

Канд. техн. наук Б. И. ХОМЯКОВ, инженеры О. Н. НАЗАРОВ,
А. Ю. БЕЛОКРЫЛИН, С. И. МЕРКУШЕВ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ МОТОРНЫХ И ПРИЦЕПНЫХ ВАГОНОВ ПРИГОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для обеспечения существующего объема пригородных перевозок железные дороги России должны иметь 17 тыс. вагонов электропоездов. Фактически же на начало 1993 г. парк составляет 15 тыс. единиц. Единственный до последнего времени поставщик электропоездов — Рижский вагоностроительный завод резко уменьшил объем их поставок в Россию.

К концу 1993 г. Демидовским машиностроительным заводом будет изготовлено 48 прицепных и 12 головных вагонов длиной 21,5 м с электрооборудованием серийных электропоездов ЭР2Т, а в 1994 г. еще 250 таких вагонов. Освоение на этом заводе полносоставных электропоездов постоянного тока с использованием и моторных вагонов планируется на 1995 г.

В сложившейся ситуации предполагается, что критическое положение с перевозками в пригородных узлах постоянного тока, вызванное острым дефицитом электропоездов, можно будет несколько улучшить, перераспределив у ранее изготовленных электропоездов моторные и прицепные вагоны, и сформировать дополнительные составы на тех направлениях, где такое перераспределение допустимо. Прежде всего это относится к участкам, где эксплуатируются электропоезда постоянного тока типа ЭР2Р, ЭР2Т. Эти электропоезда с вагонами длиной 19,6 м и электрооборудованием, предназначенным для поездов ЭР22 с длиной кузова 24,5 м, имеют избыточную мощность тяговых двигателей (ТД) и другого силового оборудования.

В настоящей статье приведена методологическая оценка возможности изменения соотношения моторных и прицепных вагонов электропоездов

ЭР2Р, ЭР2Т, которая включала анализ условий их эксплуатации, многовариантные тяговые расчеты и определение режимов работы тягового электрооборудования на выбранных направлениях и маршрутах Московской и Октябрьской дорог.

По данным, полученным в результате анализа эксплуатации электропоездов постоянного тока, составлены показатели их работы (табл. 1). Средне-невзвешенные по всем участкам данного направления длины перегона $L_{пер}$, техническая V_T и участковая $V_{уч}$ скорости движения, длины участка $L_{уч}$ определялись из выражений:

$$L_{пер} = \frac{\sum_{i=1}^P (L_{пер_i} N_i)}{N}; \quad V_T = \frac{\sum_{i=1}^P (V_{T_i} N_i)}{N};$$

$$V_{уч} = \frac{\sum_{i=1}^P (V_{уч_i} N_i)}{N}; \quad L_{уч} = \frac{\sum_{i=1}^P (L_{уч_i} N_i)}{N},$$

где P — число участков обращения электропоездов; $L_{пер}$, V_T , $V_{уч}$ — средняя длина перегона, среднетехническая и участковая скорости на каждом из участков обращения электропоездов; $L_{уч}$ — протяженность каждого из участков обращения электропоездов; N_i — число пар поездов в сутки на каждом из участков обращения электропоездов; N — общее число пар поездов в сутки на направлении.

Депо приписки	Характеристика парка депо			Суточные показатели работы электропоездов					
	Число			Средняя длина перегона, км	Средние техническая/участковая скорости, км/ч	Средняя протяженность участка, км	Средняя несучная поездная работа, тыс. поезд-до-км	Средняя несучная точная поездная работа, км	Доля объема поездной работы при длине перегона более 3,5 км
	поездов	вагонов							
общее		ЭР2Р, ЭР2Т							
<i>Московская ж. д.</i>									
Москва-2	59	758	108	2,55	50,7/41,4	52,4	25,25	428	0,2
Железнодорожная	37	442	442	3,27	53,6/44,2	65,7	16,30	440	0,4
Апрелевка	35	421	208	3,57	56,9/46,5	65,9	15,70	448	0,6
им. Ильича	33	400	400	3,72	56,2/46,8	66,1	14,30	433	0,47
Перерва	35	398	284	2,98	52,3/41,0	58,6	12,50	357	0,55
Нахабино	28	344	0	3,27	55,7/47,3	56,3	12,40	443	0,33
<i>Октябрьская ж. д.</i>									
Ленинград-Пасс.- Московский	34	340	110	4,22	56,5/50,9	69,3	24,70	726	0,9
Москва	27	324	324	3,48	59,9/52,3	86,8	14,23	527	0,5

Суточный объем поездной работы электропоездов депо и среднесуточный пробег электропоезда определялись из выражений:

$$\Pi = \left(\sum_{i=1}^P L_{уч_i} \right) N_{\Pi}; \quad L_c = \frac{\Pi}{N_{\Pi}}$$

где N_{Π} — число поездов парка депо.

Оборот пригородных электропоездов обычно составляет таким образом, что они последовательно проходят участки с малой и большой длиной перегона. Поэтому выделение из общей массы маршрутов тех из них, для которых характерен более напряженный режим работы, требует индивидуального подхода с учетом особенностей работы электропоездов в каждом депо, специфики формирования оборота электропоездов, степени заполнения электропоездов пассажирами

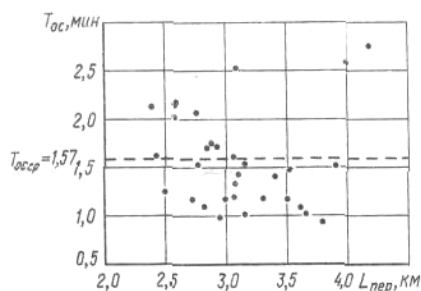


Рис. 1. Приведенные к одному перегону средние значения суммарного времени отстоя и стоянок на выделенных маршрутах работы электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т в депо им. Ильича Московской дороги (рабочие дни)

ми и напряженности графика движения. Сравнение показателей работы электропоездов проводилось с учетом доли объема поездной работы на участках с длиной перегона более 3,5 км.

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, условия работы электропоездов в депо существенно различаются. На Московской дороге в наиболее тяжелых условиях работают электропоезда депо Москва-2 (Московско-Ярославское отделение дороги), где при $L_{пер} = 2,55$ км доля объема поездной работы (см. табл. 1) на маршрутах, например с $L_{пер} > 3,5$ км, составляет всего 0,2. В других депо Московской дороги эта доля больше. Промежуточное положение по этому показателю занимает депо им. Ильича и близкое к нему по условиям работы электропоездов депо Москва Октябрьской дороги.

В результате проведенного анализа для дальнейшего подробного рассмотрения отобраны маршруты движения электропоездов этих депо приписки. При этом из общего оборота выделены лимитирующие по нагреву силового оборудования маршруты движения, главным образом, исходя из критерия непрерывной (без длительных отстоя) работы электропоезда на линии не менее четырех часов. Протяженные маршруты с длительным отстоем в середине разбивались на два условных лимитирующих маршрута.

Данные, полученные в результате отбора маршрутов движения электропоездов, использованы при проведении тяговых расчетов и сопоставлении их результатов с показателями работы электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т в депо им. Ильича Московской дороги

и депо Москва Октябрьской дороги. Обработка статистических данных показала, что приведенные к одному перегону средние значения суммарного времени отстоев и стоянок для каждого из выделенных маршрутов (Тос) имеют большой разброс (рис. 1). В дальнейшем в тяговых расчетах этот показатель принят на уровне зафиксированных минимальных значений.

Целью тяговых расчетов являлось определение предельно допустимой участковой скорости V_y для принятых вариантов составности электропоезда при соблюдении следующих граничных условий: максимальная скорость движения 100 км/ч; среднеквадратический (греющий) ток основного силового электрооборудования не превышает допустимых значений. Рассмотрен и учтен также режим движения, при котором не выдерживается график движения. В этом случае из-за недостаточных ускорений и замедлений электропоезд, не достигая максимальной скорости движения, из режима тяги без фазы выбега переходит в режим торможения, но греющий ток электрооборудования не превышает допустимых значений. Это условие также являлось одним из граничных.

Для проведения тяговых расчетов на ПЭВМ была разработана специальная программа, позволяющая определить тягово-энергетические параметры электропоездов, имеющих различные характеристики, как в расчетном режиме движения, так и при работе в условиях, близких к эксплуатационным. В качестве исходных данных задавались характеристики тяговые, тормозные и выбега, а также масса, составность, населенность, к. п. д. и др. параметры. Результатом расчета являются кривые движения (время, скорость, путь, ток, напряжение, сила тяги и торможения, расход электроэнергии, мощность и др.), интегральные показатели движения, включающие технические скорости, суммарный расход (возврат) электроэнергии, время хода, среднеквадратический ток. Перед проведением многовариантных тяговых расчетов было опробование программы тяговых расчетов на ПЭВМ путем сравнения с ранними результатами испытаний электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т на Экспериментальном кольце института и на линии.

В табл. 2 приведены варианты составности электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т, принятые для тяговых расчетов, а на рис. 2 — характеристики тягового двигателя 1ДТ. 003.6. В расчетах для составов из 12, 11 и 10 вагонов предусмотрены режимы работы электропоездов при одном и двух неисправных моторных вагонах.

Для всех вариантов тягового расчета приняты следующие условия (допущения). Профиль пути — площадка. Уставка тока якоря тяговых двигателей I_a в режиме тяги — 280А, в режиме торможения при рекуперации — 350, в режиме реостатного торможения с самовозбуждением ТД — 280А. Массы вагонов: моторного — 58,5 т; прицепного — 40,5; головного — 42,0 т. Число мест для сидения в вагоне: моторном — 98 чел; прицепном — 98;

№ варианта	Число вагонов в поезде	Составность	Применение электрического торможения
1	12	2Г+6М+4П	Да
2	12	2Г+5М+5П	Да
3	12	2Г+4М+5П+1М ₀	Да
4	12	2Г+3М+5П+2М ₀	Нет
5	11	2Г+5М+4П	Да
6	11	2Г+4М+4П+1М ₀	Да
7	11	2Г+3М+4П+2М ₀	Нет
8	10	2Г+5М+3П	Да
9	10	2Г+4М+4П	Да
10	10	2Г+3М+4П+1М ₀	Да
11	10	2Г+3М+4П+1М ₀	Нет

Примечание. Г - головной вагон, М - моторный вагон, П - прицепной вагон, М₀ - неисправный моторный вагон.

головном — 74 чел. Масса пассажира — 70 кг. При двух неисправных моторных вагонах в составности 12 и 11 вагонов и одном неисправном моторном вагоне в составности 10 вагонов электрическое торможение не применяется.

Основное удельное сопротивление движению, Н/кН, принято

$$W'_0 = 1,24 + 0,02V + 0,000267V^2,$$

при езде без тока

$$W_{0x} = 1,1 + 0,012V + 0,000267V^2.$$

при езде под током

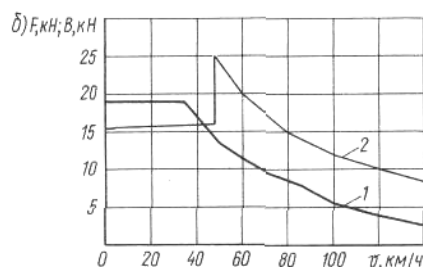
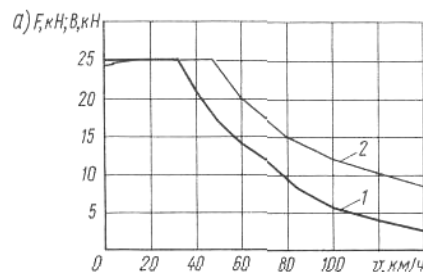


Рис. 2. Характеристики тягового двигателя 1ДТ.003.6, приведенные к ободу колеса:

а - 350 А; б - 280 А;

1 - тяговая характеристика; 2 - тормозная характеристика

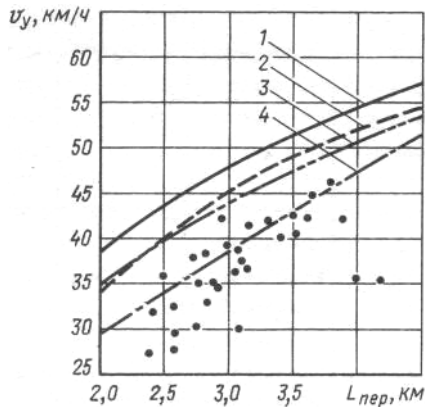


Рис. 3. Результаты многовариантных тяговых расчетов и сопоставление их с показателями работы электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т в составности из 10 вагонов: 1 - составность поезда 2Г+5М+3П; 2 - 2Г+4М+4П; 3 - 2Г+2М+4П+Мо (неисправный моторный вагон) при использовании электропневматического торможения; 4 - 2Г+3М+4П+Мо

На этапе предварительных тяговых расчетов установлено, что лимитирующими по нагреву в комплекте силового электрооборудования (ТД, пу-ско-тормозные контакторы и резисторы, индуктивные шунты, индивидуальные силовые контакторы) являются обмотки якоря и возбуждения ТД.

Для определения граничных величин греющего тока обмоток ТД выполнен тяговый расчет 12-вагонного электропоезда ЭР2Р (ЭР2Т) в основной (штатной) составности 2Г+6М+4П при расчетном режиме: $L_{пер}$ — 3, путь разгона — 1,5 км; K_3 — 1,5; время стоянки — 30 с; время отстоя через каждые 60 км пробега — 15 мин ($T_{ос} = 1,1$ мин); уставка тока якоря в режимах тяги и торможения максимальная. По результатам тягового расчета греющий (среднеквадратический) ток обмоток тяговых двигателей типа 1ДТ.003.6 12-вагонного электропоезда ЭР2Р (ЭР2Т) в основной (штатной) составности 2Г+6М+4П в расчетном трехкилометровом режиме движения при технической скорости 71,4 км/ч и условной участковой с учетом времени отстоя 49,8 км/ч составил по якорю 238 и по возбуждению 112 А. По паспортным данным длительный допустимый ток обмотки якоря тягового двигателя 1ДТ.003.6 равен 260, а обмотки возбуждения — 130 А. В качестве граничных греющих токов для последующих тяговых расчетов приняты для обмотки якоря 238 А и 119 — для обмотки возбуждения. Это позволило принять запас по греющим токам для обмоток якоря и возбуждения ТД равным 9 %.

Последовательно задавая значения $L_{пер}$ для каждого из 11 вариантов составности электропоезда с принятыми расчетными данными (масса тары электропоезда и коэффициент заполнения приведены к одному перегону средними значениями ТОС), производились тяговые расчеты с разным временем хода, по результатам которых выбиралось значение V_y , соответствующее указанным выше граничным условиям.

Для каждого варианта расчета строилась предельная (граничная) зависимость $V_y = f(L_{пер})$. Если V_y какого-либо из реальных маршрутов движения электропоезда с определенной средней $L_{пер}$ превышает V_y какого-либо из вариантов составности электропоезда, то это означает невозможность выполнения таким электропоездом графика движения, или превышение граничного значения греющего тока одной из обмоток ТД.

В результате анализа полученных данных установлено, что характер зависимости $V_y = f(L_{пер})$ при длине перегона, меньшей 3 км, определяется ограничением по греющему току обмоток возбуждения ТД, а при длине перегона большей 3 км — ограничением по максимальной скорости движения или тяговым возможностям электропоезда (низкое ускорение и замедление). При составности электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т: 2Г + 5М + 5П (М+1,4П); 2Г + 5М + 4П (М + 1,2П); 2Г+4М+4П (М+1,5П) обеспечивается гарантированное выполнение графика движения и допустимое значение греющих токов обмоток ТД для электропоездов обоих депо в рабочие и в выходные дни. Имеющийся запас мощности ТД практически компенсирует увеличение времени хода для составности 2Г+5М+5П и 2Г+5М+4П при одном неисправном моторном вагоне в поезде или двух неисправных вагонах в поезде и при использовании только электропневматического торможения (варианты тягового расчета 3, 4 и 6, 7). Для составности 2Г+4М+4П примерно в 40 % маршрутов выполнение графика движения и обеспечение допустимого значения греющих токов обмоток ТД при одном неисправном моторном вагоне в поезде невозможно (вариант тягового расчета 10). В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены результаты тяговых расчетов для этого варианта составности электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т в условиях их работы в депо им. Ильича по рабочим дням. Там же обозначены реализуемые V_y при реальных $L_{пер}$ 32 расчетных (лимитирующих) маршрута движения.

Таким образом установлено, что для условий работы электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т в депо им. Ильича и Москва возможна их эксплуатация в составности 2Г+5М+5П и 2Г+5М+4П. Следует отметить, что указанный выше избыток электрической мощности ТД при этой составности электропоездов в реальных условиях эксплуатации будет выше вследствие принятого при расчетах 9 %-запаса по греющим токам для обмоток якоря и возбуждения тяговых двигателей типа 1ДТ.003.6 и большего в реальной эксплуатации значения приведенного к одному перегону среднего значения суммарных времен отстоя и стоянок по сравнению с принятым в расчетах (см. рис. 1). Этот запас может быть реализован в нештатных условиях эксплуатации (нагон, сбой в движении и пр.).

Эксплуатация электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т с измененным соотношением моторных и прицепных вагонов позволит высвобождающиеся моторные вагоны применить для комплектования 11-

Технические данные	Основные показатели работы электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т для средневзвешенных условий работы в депо -					
	им. Ильича			Москва		
Число вагонов	12	12	11	12	12	11
Составность	2Г+6М+4П	2Г+5М+5П	2Г+5М-4П	2Г+6М+4П	2Г+5М+5П	2Г+5М+4П
Длина перегона, км	3,150	3,150	3,150	4,450	4,450	4,450
Время хода, мин	3,469	3,470	3,469	4,286	4,287	4,289
Техническая скорость, км/ч	54,5	54,5	54,5	62,3	62,3	62,3
Участковая скорость, км/ч	42,3	42,3	42,3	50,5	50,5	50,5
Скорость разгона, км/ч	71,7	73,8	72,7	83,0	84,8	83,9
Путь разгона, км	0,471	0,605	0,537	0,728	0,920	0,820
Скорость начала торможения, км/ч	56,4	59,7	58,1	61,6	65,1	63,3
Тормозной путь, км	0,202	0,264	0,234	0,236	0,309	0,273
Время рекуперативного торможения, с	3,5	4,2	3,9	4,5	6,5	5,2
Греющий ток якоря, А	141,0	158,0	149,9	143,3	160,0	151,9
Греющий ток обмоток возбуждения, А	91,7	100,7	96,5	86,3	94,4	90,5
Расход энергии на тягу, кВт·ч	57,78	59,52	53,73	74,49	76,19	68,89
Возврат энергии при рекуперации:						
кВт·ч	6,00	8,30	6,53	10,16	12,66	10,39
%	9,8	13,3	11,6	12,9	15,9	14,4
Расход энергии на собственные нужды, кВт·ч	3,37	2,82	2,8	3,94	3,37	3,3
Общий расход энергии, кВт·ч	55,14	54,04	49,99	68,27	66,9	61,81
Удельный расход энергии, Вт·ч/т·км	25,9	26,1	26,0	22,7	22,8	22,8

вагонных электропоездов в составности 2Г+5М+4П с использованием, как уже указывалось, поставляемых промышленностью России прицепных и головных вагонов с длиной кузова 21,5 м. По производительности эти 11-вагонные электропоезда могут быть приняты эквивалентными 12-вагонным в штатной составности, так как будут комплектоваться из прицепных и головных вагонов с большей длиной кузова и шириной дверей и более пассажироемкими тамбурами.

В табл. 3 приведены основные расчетные технические показатели работы электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т в рекомендованных 12-вагонной и 11-вагонной составностях для средневзвешенных условий их работы в рассматриваемых депо. Как видно из приведенных данных, несмотря на несколько худшие показатели разгона и торможения электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т с измененной составностью (рис. 4), их энергетические показатели лучше. При использовании составности 2Г+5М+ +5П общий расход электроэнергии на условном средневзвешенном перегоне по расчету составил 54,04 кВт·ч в условиях работы в депо им. Ильича и 66,9 — в депо Москва (против соответственно 55,14 и 68,27 кВт·ч при использовании штатной составности 2Г+6М+4П, т.е. на 2 % меньше). При использовании составности 2Г+5М+4П общий расход электроэнергии при тех же условиях движения составил 49,99 кВт·ч в депо им. Ильича и 61,81 — в депо Москва (против соответственно

55,14 и 68,27 кВт·ч при использовании штатной составности 2Г+6М+4П, т.е. на 9,4 и 9,1 % меньше).

Выводы. Анализ условий эксплуатации электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т в пригородных узлах Мо-

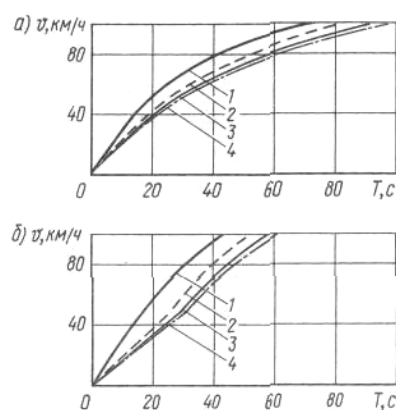


Рис. 4. Кривые разгона и торможения электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т в 11- и 12-вагонной составности при расчетном коэффициенте заполнения пассажирами (a_{60} - среднее ускорение до скорости 60 км/ч; b_{60} - среднее замедление со скорости 60 км/ч): а - кривые разгона, б - кривые торможения; 1 - 2Г+6М+ +4П, $I_{я} = 350$ А ($a_{60} = 0,65$ м/с²; $b_{60} = 0,78$ м/с²); 2 - 2Г+6М+4П, $I_{я} = 280$ А ($a_{60} = 0,51$ м/с²; $b_{60} = 0,56$ м/с²); 3 - 2Г+5М+4П, $I_{я} = 280$ А ($a_{60} = 0,46$ м/с²; $b_{60} = 0,49$ м/с²); 4 - 2Г+5М+5П, $I_{я} = 280$ А ($a_{60} = 0,43$ м/с²; $b_{60} = 0,47$ м/с²)

сквы и Санкт-Петербурга показал возможность их эксплуатации с измененным соотношением моторных и прицепных вагонов при формировании электропоездов как с четным, так и нечетным числом вагонов.

В результате сопоставления результатов многовариантных тяговых расчетов с показателями работы электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т в депо им. Ильича Московской и депо Москва Октябрьской дорог установлено, что при измененной составности электропоездов 2Г+5М+5П (М+1,4П) и 2Г+5М+ +4П (М+1,2П) обеспечивается выполнение электропоездами графика движения без перегрузки тяговых двигателей. Составность следует считать рациональной для данных депо.

Эксплуатация электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т с

измененным соотношением моторных и прицепных вагонов позволит высвободить моторные вагоны для комплектования 11-вагонных электропоездов в составности 2Г+5М+4П с использованием поставляемых промышленностью новых прицепных и головных вагонов с длиной кузова 21,5 м. Это позволит уменьшить на 10 % капитальные затраты, связанные с увеличением парка электропоездов постоянного тока и на 9 % расход электроэнергии. Разработанная и опробованная методика сопоставления тяговых расчетов с показателями работы электропоездов рекомендуется при проведении аналогичных расчетов для других депо, где предполагается организовать эксплуатацию пригородных электропоездов с измененным соотношением моторных и прицепных вагонов.
