



Повышение энергоэффективности управления движением метрпоездов



Леонид БАРАНОВ
Leonid A. BARANOV

Владислав МАКСИМОВ
Vladislav M. MAKSIMOV



Баранов Леонид Абрамович — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Максимов Владислав Михайлович — кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия.

Improvement of Energy Efficiency of Metro Trains' Traffic Control

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 13)

Изложены теоретически обоснованные методы повышения энергоэффективности управления движением поездов метрополитена – выбор режимов тяги, распределение времени хода по линии на времена хода по перегонам, применение рекуперативного торможения. Приведены примеры внедрения научно-технических разработок на Московском метрополитене. Описаны способы управления электроподвижным составом в условиях ограничения токов фидеров тяговых подстанций, особенности проследования неперекрываемых изолирующих промежутков в режиме рекуперации, дан анализ динамики изменения показателей энергоэффективности.

Ключевые слова: метрополитен, движение поезда, энергоэффективность, энергооптимальный режим управления, квазиоптимальный режим, время хода, рекуперативное торможение, расход энергии на тягу, удельный расход электроэнергии.

В стоимости произведенных услуг Московского метрополитена значительную часть (порядка 10%) составляет оплата за электроэнергию. Расход электроэнергии на тягу доминирует в общем расходе энергии и достигает 80%.

В условиях постоянного роста пассажиропотока, скорости перевозки пассажиров, увеличения парности движения, ввода новых участков линий и нового подвижного состава на базе проведенных исследований Московским государственным университетом путей сообщения совместно со столичным метрополитеном разработаны и внедрены технологии повышения энергоэффективности. Эти технологии используют результаты работ двух направлений.

Первое направление базируется на строгом математическом решении следующих оптимизационных задач:

— выбор последовательности режимов управления движением поездов, обеспечивающих минимум расхода энергии на тягу при заданном времени хода по перегону, выполнении всех скоростных ограничений;

— распределение времени хода по линии на времена хода по перегонам таким образом, чтобы расход энергии, затрачиваемый на движение по линии, был минимален.

Решение первой задачи [1, 2] строится на принципе максимума в формулировке Милютина и Дубовицкого. Решение второй задачи [3] использует метод исследования на условный экстремум функции многих переменных.

Второе направление связано с использованием режима рекуперации на вводе в эксплуатацию новом подвижном составе, имеющим тяговый привод на асинхронных двигателях. При внедрении режима рекуперации необходимо было провести исследования, отвечающие на следующие вопросы:

— обеспечивается ли бесперебойное функционирование системы безопасности движения при воздействии помех, генерируемых в режиме рекуперативного торможения;

— как влияют перенапряжения и помехи, возникающие при разрыве силовых цепей во время прохождения поездом неперекрываемых изолирующих промежутков контактного рельса в режиме рекуперативного торможения, на функционирование систем управления подвижного состава и безопасности движения;

— какова продольная динамика поезда при прохождении неперекрываемых изолируемых промежутков в режиме рекуперативного торможения;

— какая часть энергии, генерируемой поездами в режиме рекуперативного торможения, находит потребителя.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Учеными и специалистами МИИТ было разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволившее создать «Автоматизированную систему выбора энергооптимальных режимов управления электроподвижным составом метрополитена» (АСЭР).

Результаты расчётов АСЭР предназначены для использования:

— службой электроснабжения при определении часовых, суточных, месячных и годовых потребностей электроэнергии на тягу поездов;

— службой подвижного состава для реализации энергооптимальных режимов

вождения поездов для часов-пик и в «непиковое» время;

— службой движения при составлении графиков движения поездов с учетом энергооптимального распределения времени хода по линии на времена хода по перегонам.

АСЭР имеет следующую функциональную структуру:

— подсистема управления базами данных (подвижного состава, линий метрополитена, перегонов, устройств электроснабжения, графика движения, результатов расчётов);

— подсистема тяговых расчётов по заданным режимам ведения;

— подсистема энергооптимальных тяговых расчётов;

— подсистема тяговых расчётов семейства траекторий движения для различных времен хода;

— подсистема энергооптимального распределения времени хода по линии на времена хода по перегонам;

— справочная подсистема.

Исходные базы данных содержат информацию, достаточную для выполнения тяговых расчётов и расчёта потребности в электроэнергии на тягу поездов. Базы данных могут быть пополнены при вводе новых линий, перегонов, вагонов нового типа и при изменении их параметров.

Для оценки эффекта от внедрения оптимальных режимов еще в 2007 году на Серпуховско-Тимирязевской линии, где в то время эксплуатировались семивагонные составы с вагонами типа 81–717/714, выполнены расчёты в двух вариантах:

— расчёт по режимам ведения, полученным с помощью регистратора параметров движения поездов (РПДП);

— энергооптимальный тяговый расчёт для такого же времени хода по каждому перегону, полученный в АСЭР.

В результате расчёта установлено, что ведение по режимам, полученным с помощью программы АСЭР, может *позволить снизить расход электроэнергии* для одной поездки:

— по 1-му пути на 44,20 кВт·ч, что составляет 7,33%;

— по 2-му пути на 30,28 кВт·ч, или 4,89%;

— по линии на 74,48 кВт·ч, или 6,09%.





Таблица 1

Расчётная экономия по линиям метрополитена

Название показателей		Наименования линий										ЛДЛ	СТЛ	ТКЛ	КЛ	КРЛ	КОЛЛ	АПЛ	ЗЛ	СЛ	Всего	
		Результаты тяговых расчётов																				
Для одного поезда	Расход электроэнергии, кВт•ч	На 1-м пути	359,16	652,00	313,61	248,06	594,78	114,90	533,36	676,75	390,02		3883									
		На 2-м пути	320,59	658,00	269,00	264,87	692,56	193,50	542,77	726,48	370,12		4038									
	По линии	679,75	1310,00	582,61	512,93	1287,34	308,40	1076,13	1403,23	760,14	7921											
	Сокращение расхода электроэнергии, кВт•ч	22,12	43,7	17,0	17,0	40,1	3,3	91,7	78,7	48,3	362											
Итого за 2007 год																						
Для линии в год	Количество пар поездов за год	167376	178460	167436	167708	179716	134236	176044	17052	134312	1476340											
	Расход электроэнергии, млн кВт•ч	113,8	233,8	97,6	86,1	231,4	41,4	189,5	240,0	102,1	1336											
	Стоимость электроэнергии, млн руб.	184,3	378,8	158,0	139,5	374,8	67,1	306,9	388,8	165,4	2164											
Расчётная экономия по линии, млн руб.																						
	Оптимальное управление, млн руб.	6,00	12,63	4,60	4,64	11,66	0,71	26,15	21,80	10,51	98,83											

Анализ причин меньшего расхода электроэнергии при энергооптимальных режимах был проведен путем сравнения режимов ведения поездов машинистами, зафиксированных РПДП, с энергооптимальными режимами, полученными АСЭР. Анализ показал, что на многих перегонах машинисты выполняют пуск поезда со станции до скорости 20–30 км/ч и более в режиме Ход 2. В этом режиме тяговое усилие при скорости более 15 км/ч резко снижается. Оптимальным, конечно, является пуск в режиме Ход 3, имеющем максимальное тяговое усилие до скоростей 50 км/ч и более. Кроме того, при повторном подключении тяги отключение тягового режима осуществляется поздно, почти перед самой станцией и перед переходом в режим торможения. При подтормаживании на крутых спусках часто скорости снижаются более чем на 10 км/ч, хотя достаточно снижать скорость на 3–5 км/ч. Рассчитанная последовательность режимов позволила исключить энергозатратные режимы ведения.

Источником сокращения расхода электроэнергии на тягу является также реализованное расчётами в АСЭР оптимальное распределение времени хода по линии на времена хода по перегонам.

Так, например, на основании расчётов, выполненных для Серпуховско-Тимирязевской линии, показано, что переход в графике движения на энергооптимальные времена хода, полученные с помощью программы АСЭР, позволит снизить расход электроэнергии при движении поезда по 1-му пути на 2,5%, по 2-му пути на 3,2% и по линии в целом на 2,9%.

Учитывая значительный эффект от использования энергооптимальных режимов ведения поездов, службой подвижного состава Московского метрополитена было принято решение осуществить на всех линиях переход на режимы, полученные с помощью АСЭР. Для этого были рассчитаны энергооптимальные режимы ведения по перегонам и энергооптимальное распределение времени хода по линии на времена хода по перегонам. Проведена опытная проверка полученных расчётным путем режимов. Определена расчётная экономия по линиям метрополитена по сравнению с режимами ведения поездов при графико-

вых временах хода, реализуемых в 2007 году. Результаты представлены в таблице 1.

С 2008 года началось поэтапное внедрение полученных результатов расчёта энергооптимальных режимов ведения поездов по перегонам. МИИТ в течение первого полугодия провел тяговые расчёты и передал во все электродепо данные по оптимальным режимам ведения поездов и расстановке стрел, указывающих на место переключения режимов тяги. Службой подвижного состава организованы контрольные поездки и контроль выполнения рекомендаций по режимам. Службой электроснабжения проводился мониторинг расхода электроэнергии при действующих режимах ведения поездов и рекомендованных энергооптимальных.

В конце года сделан анализ полученных результатов и даны рекомендации по снижению потребления электроэнергии на тягу поездов. МИИТ подготовил предложения по оптимальному распределению участкового времени хода для вновь разрабатываемых графиков движения.

Первые результаты по внедрению энергооптимальных режимов ведения поездов можно проследить, сравнивая годовой расход электроэнергии на тягу поездов и выполняемую тонно-километровую работу метрополитена. Так, в 2008 году, пока шла подготовка, оба эти показателя по сравнению с 2007 годом изменялись практически пропорционально. Тонно-километровая работа выросла на 5,36%, а расход электроэнергии на 5,77%. Зато в 2009 году эти показатели имели значения 3,96% и 2,57% соответственно. Следовательно, расход электроэнергии вырос менее чем в 1,5 раза по сравнению с ростом тонно-километровой работы.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУПЕРАЦИИ

В 2009 году на Филевской и Арбатско-Покровской линиях начинается опытная эксплуатация первых поездов с вагонами типа 81–740, 81–741 с тяговым приводом на асинхронных двигателях, позволяющих реализовать режим рекуперативного торможения.

Перед включением в эксплуатацию режима рекуперативного торможения были проведены исследования (МИИТ,

ВНИИЖТ, метрополитен), позволившие сделать следующие выводы [4, 5]:

- тяговый привод при рекуперативном торможении обеспечивает устойчивую работу во всем диапазоне скоростей торможения, величины тормозных путей не превышают нормативных значений, токовые перегрузки в тормозной сети отсутствуют;

- перенапряжения от разрыва тока при прохождении токоразделов не приводят к сбоям в работе оборудования поезда, амплитуда перенапряжения на электроподвижном составе не превышает 1400 В, длительность импульсов над уровнем 1050 В максимально составляет 43 мс, что не превышает величин, приведенных в нормах;

- включение режима рекуперативного торможения не приводит к изменению электромагнитной обстановки и не оказывает отрицательного влияния на функционирование систем обеспечения безопасности;

- расчётная оценка экономии энергии за счет межпоездного обмена в режиме рекуперации является случайной величиной, зависящей от многих факторов (тип линии, интенсивность движения, график движения). Оценка среднего значения экономии энергии за счет межпоездного обмена по отношению к расходу энергии на тягу для различных линий Московского метрополитена находится в диапазоне от 10 до 30%;

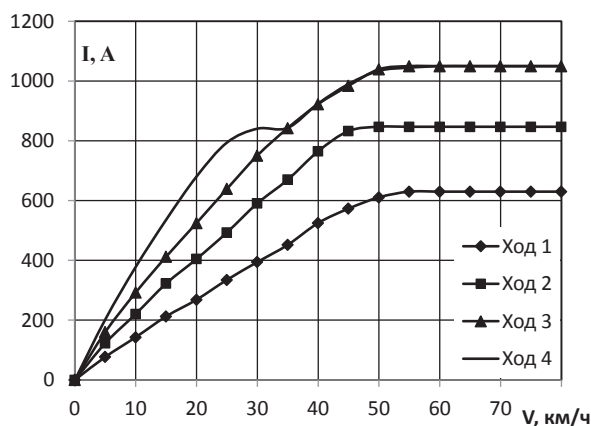
- продольные колебания в поезде, нарушающие условия комфорта и вызывающие жалобы пассажиров, возникали при прохождении поездом неперекрываемых токоразделов в режиме рекуперативного торможения при скоростях ниже 30 км/ч. Разработчиками привода был изменен алгоритм взаимодействия рекуперативного и реостатного тормозов – в этих условиях рекуперативный тормоз замещается реостатным и запрещается обратный переход.

Внедрение режима рекуперативного торможения на Филевской линии было начато в феврале 2010 года поочередным включением соответствующего модуля программного обеспечения на вагонах. В связи с этим за базовый расход на тягу поездов принимается период с марта 2009





Рис. 1. Токковые характеристики тяговых режимов вагонов типа 81–760/761.



года по февраль 2010 года, который составил 22511566 кВт·ч. Сравнение проводим с годовым расходом с марта 2010 года по февраль 2011 года — 16473267 кВт·ч. Снижение энергопотребления на тягу поездов за 12 месяцев после внедрения режима рекуперативного торможения на линии — 26,82%.

Внедрение режима рекуперативного торможения на Арбатско-Покровской линии (АПЛ) было начато в сентябре 2010 года. Базой для сравнения был принят период с октября того года по сентябрь 2011 года. Расход на тягу поездов составил 172606167 кВт·ч. Годовое потребление электроэнергии после внедрения режима рекуперативного торможения с сентября 2011 года по август 2012 года — 129621253 кВт·ч. Экономия — 42984912 кВт·ч или 24,9%.

Базой для сравнения расхода на Бутовской линии был период с октября 2009 года по ноябрь 2010 года. Расход на тягу поездов составил 11966664 кВт·ч. Потребление электроэнергии на тягу после внедрения режима рекуперативного торможения с ноября 2010 года по декабрь 2011 года — 10607033 кВт·ч. Экономия — 1359611 кВт·ч или 11,36%.

На основе полученных результатов были рассчитаны новые энергооптимальные режимы управления поездами и энергооптимальное распределение времени хода по линии на времена хода по перегонам.

УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ТОКОВ ФИДЕРОВ

В 2012 году на Калининской линии в связи с вводом в эксплуатацию составов с вагонами типа 81–760/761 с тяговым приводом на асинхронных двигателях и при увеличении парности движения поездов в часы-пик

возникли систематические отключения фидеров тяговых подстанций из-за перегрузки. Отключения фидеров происходили чаще всего на длинных перегонах с повторным подключением тяги. На таких перегонах на одной фидерной зоне в тяговом режиме оказывались сразу два состава, и токи превышали допустимые значения. Потребовалось сделать выбор квазиоптимальных режимов с ограничением максимального тока.

В режиме тяги вагоны этого типа имеют четыре режима тяги. На рис. 1 представлены токковые характеристики тягового режима привода вагона при максимальной загрузке пассажирами. При скорости больше 35 км/ч характеристики режимов Ход 3 и Ход 4 совпадают и имеют максимальные значения токов. Анализ работы системы электроснабжения в пиковый период времени показал, что для прекращения срабатывания фидерной защиты необходимо уменьшить максимальный тяговый ток не менее чем на 25%.

Рассматривалось несколько вариантов достижения такого результата. Например, использовать в тяговом режиме при пуске только режим Ход 2 и Ход 1. Однако, как видно из тяговых характеристик вагона (рис. 2) при максимальной загрузке пассажирами, максимальное тяговое усилие сократится более чем на 40%. Еще один вариант уменьшения максимального тока путем использования тягового режима в восьмивагонном составе только для шести вагонов. Но при этом максимальное тяговое усилие сократится на 25%. Все это приведет к соответствующему уменьшению ускорения, что недопустимо, так как дает значительное увеличение расхода электроэнергии на тягу и повлияет на минимальный интервал попутного следования поездов.

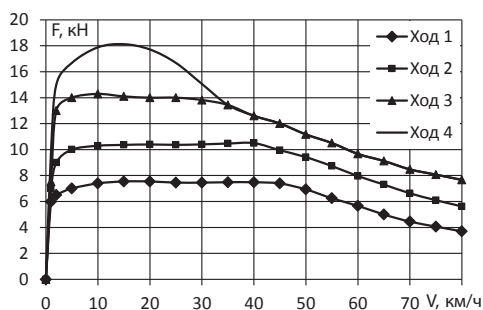


Рис. 2. Тяговые характеристики тяговых режимов вагонов типа 81–760/761.

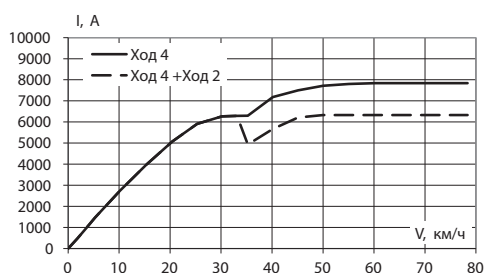


Рис. 3. Тяговый ток восьмивагонного состава в зависимости от скорости при использовании режимов Ход 4 и Ход 4+Ход 2.

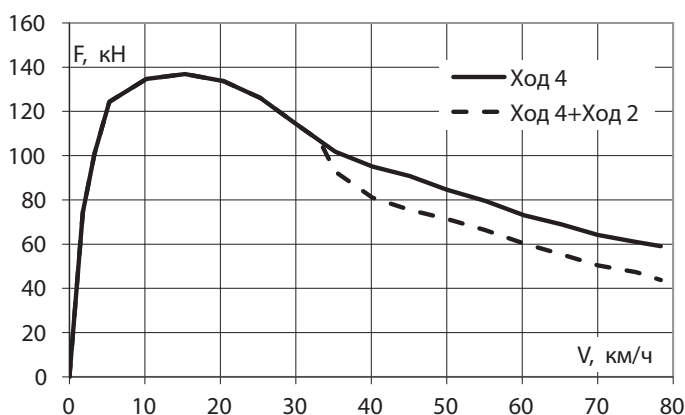


Рис. 4. Сила тяги восьмивагонного состава в зависимости от скорости при использовании режимов Ход 4 и Ход 4+Ход 2.

Самым эффективным предложением является использование режима Ход 4 в начале разгона до скорости 30–35 км/ч, а далее следует продолжить разгон в режиме Ход 2. Будем обозначать такой режим следующим образом: Ход 4 + Ход 2. Сравнение зависимости тягового тока и силы тяги восьмивагонного состава от скорости при использовании режимов Ход 4 и Ход 4 + Ход 2 приведено на рис. 3 и 4. Из графиков видно, что максимальное значение тока в режиме Ход 4 + Ход 2 совпадает с максимальным током в режиме Ход 2. При этом сила тяги остается на уровне, соответствующем режиму Ход 4 при скорости менее 35 км/ч, и лишь при больших скоростях уменьшается до величин в режиме Ход 2.

На рис. 5 представлены кривые изменения скорости при пуске в различных режимах, полученные при расчёте с использованием АСЭР. По результатам расчёта выявлены количественные параметры, характеризующие каждый из режимов пуска в таблице 2.

Предложенный режим Ход 4 + Ход 2 для управления поездом с вагонами типа 81–760/761, учитывающий ограничения по системе энергоснабжения, приводит к незначительному возрастанию расхода электроэнергии по сравнению с пуском в режиме Ход 4. Сравнительные расчёты показывают, что ограниченное использование тягового режима Ход 4 только при скоростях ниже 30–35 км/ч приводит к увеличению расхода энергии менее чем на 1,4%. Причем полный отказ от режима Ход 4 и пуск поезда только в режиме Ход 2 дает увеличение расхода электроэнергии ещё на 7%.

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ

Показателем оценки внедрения энергоэффективных технологий на Московском метрополитене является динамика прироста тонно-километровой работы и соответствующий ей прирост расхода электроэнергии на тягу. Если прирост работы превышает прирост расхода электроэнергии, то результаты энергосбережения положительны. То есть



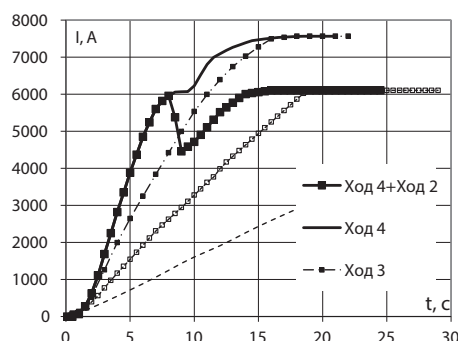


Рис. 5. Кривые изменения скорости при пуске в различных режимах.

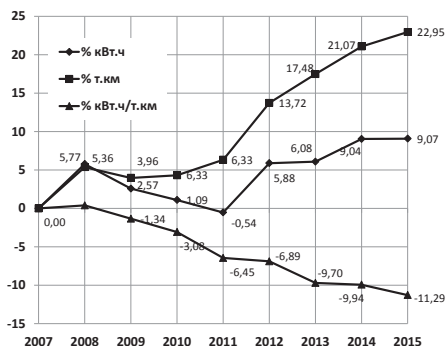


Рис. 6. Прирост в процентах по отношению к 2007 году тонно-километровой работы, расхода и удельного расхода электроэнергии.

Таблица 2

Максимальный тяговый ток, ускорение состава и их отношения

Режим	Imax	a	Imax/7567
	A	м/с ²	
Ход 4+Ход 2	6105	1,2	0,807
Ход 4	7567	1,2	1,000
Ход 3	7567	1,1	1,000
Ход 2	6105	0,73	0,807
Ход 1	4540	0,6	0,599

результатирующим критерием оценки можно выбрать удельный расход электроэнергии на тягу кВт·ч/т·км.

На рис. 6 представлены графики прироста в процентах тонно-километровой работы, расхода электроэнергии и удельного расхода электроэнергии по отношению к этим показателям в 2007 году.

В 2008 году тонно-километровая работа и расход энергии выросли практически одинаково, и прирост удельного расхода энергии был почти нулевым. В 2009 году появилось видимое различие в приросте тонно-километровой работы и расходе электроэнергии. Из графиков видно, что начиная с 2011 года заметно растет прежде всего тонно-километровая работа. Это обусловлено ростом пассажиропотока, увеличением парности движения поездов, количества вагонов в составах на ряде линий, вводом в эксплуатацию новых участков метрополитена. К 2015 году тонно-километровая работа выросла на 22,95%. За этот же период расход электроэнергии увеличился лишь на 9,07%. Соотношение изменений тонно-километровой работы и расхода электроэнергии удобно ха-

рактеризует меру приращения удельного расхода электроэнергии по сравнению с 2007 годом. Из графика видно, что этот показатель уменьшился до 11,29% к 2015 году.

Изложенное свидетельствует о реальности теоретически обоснованных и реализованных мер на Московском метрополитене, направленных на повышение энергоэффективности управления движением поездов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Л. А., Головичер Я. М., Ерофеев Е. В., Максимов В. М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1990. — 272 с.
2. Баранов Л. А., Мелешин И. С., Гинь Л. М. Энергооптимальное управление движением поезда при учете ограничений на фазовую координату // Наука и техника транспорта. — 2010. — № 4. — С. 19–30.
3. Баранов Л. А., Ерофеев Е. В., Мелешин И. С., Гинь Л. М. Оптимизация управления движением поездов / Под ред. Л. А. Баранова. — М.: МИИТ, 2011. — 164 с.
4. Гаев Д. В., Ершов А. В., Баранов Л. А., Гречишников В. А., Шевлюгин М. В. Внедрение энергосберегающих технологий // Мир транспорта. — 2010. — № 3. — С. 3–10.
5. Баранов Л. А., Бестемьянов П. Ф., Сидоренко В. Г., Шербина Е. Г. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 3. — С. 35–41. ●

Координаты авторов: **Баранов Л. А.** – baranov.miit@gmail.com, **Максимов В. М.** – vmmaximov@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 08.06.2016, принята к публикации 15.08.2016.