

УДК 533.6.013.11

С.А. Грязнова

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ПРОГРАММ ДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Рассматривается влияние учета основного сопротивления движению поезда на построение оптимальных алгоритмов для поездов метрополитена, а также на расход энергии. Нестационарный характер движения циркуляционных потоков учитывается через коэффициент трения воздушной среды. Величины указанных коэффициентов должны быть определены для каждого конкретного перегона метрополитена. Предложенный метод позволяет определить резервы экономии энергоресурсов во время следования электропоезда по всем элементам участка в каждом конкретном случае.

Ключевые слова: *основное сопротивление движению, оптимизационные программы, расход электроэнергии*

Введение

В настоящее время, в связи с всевозрастающими требованиями к энергосбережению, во всех сферах производства (в том числе и в метрополитенах), к тяговому обеспечению перевозочного процесса предъявляются новые требования. Метрополитен - один из самых энергоемких пассажирских видов транспорта современного города. Поэтому актуальны вопросы, связанные с энергоснабжением [1 – 4]. Тяговые расчеты, служащие теоретическим обоснованием практических приемов ведения подвижного состава по участку, в этой связи должны определять наиболее энергооптимальные режимы вождения поездов, обеспечить быстроту расчета по нескольким вариантам.

Целью данной статьи является усовершенствование метода построения оптимизационных программ движения подвижного состава метрополитена с учетом влияния неоднородностей воздушной среды.

Изложение основного материала

Электрический транспорт является крупным потребителем энергии, причем в общем энергетическом балансе страны доля энергии, потребляемая транспортом, непрерывно растет. На метрополитене, несмотря на значительно меньшие скорости, чем в пригородном движении удельный расход энергии больше и равен в среднем $50 - 70 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{т} \cdot \text{км}$. Это объясняется меньшим расстоянием между остановками и повышенным основным сопротивлением движению в тоннелях. Поэтому главные пути снижения удельного расхода энергии на движение поезда заключается в уменьшении основного сопротивления движению.

Вождение электроподвижным составом (ЭПС)

по графику с наименьшим удельным расходом электроэнергии возможно лишь при учете многих факторов. В зависимости от веса и типа состава, наличия ограничений по скорости движения каждый рейс по одному и тому же участку ЭПС может пройти по-разному. Следовательно, одним из способов снижения потребления электроэнергии на движение является оптимальное управление тяговыми двигателями ЭПС с адаптацией к внешним условиям и режимам движения. В связи с этим разработка энергосберегающих схем и алгоритмов управления тяговыми двигателями постоянного тока ЭПС, несомненно, является актуальной задачей.

В настоящее время с постоянно увеличивающейся загрузкой метрополитена все большее значение будут приобретать методы и системы управления, которые позволят оптимизировать потребление энергии ЭПС на его тягу. Необходимо разработать новые методы в организации движения поездов и создать высокоскоростной подвижный состав. По мере увеличения скорости движения поезда его ускорение уменьшается, что объясняется уменьшением силы тяги и увеличением сопротивления движению. Для создания скоростных линий метрополитена, обладающих максимальными пропускными и провозными способностями, необходима разработка новых требований к уровню комфорта перевозок пассажиров, модернизированного путевого хозяйства, новых систем энергоснабжения, автоматизированных систем и автоматических устройств управления перевозочным процессом.

Одним из важных путей улучшения показателей эксплуатационной работы является использование оптимальных режимов ведения поезда. Оптимизация управления может использоваться по определенным критериям оптимальности. Под критерием оптимальности понимается количественный показа-

тель, характеризующий принимаемое решение, чаще всего в задачах оптимизации критерий должен быть равен минимальному или максимальному значению.

Обычно затраты на перевозки оптимизируются при выполнении тяговых расчетов для выбора типа электроподвижного состава, веса поезда, участкового времени хода, профиля пути, расположения станций и т.д. При внедрении систем автоведения время хода по перегону задано графиком движения на конкретном участке линии, известны тип и характеристики подвижного состава, определен вес поезда. В этом случае критерием оптимальности управления движением можно считать расход электроэнергии на тягу.

Рассмотрим более подробно вопрос определения оптимальных программ движения поезда по минимуму расхода энергии при заданном времени хода. Задача определения программы движения поезда для заданного времени хода является многовариантной: возможно большое число вариантов траекторий движения поездов, имеющих одно и то же время хода, но различный расход энергии. Следовательно, в этом случае для определения программы движения требуется найти оптимальную по расходу энергии траекторию, соответствующую заданному программному времени хода. В [2 – 4] показано, что если можно на перегоне выполнять заданное время хода при одном включении тяговых двигателей, не превышая допустимой скорости, то такой режим является оптимальным. Это объясняется тем, что при каждом повторном включении двигателей ведение поезда на реостатных позициях приводит к потере энергии в реостатах. При одном включении тяговых двигателей, каждому значению времени хода по перегону соответствует одна траектория движения, и расчет программы сводится к выбору координаты точки, в которой включают тяговые двигатели.

Поэтому на метрополитенах используют режимы движения с минимальным возможным числом включений тяговых двигателей, при котором можно реализовать заданное время хода по перегону. Чем меньше число переключений режимов управления поездом, при котором можно выполнить заданное время хода, тем проще реализовать эти программы. Под числом переключений режимов управления электропоездом понимается число переходов с режима «Ход 2» на «Ход 3», с тяги на выбег и с выбега на тягу. Следовательно, при расчете оптимальных программ следует учитывать ограничение на число переключений режимов ведения поезда.

На большинстве перегонов метрополитена (около 20 – 30%) для реализации заданного графического времени хода применяется многократное включение тяговых двигателей – 2 – 3 раза.

Выбор энергооптимальных режимов управления движением поезда осуществляется дискретным вариантом метода динамического программирования, который требует больших затрат машинной памяти. Задача определения оптимальной траектории движения подвижного состава из-за дискретного позиционного управления силой тяги электропоезда является многовариантной задачей. Задача поиска оптимального режима ведения поезда решается вариационными методами, основы которых заложены Эйлером и Лагранжем, и получившими свое развитие в динамическом программировании Р. Беллмана и «принципа максимума» Л.С. Понтрягина [5].

Процесс автоматизации ведения поездов приводит к необходимости определения программ автоведения поездов. Качество программ автоведения поезда при заданном времени хода поезда определяется расходом энергии на тягу поездов и количеством переключений позиций управления для поездов с дискретным управлением силой тяги и количеством переключений режимов тяги для поездов метрополитена. В работе [2] показано, что оптимизация программ движения по расходу энергии приводит к увеличению количества переключений позиций управления, а минимизация количества переключений приводит к перерасходу энергии. Расход энергии и количество переключений не равноценны по стоимости, приоритет следует отдавать расходу энергии, но стремиться при расчете программ ведения поезда сократить количество переключений позиций управления с целью повышения надежности силовой коммутационной аппаратуры локомотивов.

Учитывая дискретность управления силой тяги, поставленную задачу оптимизации целесообразно решать дискретным методом динамического программирования [6] в следующей постановке.

1. Требуется построить оптимальные траектории движения поезда $V(S)$, $T(S)$, $N(S)$, характеризующиеся минимальным расходом энергии

$$A = \int_{S_H}^{S_K} UI \frac{ds}{V}, \quad (1)$$

где U – напряжение на токоприемнике; I – ток локомотива; V – скорость; S – путь; T – время; S_H – координата начала движения; S_K – координата конца движения; N – позиция управления.

При заданном времени хода поезда

$$T_3 = \int_{S_H}^{S_K} \frac{ds}{V}, \quad (2)$$

заданном количестве переключений позиций управления для локомотива, при заданном количестве включений тяги для вагонов метрополитена или электропоездов

$$K_3 = \sum_{i=1}^M \Delta N_i, \quad (3)$$

где ΔN_i – количество переключений позиций управления для включений тяги на i -м шаге, соблюдая ограничение по скорости, допустимому току двигателей, температуре двигателей, силе тяги.

Применяя метод множителей Лагранжа для понижения размерности задачи, целевую функцию заменяем в следующем виде:

$$R(V_1 \dots V_M, N_1 \dots N_M) = \sum_{i=1}^M A(V_i, T_i, N_i \Delta N_i) + \lambda_1 \sum_{i=1}^M T_i + \lambda_2 \sum_{i=1}^M \Delta N_i, \quad (4)$$

а основное функциональное уравнение –

$$f_i(V_i, N_i) = \min[f_{i-1}(V_{i-1}, N_{i-1}) + A_i(V_i, T_i, N_i, \Delta N_i) + \lambda_1 T_i + \lambda_2 \Delta N_i], \quad (5)$$

где λ_1, λ_2 – множители Лагранжа; A_i – расход энергии на i -м шаге; T_i – время хода на i -м шаге; ΔN_i – количество переключений позиций управления или количество включений тяги на i -м шаге.

Для решения задачи путь разбивается на шаги, называемыми шагами варьирования режимов. Из каждой точки пространства (S, V, N) строятся отрезки траекторий движения на различных режимах ведения поезда. Изменение режимов управления локомотивом допускается только в конце шага варьирования режимов. Траектории движения, попавшие в одну область пространства, сравниваются в конце шага варьирования по критерию (5) и отбрасываются худшие из них. В конце пути фиксируется оптимальный вариант и производится восстановление всей оптимальной траектории. Полученные в результате решения задачи траектории движения поезда, зависят от величины λ_1 и λ_2 . Варьируя λ_1 и λ_2 , можно добиться выполнения условий (2), (3).

При временах хода, близких к минимально возможному, естественно, определение оптимальных по расходу энергии траекторий движения поезда дает значительно меньшую экономию энергии и зависит от заданного времени хода.

2. Задачу определения оптимального управления по минимуму переключений при заданном времени хода можно сформулировать следующим образом. Требуется найти такое управление, т.е. такую последовательность режимов управления $N(S)$ и соответствующие ему программы $t(S)$ и $V(S)$, при которых получается минимум переключений:

$$k = \sum_{i=1}^m k_i(S_i, N_i, V_i, t_i) \quad (6)$$

при условии заданного времени хода

$$T_3 = \sum_{i=1}^m t_i, \quad (7)$$

граничных условиях

$$V/s=0 = 0; \quad V/s=S_k = 0 \quad (8)$$

и ограничениях

$$V \leq V_{\text{доп}}, I \leq I_{\text{доп}}; N_{\text{min}} \leq N_i \leq N_{\text{max}}, \quad (9)$$

где S_i – длина пути i -го шага; k_i – количество переключений позиций управления на i -м шаге; N_i – номер позиции управления на i -м шаге; t_i – время движения на i -м шаге; $V_{\text{доп}}$ – допустимая скорость; $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток электровоза; $N_{\text{min}}, N_{\text{max}}$ – минимальная и максимальная позиции управления.

Так как эта задача является изопериметрической (6), то для ее решения применяется метод неопределенного множителя Лагранжа λ [3, 4].

На основе принципа Беллмана основное функциональное уравнение динамического программирования запишем в следующем виде:

$$Q_i(S_i, N_i, t_i) = \min[k_i(S_i, N_i, V_i, t_{ii}) + \lambda t_i + Q_{i-1}(S_i, N_i, t_i)], \quad (10)$$

где Q_i – минимальная суммарная величина критерия оптимизации в конце i -го шага; Q_{i-1} – оптимальное значение величины критерия в конце $(i-1)$ -го шагах.

3. Рассмотрим задачу оптимального по расходу энергии распределения времени хода по перегонам линии метрополитена. Требуется найти такое время хода по перегонам, чтобы при заданном времени хода $T_{\text{уч}}$ получить минимум расхода энергии по всему участку

$$A_{\text{уч}}(T_{\text{уч}}) = \min \sum_{j=1}^m A_j(T_j) \quad (11)$$

при условии, что T_j принимает одно из семи возможных значений (исходя из требований метрополитена автоматически рассматривается для каждого перегона семь траекторий движения поезда), кратных 5сек,

$$T_{j1} \leq T_j \leq T_{j7}, \quad (12)$$

где $T_{\text{уч}}$ – участковое время хода поезда; T_j – время хода на j -м перегоне; $A_{\text{уч}}$ – расход энергии на всем участке для одного поезда; A_j – расход поезда на j -м перегоне; m – количество перегонов на участке.

На основании принципа оптимальности Беллмана основное функциональное уравнение имеет следующий вид:

$$f_j(T) = \min_{T_{j1} \leq T_j \leq T_{j7}} [A_j(T_j) + f_{j-1}(T - T_j)], \quad (13)$$

где $f_j(T)$ – минимум расхода энергии поездом к концу j -го перегона; $f_{j-1}(T - T_j)$ – оптимальный расход энергии на $(j-1)$ перегонах; T – время хода на j перегонах.

Задача также решается методом динамического программирования.

На основании изложенных задач разрабатывается стохастическая модель. Задачей моделирования является расчет траектории движения поезда, основных параметров движения, заданного и фактического времени хода по перегону, расхода электроэнергии для заданных параметров перегона (профиля, кривых, допустимой скорости) и движения (координаты первого выключения тяговых двигателей, второго включения тяговых двигателей, шага интегрирования, количества включения тяговых двигателей, автоматического режима управления движением).

Адекватность модели систем управления зависит от точности аппроксимации характеристик подвижного состава.

Для моделирования движения поезда используется уравнение движения поезда, которое связывает между собой скорость V , путь S и время T в дифференциальной форме [1]. Интегрирование уравнения движения поезда возможно по пути, времени или скорости. При расчете траекторий движения за независимую переменную примем путь S . Тогда уравнение движения поезда имеет вид:

$$\frac{dV}{dS} = \frac{K}{V} \left(\frac{F}{m_B + m_{\Pi}} - w_o - w_d - \frac{B}{m_B + m_{\Pi}} \right), \quad (14)$$

где F – сила тяги вагона; w_o – удельное основное сопротивление движению поезда; w_d – удельное дополнительное сопротивление движению поезда; m_B – масса вагона; m_{Π} – масса загрузки пассажирами вагона; B – сила торможения вагона; K – коэффициент, учитывающий размерность.

Уравнение движения поезда может решаться различными численными методами. В рассматриваемой модели для решения уравнения движения поезда используется метод Эйлера.

Решая уравнение движения поезда (14), скорость поезда на каждом шаге интегрирования определяем по следующей формуле:

$$V_j = \frac{K(f - w_o - i - w_{кр} - b)\Delta S}{V_{j-1}} + V_{j-1}, \quad (15)$$

где V_j – скорость поезда на j -м шаге интегрирования; V_{j-1} – скорость поезда на $(j-1)$ -м шаге интегрирования; ΔS – шаг интегрирования по пути.

Удельная сила сопротивления движению равна

$$w = w_o + w_d, \quad (16)$$

где w_o – основное удельное сопротивление движению поезда, которое обусловлено трением в подшипниках, сопротивлением, возникающим при взаимодействии подвижного состава и пути, сопротивлением воздушной среды; w_d – дополнительное сопротивление движению, которое определяется наличием уклонов и кривизны профиля пути.

Рассмотрим влияние учета основного сопротивления движению поезда на построение оптимальных алгоритмов для поездов метрополитена, а также на расход энергии.

Обычно основное удельное сопротивление движению поезда метрополитена в режиме тяги определяется по формулам [7, 8]:

при режиме тяги и электрического торможения:

$$\omega_0 = 1,1 + \frac{Q_T}{G_{секц}} \frac{m}{2} \quad (17)$$

при режиме выбега (применительно к вагонам типа Д):

$$\omega_0 = 1 + \frac{52}{G_{секц}} = 0,025v + \frac{Q_T}{G_{секц}} \frac{m}{2}, \quad (18)$$

где $G_{секц}$ – вес секции в т; m – количество вагонов в составе.

Входящее в эти формулы сопротивление воздушной среды Q_T , должно определяться с учетом количества вагонов в составе, типа тоннеля, средней длины тоннеля между станциями данного участка, и обтекаемости внешней формы состава и нестационарного характера движения циркуляционных потоков учитывается через коэффициенты трения воздушной среды. Величины указанных коэффициентов должны быть определены, в отличие от ранее существующих методов [7 – 10], для каждого конкретного перегона метрополитена. На рис.1 показаны результаты расчетов затраты энергии на прохождение местного гидравлического сопротивления.

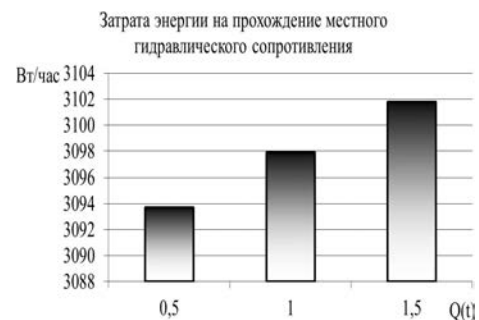


Рис. 1. Затрата энергии на прохождение местного гидравлического сопротивления

Разработанный метод выбора оптимальных управляющих параметров и для регулирования скорости и силы тяги (торможения) в различных режимах позволяет снизить расход энергии. При уменьшении коэффициента местного гидравлического сопротивления на одну единицу расход энергии уменьшится на 0,008 кВт/ч. Пропускная способность станций метрополитена составляет для метропоездов из вагонов мод. 81.717/714 - 47 поездов/час. Тогда, в среднем за один час экономия электроэнергии составит 0,376 кВт/час.

Таким образом, результаты исследований показывают, что в условиях метрополитена имеется возможность реализовать мероприятия, которые существенно уменьшат удельное сопротивление движению вагонов и обеспечат тем самым значительное снижение расхода электроэнергии на тягу поездов.

Выводы

Предложенный метод позволяет определить резервы экономии энергоресурсов во время следования электропоезда по всем элементам участка.

На основе анализа конкретных графиков движений легко обучать локомотивные бригады ресурсосберегающим режимам вождения электропоезда, что дает возможность при разработке норм расхода энергоресурсов на тягу поездов использовать наиболее оптимальные режимы вождения поездов.

Метод оптимального по расходу энергии распределения участкового времени по перегонам позволяет снизить суммарный расход энергии при движении поездов по всей линии метрополитена в среднем на 2% для «часов пик» и на 3% для остального времени.

Список литературы

1. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.И. Исаев, Н.Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
2. Ерофеев Е.В. Оптимизация программ систем автоведения поезда / Е.В. Ерофеев // Тр. МИИТ. – 1980. – Вып. 661. – С. 41-50.
3. Ерофеев Е.В. Исследование процесса управления временем хода в системе автоведения поезда / Е.В. Ерофеев, Я.М. Головичер // Вестник ВНИИЖТ. – 1976. – № 5. – С. 4-7.
4. Ерофеев Е.В. Определение оптимального по расходу энергии перегонного времени хода поездов метрополитена / Е.В. Ерофеев // Вестник ВНИИЖТ. – 1979. – № 2. – С. 56-57.
5. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 450 с.
6. Венцель Е.С. Элементы динамического программирования / Е.С. Венцель. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1964. – 176 с.
7. Абрамович Г.Н. К расчету воздушного сопротивления поезда на открытой трассе и в тоннеле / Г.Н. Абрамович // Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. – 1939. – Вып. № 400. – С. 3-32.
8. Радченко В.Д. Сопротивление движению вагонов метрополитена / В.Д. Радченко. – М.: Недра, 1957. – 70 с.
9. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В.Я. Цодиков. – М.: Недра, 1975. – 313 с.
10. Цодиков В.Я. Взаимодействие системы тоннельной вентиляции и поршневого эффекта движущихся в метрополитене поездов / В.Я. Цодиков // Транспортное строительство. – М., 1974. – № 5. – С. 47-49.

Поступила в редколлегию 27.10.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Калкманов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ПОБУДОВА ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ПРОГРАМ РУХУ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З УРАХУВАННЯМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

С.О. Грязнова

Розглядається вплив обліку основного опору руху потягу на побудову оптимальних алгоритмів для потягів метрополітену, а також на витрату енергії. Нестационарний характер руху циркуляційних потоків враховується через коефіцієнт тертя повітряного середовища. Величини вказаних коефіцієнтів повинні бути визначені для кожного конкретного перегону метрополітену. Запропонований метод дозволяє визначити резерви економії енергоресурсів під час проходження електропоїзда по всіх елементах ділянки у кожному конкретному випадку.

Ключові слова: основний опір руху, оптимізаційні програми, витрата електроенергії

CONSTRUCTION OF OPTIMIZATIONS PROGRAMS OF MOTION OF MOBILE COMPOSITION OF UNDERGROUND PASSAGE TAKING INTO ACCOUNT НЕОДНОРОДНОСТЕЙ AIR ENVIRONMENT

S.A. Gryaznova

Influence of account of basic resistance to motion of train is examined on construction of optimum algorithms for the trains of underground passage, and also on the expense of energy. Unstationary character of motion of circulations streams is taken into account through the coefficient of friction of air environment. The sizes of the indicated coefficients must be certain for every concrete driving of underground passage. The offered method allows to define backlogs of economy of energoresursov during the following of electric train on all elements of area in every case.

Keywords: basic resistance to motion, optimizations programs expense of electric power