



Развитие тяговых электроприводов электропоездов постоянного тока



Юрий ИНЬКОВ
Yury M. INKOV

Валерий ФЕОКТИСТОВ
Valery P. FEOKTISOV



Николай ШАБАЛИН
Nickolay G. SHABALIN

Иньков Юрий Моисеевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.
Феоктистов Валерий Павлович — доктор технических наук, профессор МИИТ, Москва, Россия.
Шабалин Николай Григорьевич — доктор технических наук, профессор, директор Кировского филиала МИИТ, Киров, Россия.

В пригородном сообщении вблизи крупных региональных центров мотор-вагонные поезда занимают ведущее положение. Рассмотрено состояние парка мотор-вагонных поездов и проанализированы этапы их развития от модернизации в процессе ремонтов с сохранением тяговых двигателей постоянного тока до перехода к поездам новых поколений с асинхронными тяговыми двигателями. Сделанные в статье выводы и комментарии носят предметный характер и имеют практическую ценность.

Ключевые слова: мотор-вагонные поезда, тяговый электродвигатель, импульсный регулятор, преобразователь постоянного напряжения, бесколлекторный электродвигатель, энергосбережение.

Электропоезда, состоящие из моторных и прицепных вагонов, широко используют для перевозки пассажиров в пригородном и местном сообщении. Они питаются от контактной сети постоянного и переменного тока напряжением соответственно 3 кВ и 25 кВ. Основу парка составляют поезда постоянного тока — примерно 75% от общего их количества. Это связано с тем, что большинство крупных городов находится в зоне электрификации железных дорог на постоянном токе; здесь электропоезда эксплуатируются в наиболее интенсивном режиме (среднесуточный пробег — около 500 км, составность — 10–12 вагонов, включая 5–6 моторных, маршрутная скорость — 40–50 км/ч при максимальной до 100–120 км/ч).

Значительная разница реализуемых значений маршрутной и максимальной скоростей объясняется частыми остановками поезда в пригородном сообщении; среднее расстояние между остановками составляет 5–7 км, вследствие чего имеют место значительные пусковые и тормозные потери энергии, а также ее высокий удельный расход — обычно более 35–40 Вт·ч/т км брутто, причем доля потерь достигает 30–35%.

Таблица 1/Table 1

Этапы развития тяговых электроприводов электропоездов постоянного тока
Stages of evolution of traction electric engines of DC electric trains

Этап 1/Stage 1	Этап 2/Stage 2	Этап 3/ Stage 3
Коллекторный ТЭД постоянного тока последовательного возбуждения/ commutator traction DC electric motor of series excitation		Бесколлекторный ТЭД (асинхронный) / brushless motor (asynchronous motor, induction motor)
Реостатно-контакторное регулирование / rheostat contactor control	Импульсное регулирование/ pulse control	Частотное регулирование / frequency control

Затраты на электроэнергию в системе эксплуатации электропоездов достигают 40% от всех расходов, что с учетом постоянного повышения тарифов на 12–20% за год выдвигает задачу энергосбережения на первый план.

Сейчас уже обозначилась четкая тенденция. Самыми старыми являются электропоезда типов ЭР2 и ЭМ2 с тяговыми электродвигателями постоянного тока последовательного возбуждения мощностью 150 кВт при резисторно-контакторном регулировании с переключением группировок ТЭД и без электрического торможения.

На последующих сериях электропоездов, включая выпускаемые сейчас типа ЭД4М, использовались усовершенствованные ТЭД мощностью 250 кВт без переключения группировок с сохранением резисторно-контакторного регулирования, что существенно увеличило пусковые потери. Для компенсации этого эффекта предусмотрено рекуперативно-резисторное торможение, но рекуперация возможна при скорости не ниже 40 км/ч, а затем осуществляется плавный переход на резисторное торможение и пневматическое колодочное. Поскольку в обычном режиме движения поезд после выбета тормозит от скорости 50–60 км/ч и ниже, то эффективность рекуперации низка, что фиксируется счетчиками возвращаемой в сеть электроэнергии (обычно 1–2% от потребляемой).

В эксплуатации находятся также электропоезда типа ЭМ2И с импульсным регулированием; в 1960–1975 годах на бывшую Прибалтийскую и Октябрьскую дороги поступали поезда ЭР2И и ЭР12, скоростной ЭР200. То есть имеется достаточный опыт применения безрезисторного регулирования ТЭД [1].

Принципиально новый этап в развитии тяговых электроприводов связан с применением асинхронных ТЭД [2]. Полный

цикл испытаний прошли электропоезда типа ЭТ 2А с отечественным инверторным оборудованием и типа ЭД6 с преобразователями японской фирмы «Хитачи».

Таким образом, налицо возможность сравнить тяговые электроприводы разных поколений или этапов развития, которые показаны в таблице 1. Это сравнение должно быть выполнено по энергетическим, эксплуатационным и экономическим критериям отдельно для сфер электровагоностроения и капитального ремонта (модернизации) электропоездов.

Этап 1 является наиболее отработанным и характеризуется наименьшими затратами на стадии производства. Электровагоностроительные заводы до настоящего времени выпускают по заказу ОАО «РЖД» поезда с ТЭД постоянного тока и резисторно-контакторным регулированием. В условиях пригородного сообщения пусковые потери достигают 14–18% от потребляемой энергии. Эффективность рекуперации — низкая из-за ограниченности диапазона ее применения, т. е. из-за низкой скорости начала торможения.

На этом этапе возможна реализация отдельных мероприятий по снижению потерь энергии; проведены испытания электропоезда типа ЭД4Э с переключением группировок ТЭД, что обеспечило снижение пусковых потерь и расширило диапазон рекуперации. Однако для этого потребовалось повысить номинальное напряжение ТЭД с 750 до 1500 В, что существенно усложнило его конструктивное исполнение. Еще одно мероприятие связано с применением дополнительной группировки из восьми последовательно соединенных ТЭД двух моторных вагонов, как было сделано на электропоезде типа ЭР200.

Этап 2 предлагает более радикальное решение задачи по энергосбережению. При импульсном регулировании почти полностью исключаются пусковые потери, а рекуперация становится возможной до ско-



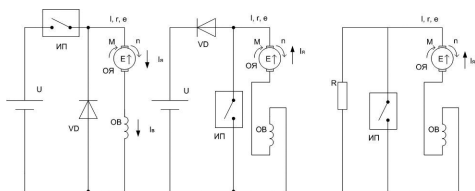


Рис. 1. Импульсное регулирование тяговых электродвигателей: а) тяговый режим; б) рекуперативное торможение; в) резисторное торможение.

Pic. 1. Pulse control of traction electric motors: а) traction mode; б) regenerative braking; в) resistor braking.

рости 8–10 км/ч. Стоимость импульсного преобразователя постоянного напряжения (ИП) имеет тенденцию к снижению при одновременном повышении надежности. Особое значение имеет возможность реализации плавного регулирования, что позволяет использовать современные системы автоматического управления.

Этап 3 наилучшим образом способствует решению всех проблем; при этом коллекторный ТЭД заменяют бесколлекторным асинхронным, но с более сложной системой частотного регулирования. Концепция такого электропоезда типа ЭД6 предполагает снижение числа моторных вагонов в поезде с одновременным повышением мощности на их ось. Но фактор увеличения стоимости электропривода с асинхронными ТЭД в условиях убыточности пригородных перевозок сдерживает переход к такому варианту.

Оценивая этапы развития тяговых электроприводов, можно сделать предварительные выводы. Что касается производства новых поездов, то мировому уровню соответствуют электроприводы с бесколлекторными ТЭД, причем наряду с асинхронными следует рассматривать и другие типы ТЭД – синхронные с постоянными магнитами и индукторные. Наиболее проработанным является вариант с асинхронными ТЭД, в пользу которого свидетельствует пополнение парка подвижного состава Московского метрополитена поездами «Русич». Для пригородных поездов аналогичное решение еще нельзя считать готовым для серийного производства, но с учетом развития силовой полупроводниковой техники и освоением силовых транзисторов сферу производства следует ориентировать на реализацию этапа 3.

Не менее важной остается проблема модернизации эксплуатируемого парка в процессе плановых капитальных ремонтов. При этом наиболее приемлем вариант импульсного регулирования (этап 2), поскольку можно использовать имеющиеся ТЭД и моторную тележку в целом. Это минимизирует затраты на модернизацию и обеспечивает такую же экономию энергозатрат, как на этапе 3.

Электропоезда эксплуатируются в системе пригородных сообщений не менее 40 лет, чему способствует применяемая новая технология капитального ремонта с prolongation ресурса (КРП). При этом дополнительные затраты на модернизацию с применением импульсного регулирования окупаются за 3–4 года за счет экономии энергозатрат.

Задача модернизации электропоездов актуальна для ОАО «РЖД», поскольку энергетическая программа предусматривает снижение удельных расходов энергии для всех видов перевозок, особенно пригородных, имеющих самые высокие удельные энергозатраты. Чтобы добиться решения этой, задачи следует обобщить известные методики расчета импульсных преобразователей, приспособив их к возможностям новых силовых полупроводников ключевых элементов, в частности к повышению частоты.

Обобщенная методика должна включать все режимы функционирования ТЭД – двигательный, рекуперативного и резисторного торможения (рис. 1). Они реализуются одними и теми же элементами преобразовательной системы – импульсным преобразователем ИП и диодом VD, которые переключают в зависимости от режима. При резисторном торможении используют резистор R на полную мощность ТЭД (см. рис. 1, в).

Для перехода из режима тяги в режим торможения реверсируют обмотку возбуждения ОВ, чтобы сохранить направление тока i в ОВ I и направление ЭДС с якорной обмотки Я. При этом направление тока I_{α} в обмотке Я меняется и происходит смена направления вращающего момента М при том же направлении вращения якоря.

Система импульсного регулирования при пуске и торможении поезда работает в переходном режиме с ускорением или

Таблица 2/ Table 2

Расчет регулировочных и пульсационных характеристик импульсного регулирования
Computation of adjusting and pulsing features of pulse control

Стадии расчета/ Computation stages	ИП / mode of pulse convertor	Тяга, рис. 1, а / Traction, pic. 1, a	Рекуперация, рис. 1, б / Regeneration, pic. 1, б	Резисторное торможение, рис. 1, в / Resistor braking, pic. 1, в
I. Дифференциальные уравнения / Differential equations	ВКЛ/ON	$L \frac{di}{dt} + ri = U - e$	$L \frac{di}{dt} + ri = e$	
	ВЫКЛ/OFF	$L \frac{di}{dt} + ri = -e$	$L \frac{di}{dt} + ri = e - U$	$L \frac{di}{dt} + (r + R) i = e$
II. Алгебраические уравнения / algebraic equations	ВКЛ/ON	$L \Delta I / kT + rI = U - E$	$L \Delta I / kT + rI = E$	
	ВЫКЛ/OFF	$-L \Delta I / (1 - k) + rI = -E$	$L (-\Delta I) / (1 - k) + T + rI = E - U$	$L (-\Delta I) / ((1 - k) T) + (r + R) I = E$
III. Результирующие формулы / Final formula	$I =$	$(Uk - E) / r$		$E / (R (1 - k) + r)$
	$\Delta I =$	$UTk (1 - k) / L$		$\approx ETk / L$

замедлением около 0,8 м/с². Однако, поскольку постоянные времени механических и электромагнитных процессов в тяговом электроприводе отличаются на 2–3 порядка, то процесс импульсного регулирования можно считать квазистационарным. Исходя из этого принимаем, что в каждом из интервалов kT (рис. 2) импульсного цикла с периодом T электромагнитный процесс описывается дифференциальными уравнениями, соответствующими второму закону Кирхгофа. Эти уравнения представлены в таблице 2 (строка I).

Для решения этих уравнений обычно принимают допущение о том, что магнитный поток ТЭД в квазистационарном режиме идеально сглажен, т. е. $c\Phi(I) = \text{const}$ и соответственно $e \sim E$. Следовательно, величина E определяется средним значением тока I, которое показано на рис. 2 штриховой линией. Таким образом, в дифференциальных уравнениях можно сделать замену

$e \approx E = c\Phi(I) n.$ (1)

Кроме того, ввиду незначительного влияния активного сопротивления г обмоток ТЭД целесообразно ввести аналогичное допущение

$ri \approx I.$ (2)

Особое внимание стоит уделить индуктивности l цепи ТЭД, которую для импульсного режима принято определять как

$L = (L_0 + K_d L_M) + L_{cp},$ (3)

где L₀, L_M – соответственно индуктивности рассеяния и намагничивания ТЭД;

L_{cp} – индуктивность сглаживающего реактора (если он предусмотрен);

K_d – коэффициент демпфирования.

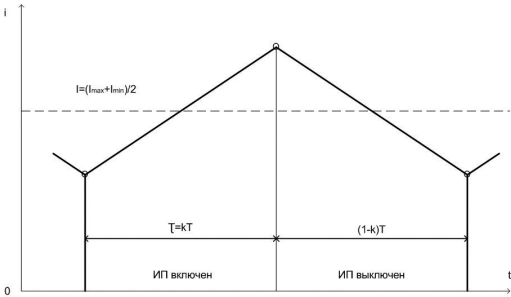


Рис. 2. Пульсации тока ТЭД при импульсном регулировании.

Pic. 2. Current pulsation of traction electric motor under pulse control mode.

Если ТЭД обладает мощностью 150–250 кВт, выражение в скобках принимает значение 35–55 мГн для f = 450–950 Гц при K_d = 0,5–0,6. Для более высоких частот усиливается влияние поверхностного эффекта, что эквивалентно увеличению активного сопротивления контура вихревых токов и росту K_d.

При введенных допущениях каждое дифференциальное уравнение для соответствующего интервала импульсного цикла решается с представлением результата в виде экспоненциальной функции. При этом необходима стыковка решений по границам интервалов, что выполнимо, но приводит к сложным зависимостям, неудобным для практики. Например, при определении размаха пульсаций и его экстремального значения.

С учетом специфики тяговых электроприводов, включая ограничение амплитуды пульсаций и перспективы повышения рабочей частоты ИП, предложен способ решения дифференциальных уравнений, основанный на допущении линейности изменения тока i в функции времени t. Это допущение соответствует диаграмме i(t)





на рис. 2; оно может быть выражено аналитически:

$$\frac{di}{dt} = \frac{\Delta I}{kT} \quad (\text{ИП включен}); \quad (4, a)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{-\Delta I}{(1-k)T} \quad (\text{ИП выключен}). \quad (4, б)$$

Подставив эти выражения в соответствующие дифференциальные уравнения таблицы 2, получим систему линейных алгебраических уравнений (строка II). Ее решение дает выражения для регулировочных $I(k)$ и пульсационных $\Delta I(k)$ характеристик, которые представлены в аналитической форме в строке III.

Анализ регулировочных характеристик показывает, что для режимов тяги и рекуперации зависимость $I(k)$ линейна при $E = \text{const}$. Но поскольку значение ЭДС, т. е. E , зависит от n и I , то в задачах автоматизации тяговых электроприводов принято рассматривать регулировочные свойства привода при $n = \text{const}$, ибо механические процессы протекают медленно. При этом остается зависимость $E(I)$ при $n = \text{const}$. Обычно ТЭД электропоезда в момент пуска и остановочного торможения работают с максимальным током, ограниченном условиями сцепления колес с рельсами. Это соответствует глубокому насыщению магнитной системы ТЭД, т. е. слабой зависимости магнитного потока $\Phi(I)$ и, следовательно, ЭДС от тока.

Таким образом, регулировочные характеристики $I(k)$ для тяги и рекуперации линейны. Для резисторного торможения они нелинейны и при проектировании тягового электропривода их можно рассчитывать в виде двухпараметрической зависимости $I|k, n|$ по формуле $I(k)$ с учетом $\Phi(I)$. Но для этих зависимостей важно, чтобы они были плавными, а нелинейность при наличии обратных связей не имела существенного значения.

Более значимыми являются пульсационные характеристики $\Delta I(k)$, поскольку пульсации тока определяют работоспособность ТЭД. Эксплуатируемые электропоезда с импульсным регулированием удовлетворительно функционируют при пульсациях тока до 8%, но при стендовых ис-

пытаниях зафиксировано усиление искрения в щеточном контакте по сравнению с режимом питания постоянным током без пульсаций. Целесообразно снизить допустимый уровень пульсаций до 4–5%.

Для расчета пульсационного режима нужно определить экстремальное значение ΔI путем дифференцирования пульсационной характеристики и приравнивания соответствующей производной нулю, т. е.

$$\frac{d(\Delta I)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{UTk(1-k)}{L} \right] = \frac{UT}{L} (2k-1) = 0, \quad (5)$$

откуда следует

$$k(\Delta I_{\max}) = 0,5; \quad \Delta I_{\max} = \frac{UT}{4L}. \quad (6)$$

По этой формуле для тягового электропривода поезда ЭМ2И получим относительное значение размаха пульсаций 100

$$\frac{\Delta I_{\max}}{I_{\max}} = 8,5 \%. \quad \text{Для снижения пульсаций}$$

целесообразно повысить частоту f , что возможно, если выполнить ИП на базе IGB-транзисторов. Они не требуют контура принудительной коммутации и имеют падение напряжения в силовой цепи значительно ниже, чем обычно применяемые в ИП тиристоры.

Отдельно стоит вопрос об устойчивости процесса импульсного регулирования. Требование по устойчивости сводится к тому, что (см. рис. 2) если в интервале kT , т. е. при включенном ИП, ток i всегда нарастает $\frac{di}{dt} > 0$, то в интервале $(1-k)$, т. е. при выключенном ИП обязательно должно быть выполнено условие $\frac{di}{dt} < 0$. В противном случае неизбежно увеличение тока, то есть система становится неуправляемой. Анализ формул для ИП-выкл в таблице 2 (строки I, II) показывает, что в режиме тяги система всегда устойчива, поскольку при любых условиях

$$\frac{di}{dt} \sim (-E - rI) < 0. \quad (7)$$

В режиме рекуперации устойчивость не обеспечивается в зоне высоких скоростей, когда

$$E > (U + rI). \quad (8)$$

Поэтому в указанной зоне, т. е. при $E > U$, необходимо использовать рекуперацию с непрерывной отдачей энергии в тяговую

сеть при уменьшении потока возбуждения двигателей. В граничной точке этого режима, то есть при $E=U$, следует перейти на импульсный режим по схеме рис.1, б.

ВЫВОДЫ

1. Мотор-вагонные электропоезда пригородного сообщения являются перспективным видом подвижного состава, но их тяговые электроприводы используют устаревшие технические решения, что приводит к значительным пусковым и тормозным потерям электроэнергии.

2. Для сферы производства новых электропоездов рекомендуется тяговый электропривод с бесколлекторными электродвигателями.

3. При модернизации электропоездов эксплуатируемого парка в процессе капитального ремонта целесообразно исполь-

зовать импульсное регулирование, что позволяет существенно снизить потери энергии на тягу.

4. Предложенную методику расчета регулировочных и пульсационных характеристик систем импульсного регулирования рекомендуется использовать для сравнительного анализа вариантов выполнения импульсных преобразователей при учете требований их электромагнитной совместимости с тяговыми электродвигателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иньков Ю. М., Ротанов В. Н., Феоктистов В. П., Чаусов О. Г. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава/Под ред. Ю. М. Инькова. — М.: Транспорт, 1982. — 263 с.

2. Солодунов А. М., Иньков Ю. М., Ковалик Г. Н., Литовченко В. В. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. — Рига: Зинатне, 1991. — 351 с. ●

DEVELOPMENT OF TRACTION DC ELECTRIC MOTORS OF ELECTRIC TRAINS

Inkov, Yury M. — D. Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russia.
Feoktistov, Valery P. — D. Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russia.

Shabalin, Nickolay G. — D. Sc. (Tech), professor, director of Kirov branch of Moscow State University of Railway Engineering, Kirov, Russia.

ABSTRACT

Trains with electric motorized coaches prevail in commuter passenger traffic in the areas surrounding large regional centers. The article studies current state of electric commuter trains and analyzes stages of their development including modernization with maintaining of DC traction motors and transition to trains of a new generation equipped with asynchronous motors. Conclusions and comments are aimed at practical implementation.

ENGLISH SUMMARY

Background. Electric trains consisting of motor and trailer cars are widely used for the carriage of passengers in commuter and local traffic. They are powered by DC and AC catenaries with voltage of 3 kV and 25 kV respectively. The core of the train park is DC trains — about 75% of their total number. This is due to the fact that most of the major cities are located in the zone of DC electrification of railways; here electric trains are operated in the most intensive mode (average daily mileage is about 500 km, series of cars — 10–12 cars, including 5–6 motor cars, block speed is 40–50 km/h with a maximum of 100–120 km/h).

Significant difference in block and maximum speeds is explained by frequent stops of commuter trains; the average distance between stops is 5–7 km, so that there are significant starting and braking energy losses, as well as its high discharge intensity — usually more than 35–40 W · h / ton kilometer gross, loss ratio reaches 30–35%.

Energy costs in operation system of electric trains reach 40% of total expenditure, that, given the constant increase of tariffs by 12–20% per year, brings to the forefront the problem of energy saving.

Now a clear trend is marked out. The oldest types of electric trains are ER2 and EM2 with DC traction motors with series with wattage of 150 kW at a resistor- contactor

regulation with switching groups of traction electric motor and without electrical braking.

On the subsequent series of electric trains, including the type of the currently produced ED4M, advanced traction electric motors are used with wattage of 250 kW without switching of groups, preserving resistor- contactor control, which significantly increased the starting losses. To compensate this effect, regenerative-resistor braking is provided for, but regeneration is possible at speeds below 40 km/h, and then there is a smooth passage to resistor braking and pneumatic shoe type braking. Since in normal mode, a train after slowing-down brakes at the speed of 50–60 km/h or less, the regeneration efficiency is low, this is fixed by the counters of energy, returning into network (typically 1–2% of consumption).

Electric trains of EM2I electric type with pulse control are in operation; in 1960–1975 years on the former Baltic and October Roads trains of ER2I and ER12 types, and high-speed train of ER200 type were in operation. I.e., there is sufficient experience of non-resistor regulation of traction electric motors [1].

A new stage in the development of traction electric motors is associated with the use of asynchronous traction electric motors [2]. Electric trains of ET2A type with domestic inverter equipment and of ED6 type of Japanese firm «Hitachi» passed a full range of tests.

Objective. The study aims at comparing different generations of traction electric drives or stages of development. This comparison should be made on energy, operational and economic criteria for separate spheres of electric car-building and overhaul (modernization) of electric trains. To solve this problem, the authors pose the task of generalizing the known methods for calculating pulse converters, adapting them to the possibilities of new power semiconductors of key elements, in particular to increase in frequency.

