

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ГРАФИК ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ КРАСНОЯРСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Ярещенко С.А.

*(Политехнический институт Сибирского
федерального университета, Красноярск)
(Samotron@inbox.ru)*

В работе показан метод получения энергоэкономизирующих графиков движения поездов по линиям метрополитенов.

Ключевые слова: метрополитен, подвижной состав, технико-эксплуатационные показатели, удельный расход электрической энергии, графики движения поездов.

1. Введение

Метрополитен является одним из важнейших средств обеспечения мобильности населения крупных городов. Однако, при наличии ряда положительных качеств метрополитена: обеспечение высокой мобильности, экологичности, сохранение архитектуры города, имеет место отрицательный фактор – большое потребление электроэнергии. Поэтому начиная с внедрения первых метрополитенов в России (Москва) и за рубежом (Лондон, Париж, Нью Йорк) ведутся работы по сокращению расхода электроэнергии при эксплуатации метрополитенов.

В 2012 году в Красноярске планируется запуск пускового участка первой линии метрополитена, которая соединит Октябрьский район с центром города. На данном этапе строительства особенно актуально провести исследования в области электропотребления при эксплуатации метрополитена.

Основой организации движения поездов на метрополитене служит график, объединяющий работу всех подразделений и обеспечивающий: выполнение плана перевозок пассажиров; безопасность движения поездов; наивыгоднейшее использование подвижного состава при экономном расходовании электроэнергии и т.д. [1].

Целью исследований является разработка метода получения энергосберегающего графика движения поездов по линии Красноярского метрополитена.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать системные свойства и связи показателей эксплуатационной деятельности метрополитенов.
2. Получить аналитическую зависимость удельного расхода электроэнергии от параметров пути, параметров подвижного состава, загрузки подвижного состава, а также скорости движения по участку.
3. Разработать метод получения энергосберегающего графика движения поездов по линии Красноярского метрополитена.

2. Энергосберегающий график движения

Для создания информационной базы о различных режимах управления эксплуатационной деятельностью строящегося метрополитена были собраны и систематизированы технико-экономические показатели метрополитенов городов России и СНГ [2], а также данные об эксплуатационной деятельности Новосибирского метрополитена за 8 лет. Исследование системных свойств и связей между показателями эксплуатационной деятельностью и удельным расходом электроэнергии на тягу поездов проводилось с помощью метода корреляционного анализа, что позволяет оценить независимость показателей, или их взаимное влияние и выявить необходимые закономерности [3,4].

Анализ полученных данных показал, что наибольшее влияние на расход энергии на тягу поездов из рассмотренных показателей оказывают:

- Средний интервал движения между поездами.
- Общий пробег и пробег вагонов с пассажирами.
- Эксплуатационная скорость.

Эти показатели напрямую относятся к вопросам организации движения, в том числе составления графика движения поездов. Поэтому, эти показатели, а так же параметры пути и подвижного состава должны составлять вектор входных параметров модели, минимизирующей удельный расход электроэнергии на тягу при прочих заданных условиях [10].

В соответствии с теорией электрической тяги [5,6] удельный расход электроэнергии, $Bm \cdot ч / m \cdot км$, на участке пути протяженностью S и эквивалентным уклоном $i_{эв}$ определяется следующим образом:

$$A_{уд} = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{g(w_{cp} + w_{iэ})}{\eta'_{cp}} + \frac{10,7}{10^6 S_{пер}} \times \left\{ \frac{v_T^2}{\eta'_{cp}} \times \left[1000(1 + \gamma) - \frac{g(w_T + w_{iT})}{a_T} \right] + \right. \\ \left. + k_{п} \frac{v_{п}^2}{\eta'_{п}} \times \left[1000(1 + \gamma) + \frac{g(w_{п} + w_{iп})}{a_{п}} \right] \right\}, \quad (1)$$

где,

$A_{уд}$ – удельный расход электроэнергии;

S – длина перегона;

w_{cp} – среднее по перегону значение основного сопротивления движению;

$w_{iэ}$ – эквивалентное сопротивление движению;

w_T – среднее значение основного сопротивления движению на тормозном пути;

w_{iT} – эквивалентное сопротивление движению от уклона на тормозном пути;

$w_{п}$ – среднее значение основного сопротивления движению на пусковом участке пути;

$w_{iп}$ – эквивалентное сопротивление движению от уклона на пусковом участке пути;

a_t – равномерное ускорение при торможении;

a_n – равномерное ускорение при пуске;

g – ускорение свободного падения;

v_T – скорость в начале торможения;

v_n – скорость в конце пуска;

η'_{cp} – средний К.П.Д. тяговых двигателей, тяговых передач и преобразовательных агрегатов;

$(1+\gamma)$ – значение коэффициента инерции для данного типа подвижного состава;

K_n – коэффициент пуска для данного типа подвижного состава.

Вторые составляющие в квадратных скобках формулы (1), выражающие работу сил сопротивления движению на тормозном пути и пусковых путях, относительно невелики, так как эти пути малы по сравнению с общей длиной перегона, в данном случае – с проектной длиной первой линии Красноярского метрополитена. Поэтому эти члены можно не учитывать и пользоваться упрощенным выражением для определения удельного расхода энергии [5]:

$$A_{уд} = \frac{g(w_{cp} + w_{i\partial})}{3,6 \cdot \eta'_{cp}} + \frac{10,7(1 + \gamma)}{1000 S_{nep}} \times \left[\frac{v_T^2}{\eta'_{cp}} + k_n v_n^2 \right] \quad (2)$$

Кроме того, следует учесть тот факт, что при движении в тоннеле удельное основное сопротивление движению w_{cp} зависит от скорости в соответствии с эмпирической зависимости следующим образом [7]:

$$w_{cp} = 1 + \frac{52}{\frac{mg}{n}} + 0,025V + (0,09 + 0,022n) \frac{V^2}{mg} \quad (3)$$

Следовательно, для поезда, движущегося в тоннеле метрополитена удельный расход электроэнергии на участке пути дли-

ною L и эквивалентным по сопротивлению движению уклоном $i_{\text{экв}}$ определяется по формуле:

$$A_{y\partial} = \frac{g(1 + \frac{52}{(m_c + m_n) \frac{g}{n}} + 0,025V + (0,09 + 0,022n) \frac{V^2}{(m_c + m_n)g} + w_{i\partial})}{3,6 \cdot \eta'_{cp}} + \frac{10,7(1 + \gamma)}{1000L} \times \left[\frac{v_T^2}{\eta'_{cp}} + k_n V^2 \right] \quad (4)$$

где m_c – масса подвижного состава;
 m_n – масса перевозимых пассажиров;
 n – число вагонов в подвижном составе;
 i_{∂} – эквивалентный по сопротивлению движению уклон;

L – длина участка пути с неизменным эквивалентным сопротивлением движению уклоном;

V – скорость прохождения участка, км/ч

В полученной (4) аналитической зависимости удельного расхода электроэнергии на тягу от параметров пути, подвижного состава и скорости движения по участку необходимо определить постоянные коэффициенты.

Среднее значение КПД, η_{cp} тягового двигателя подвижного состава метрополитена может быть принят на 1-1,5% ниже его максимального значения и составит 85% [7].

Значение коэффициента инерции, $(1 + \gamma)$ для данного типа подвижного состава находится в пределах 1,12 – 1,14 и следовательно может быть выбрано 1,13 [7].

Коэффициент пуска, K_n , определяется схемой переключения двигателей при пуске. При 2-х или 4-х двигателях переключаемых в две группировки, (имеет место быть в подвижном составе Красноярского метрополитена) $K_n=0,5$.

Масса, m_c , состава, состоящего из 4-х моторных вагонов, в том числе 2-х с кабиной машиниста составляет $m_c = 32 \cdot 2 + 33 \cdot 2 = 130$ т. Однако масса поезда определяется не только массой вагонов, но и массой перевозимых пассажиров, m_n . Эта масса определяется путем произведения веса среднестатистиче-

ского человека, тч, на количество пассажиров в поезде Нч. Масса среднестатистического человека принимается равной 65 кг.

Зависимость количества перевозимых пассажиров, Нч, от времени суток известно по проведенным исследованиям [8,9].

Все остальные величины, входящие в модель, являются переменными.

Для первой линии Красноярского метрополитена она может быть представлена в виде:

$$A_{уд} = \frac{g(1 + \frac{52}{(130 + 65 \cdot N_{ч} \cdot 10^{-3})^{9,81}}) + 0,025V + (0,09 + 0,022 \cdot 4) \frac{V^2}{(130 + 65 \cdot N_{ч})^{9,81}} + i_g)}{3,6 \cdot 0,85} + \frac{10,7 \cdot 1,13}{1000L} \times \left[\frac{V^2}{0,85} + 0,5V^2 \right] \quad (5)$$

После вычислений и некоторых преобразований аналитическая зависимость примет вид:

$$A_{уд_i} = \frac{g}{3,06} \cdot (1 + \frac{21,203 + 0,018V_i^2}{130 + 65 \cdot N_{ч_i} \cdot 10^{-3}} + 0,025V_i + i_{g_i}) + 0,0203 \frac{V_i^2}{L_i} \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой аналитическую зависимость удельного расхода электроэнергии на тягу от параметров пути и подвижного состава для участков первой линии Красноярского метрополитена.

Для синтеза энергосберегающего графика движения весь путь первой линии Красноярского метрополитена (в обоих направлениях) был разбит на участки, в пределах которых сопротивление движению не изменяется. Всю трассу Красноярского метрополитена можно представить, как ломаную линию, состоящую из 48 отрезков различной длины.

Задача получения энергосберегающего графика движения поездов по линии метрополитена состоит в определении скоростей прохождения участков, таким образом, чтобы средняя эксплуатационная скорость поддерживалась на заданном уровне.

Для Красноярского метрополитена эксплуатационная скорость равна 40 км/ч.[10]

Среднюю эксплуатационную скорость, V_{cp} , можно представить как:

$$V_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k L_i}{\sum_{i=1}^k \frac{L_i}{V_i}} \quad (7)$$

где L_i – длина i -го участка пути;

V_i – скорость прохождения i -го участка пути;

K – количество участков пути.

Общая длина линии $L_{л}$ равна сумме длин всех участков:

$$L_{л} = \sum_{i=1}^k L_i \quad (8)$$

Таким образом:

$$\sum_{i=1}^k \frac{L_i}{V_i} = \frac{L_{л}}{V_{cp}} \quad (9)$$

С целью линеаризовать полученное уравнение относительно скорости V_i введены дополнительные переменные:

$$x_i = \frac{1}{V_i}, S^* = \frac{L_{л}}{V_{cp}} \quad (10)$$

Тогда,

$$\sum_{i=1}^k L_i \cdot x_i = S^* \quad (11)$$

Ограничения, накладываемые на скорости по участкам пути:

$$V_{\min i} < V_i \leq V_{\max i} \quad (12)$$

Полученную математическую задачу можно решить следующим образом:

Зафиксировать для $k-1$ участков скорости их прохождения на уровне $V_{\max i}$.

Из уравнения (11) определить x_k

По выражениям (10) определить скорость V_k (скорость прохождения 1-го участка)

Полученное решение проверить по выражению (12). Если полученное решение удовлетворяет условию (12), то V_k и $k-1$ зафиксированных скоростей остальных участков запоминается. Далее $V_{\max k}$ понизить на 1 км/ч и осуществить переход к п.2. В противном случае осуществляется переход к п.2 не запоминая полученного решения.

Условием выхода из алгоритма будет являться равенство трем км/час V_k .

Блок схема выше описанного алгоритма представлена на рисунке 1.

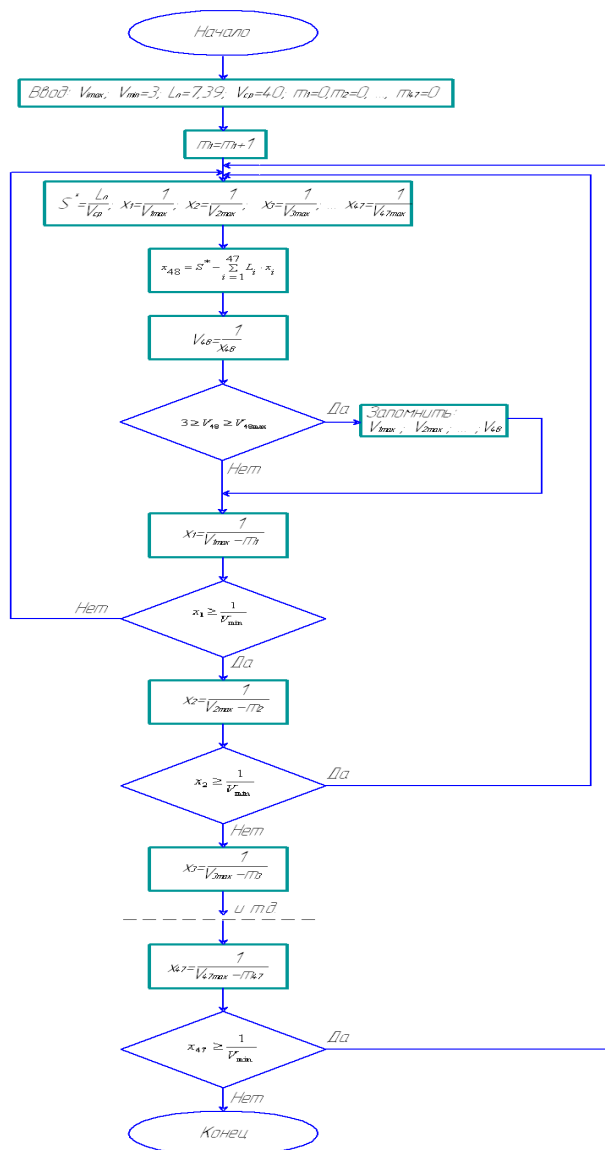


Рис. 1. Алгоритм поиска участковых скоростей

В ходе выполнения алгоритма получено конечное число решений удовлетворяющих условию (12). При этом каждое полу-

ченное решение удовлетворит выражение (7), т.е. позволит обеспечить среднюю эксплуатационную скорость равную 40 км/ч. Однако, каждое из решений (графиков движения поезда по линии) вызовет различный расход электроэнергии на тягу.

Все полученные решения поочередно подставляются в функционал (6), определяющий удельный расход электроэнергии в зависимости от количества пассажиров, величины эквивалентного уклона, длины участка и найденной скорости его прохождения. Решение, доставляющее минимум функционалу (6) является оптимальным по энергопотреблению графиком движения поезда по первой линии Красноярского метрополитена в рамках существующих ограничений.

На основании данных о пассажиропотоках [8,9] вдоль первой линии Красноярского метрополитена получен энергосберегающий график движения поездов по первой линии Красноярского метрополитена.

Полученный график позволит снизить удельный расход электроэнергии на тягу поездов на 16,14% относительно нормированного показателя. В ценах декабря 2008 года абсолютная разница эксплуатационных затрат до и после применения энергосберегающего графика движения поезда по первой линии Красноярского метрополитена составила бы 376 897, 6 руб. в месяц.

3. Выводы

1. Корреляционный анализ между расходом электроэнергии на тягу поездов и остальными показателями качества эксплуатации показал, что расход электроэнергии в большей степени связан со средним интервалом движения между поездами, пробегом вагонов с пассажирами и эксплуатационной скоростью.

2. Полученная аналитическая зависимость позволяет определить удельный расход электроэнергии на тягу от параметров пути, подвижного состава и скорости движения по участку.

3. Для снижения электропотребления на тягу поездов разработан методика синтеза энергосберегающих графиков движения поездов.

Литература

1. БАКУЛИН А. С. *Организация движения поездов и работа станций метрополитена*. М.: Транспорт, 1981. – 230 с.
2. *Официальный сайт Харьковского метрополитена* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metro.kharkov.ua/UserFiles/File/pokazateli.xls> (дата обращения 21.03.2008).
3. ГМУРМАН В.Е. *Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике*: Учеб. пособие для вузов/В.Е. Гмурман. – 8-е изд., стер. – М.: «Высшая школа», 2003. – 405 с.: с ил
4. В.Н.СУПРУН, И.К.ЛАКИН. *Системный анализ показателей работы железных дорог как исходных данных систем менеджмента качества* – Красноярск: Изд-во "Гротеск", 2005, 52 с. ISBN 5-86426-001-01
5. ИСАЕВ, И. П. *Теория электрической тяги* / И. П. Исаев, В. Е Розенфельд, Н. Н Сидоров. – М., Транспорт, 1983. – 328 с.
6. ИСАЕВ, И. П. *Теория электрической тяги* / И. П. Исаев, В. Е Розенфельд, Н. Н Сидоров. – М., Транспорт, 1995. – 294 с.
7. ЩУРОВ, Н.И. *Теория электрической тяги*: Учеб. Пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004 г. – 100 с.
8. ЯРЕЩЕНКО, С.А. *Анализ транспортных потоков г. Красноярска* / И.К. Лакин, С.А. Ярещенко // Политранспортные системы: материалы V Всерос. науч.-техн. конф., Красноярск, 21-23 ноября 2007 г.: в 2-х ч. Ч. 2 / ред. В.Н. Катаргин. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т, - 428 с., С. 345-346
9. ЯРЕЩЕНКО, С.А. *Анализ пассажиропотоков г. Красноярска* / С.А. Ярещенко // Труды одиннадцатой научно-практической конференции КРИЖТ ИРГУПС., / Под ред. д.т.н.

профессора И.К. Лакина. – Красноярск: КРИЖТ, 222 с., С 84-88.

10. ЯРЕЩЕНКО, С.А. *Прогнозирование расхода электрической энергии на тягу поездов первой линии Красноярского метрополитена* / С.А. Ярещенко // Труды двенадцатой научно-технической конференции КРИЖТ ИРГУПС., / Под ред. к.т.н. доцента Курочкина В.А. – Красноярск: КРИЖТ, 240 с., С. 44-49

ENERGY-EFFICIENT TRAINS MOVING GRAPHIC FOR KRASNOYARSK SUBWAY

Semen Yarezhenko, Polytechnical institute of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, PhD student (Samotron@inbox.ru).

It shows building method of energy-efficient graphics of trains moving on belt-lines in articl.

Keywords: subway, train, technical-operational activities, electric power consumption rate, graphics of trains moving.