможности экономии за счет уменьшения капитальных затрат, надежности и ремонтпригодности оборудования, использования систем диагностики, увеличения срока службы. Эти факторы должны влиять на стоимость жизненного цикла электропоездов. Окончательный выбор типа электропоезда для использования в конкретном регионе можно сделать только после комплексного анализа более широкого ряда факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ &

1. Г о м о л а Г. Г., Х о м я к о в Б. И. Пригородные электропоезда: состояние и проблемы совершенствования // Железнодорожный транспорт. 1992. № 12. С. 23...29.
2. Методика определения рационального соотношения моторных и прицепных вагонов пригородных электропоездов постоянного тока / Б. И. Хомяков, О. Н. Назаров, А. Ю. Белокрылин, С. И. Меркушев // Вестник ВНИИЖТ. 1993. №6. С. 21...26.
3. Об эффективности рекуперативного торможения на электропоездах ЭР2Р, ЭР2Т / О. К. Филиппов, Б. И. Хомяков, А. Ю. Белокрылин, С. И. Меркушев, О. Н. Назаров // Локомотив. 1993. №6. С. 18...19.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы // М.: Транспорт, 1985.

ВНИИЖТ (отделение электрификации)