

# ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА

## TRAIN MODES OPTIMIZATION OF IN THE DESIGN FOR METRO TRACTION NETWORKS

А. А. Лянда, к. т. н., ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

Т. А. Мичурина, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

И. А. Сиваков, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

A. A. Landa, PhD, Ltd «Lenmetrogioprotrans»

T. A. Michurina, Ltd «Lenmetrogioprotrans»

I. A. Sivakov, PhD, Ltd «Lenmetrogioprotrans»

В статье рассматривается метод оптимизации управления движением поездов метрополитена. Предложенный метод позволяет рассчитывать параметры режимов движения поездов, при которых достигается минимум затрат энергии на тягу при сохранении или снижении средней скорости. Решение задачи предполагает использование принципа максимума Понтрягина и динамического программирования. Оптимальные траектории могут быть реализованы в реальных условиях эксплуатации. Программное обеспечение встроено в систему автоматизированного проектирования сетей электроснабжения.

*The article discusses a method for optimizing the control of metro train traffic. The proposed method allows calculating the parameters of train traffic modes that achieve a minimum of energy demand for traction while maintaining or reducing the average speed. The solution to the problem involves using Pontryagin's maximum principle and dynamic programming. Optimal trajectories may be useful in real operating conditions. The software is included into the CAD system for power supply networks.*

Особенностью метрополитена является движение поездов с короткими, до 90 секунд, интервалами между ними, частыми остановками через один-три километра. При этом необходимо реализовать движение с интенсивными разгонами и торможениями, чтобы обеспечить достаточную скорость сообщения.

Для метрополитена неизбежен высокий расход энергии на тягу поездов, а оптимизация режимов ведения является актуальной задачей. Что следует понимать под задачей оптимального управления поездом метро-

политена? Это может быть поиск режимов ведения поездов, при котором достигается снижение расхода энергии на тягу с одновременным повышением скорости сообщения или сохранением заданного времени оборота составов. Решение может быть получено за счет выбора режимов ведения с максимальным использованием возможностей продольного профиля, а также за счет оптимального распределения перегонного времени таким образом, чтобы обеспечить минимальный расход энергии при сохранении заданного времени оборота по линии.

Формально, оптимальным является режим ведения поезда, обеспечивающий заданное соотношение времени хода поезда и расхода электроэнергии на тягу. Это соотношение задается с помощью весового коэффициента  $\lambda$ . Оптимальная траектория соответствует минимуму обобщенного критерия оптимальности:

$$J = T_x + 3600 \lambda A/m,$$

где  $T_x$  – время хода поезда по перегону, с;

$A$  – расход энергии на тягу поезда по перегону, кВт·ч;

$m$  – масса поезда, т;

$\lambda$  – коэффициент Лагранжа (весовой коэффициент, задающий соотношение между временем хода и расходом энергии на тягу).

Размерность коэффициента Лагранжа – т/кВт, т. е. обратная удельной мощности состава.

Методы поиска оптимальных режимов, как аналитические, так и численные, хорошо известны и используются на железных дорогах в магистральном и пригородном движении. Алгоритмы оптимизации режимов ведения для метрополитена также известны, хотя в связи с упомянутыми особенностями, их реальное применение может оказаться затруднительным. Наиболее распространенными являются методы, основанные на анализе необходимых условий оптимальности, полученными с помощью уравнений принципа

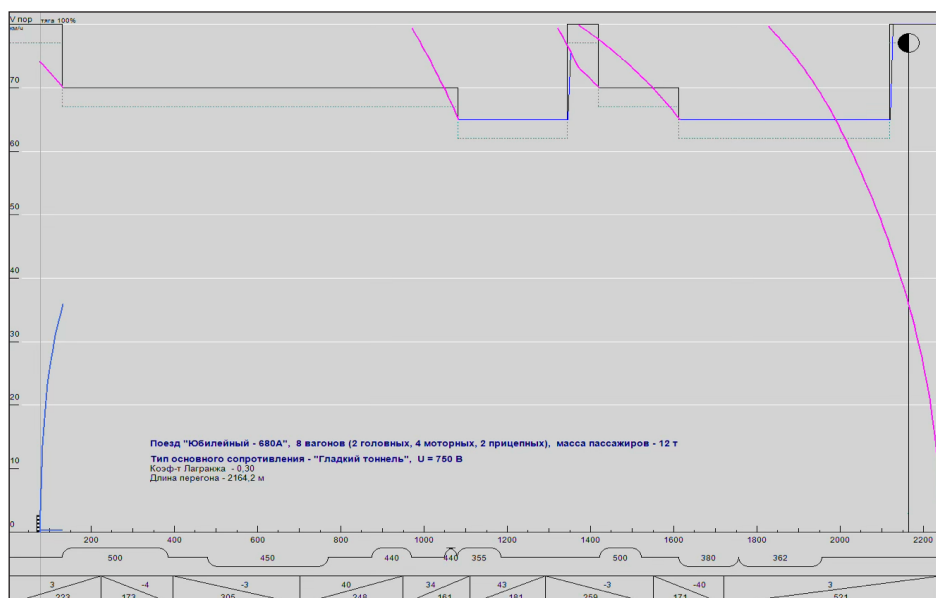


Рис. 1. Разбивка перегона на участки и предварительное построение тормозных кривых

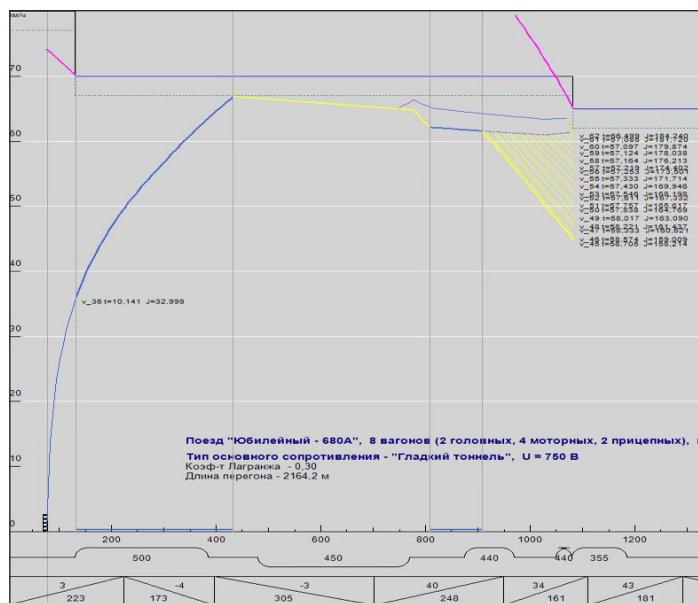


Рис. 2. Построение семейства оптимальных траекторий

максимума Понtryгина и методы перебора решений, например, с помощью динамического программирования. Достоинства и недостатки этих методов известны. Использование уравнений принципа максимума наиболее полно и в доступной форме изложено в [1].

В Ленметрогипротрансе поставлена задача расчета оптимальных режимов ведения поездов для использования в системах автоматизированного проектирования систем тягового энергоснабжения и проектирования пропускной способности. Метод расчета должен быть понятным и доступным для пользователей, а также режимы ведения должны быть легко реализуемы при эксплуатации. В институте разработана методика оптимизации и программное обеспечение, включенное в общую систему автоматизации проектирования устройств тяги поездов [4].

Для решения поставленной задачи использована комбинация метода динамического программирования с выбором частичных оптимальных траекторий, основанных на необходимых условиях оптимальности принципа максимума.

Расчетный перегон разбивается на  $n$  участков, отличающихся максимально допустимой скоростью. Если на расчетном перегоне нет локальных ограничений скорости, перегон состоит из единственного участка. Разбивка перегона на участки с разными ограничениями скорости приведена на рис. 1.

Оптимальные траектории движения для перегона с локальными ограничениями скорости могут иметь участки интенсивного торможения. Для исключения таких участков заранее просчитываются дополнительные ограничения скорости, соответствующие заданному замедлению (красные линии на рис. 1).

На каждом участке  $n$  создается множество частичных оптимальных траекторий, отличающихся граничными условиями – значениями скорости в начале и конце участка. Каждая частичная траектория в пределах участка должна отвечать необходимым условиям оптимальности. Этим условиям соответствуют определенные типы траектории – разгон максимальной интенсивности, движение с постоянной скоростью, выбег и торможение. Если зависимости сил тяги и торможения монотонны и дифференцируемы, решение  $\pi$ -системы позволит определить координаты и скорости включения того или иного режима ведения поезда. В зависимости от граничных условий – начальной и конечной скорости, ограничений максимальной и минимальной скорости движения, локальных ограничений, любой элемент оптимальной траектории может отсутствовать. Например, по-

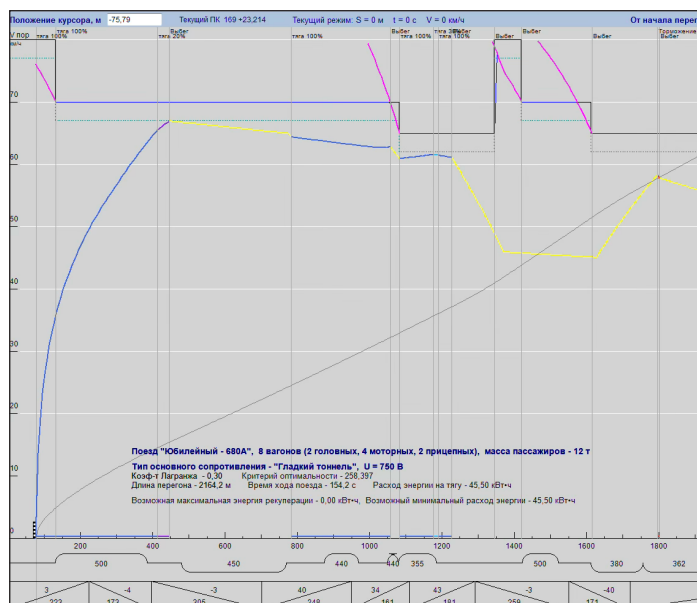


Рис. 3. Оптимальная траектория движения поезда.  
Множитель Лагранжа  $\lambda = 0,3$

езд может не достигать максимальной скорости на коротком перегоне, при движении без остановки в конце участка может отсутствовать торможение. Отдельно следует отметить участок движения с постоянной максимальной скоростью. Максимальная оптимальная скорость может быть меньше допустимой. Это объясняется тем, что сопротивление движению резко возрастает с ростом скорости.

Из частного решения  $\pi$ -системы можно получить ее значение, зависящее от коэффициента Лагранжа и аналитической зависимости сопротивления движению от скорости [3]. Расчеты показывают, что при реальных скоростях движения поездов метрополитена и расходах энергии на движение максимальная оптимальная скорость значительно превышает допустимую скорость движения 80 км/ч и может не приниматься во внимание. Управление поездом при движении с постоянной, максимально допустимой скоростью называют скольжением или сингулярным, а режим движения – режимом стабилизации. В режиме стабилизации необходимо выбирать режим ведения поезда (режимы тяги или торможения неполной мощности), позволяющий поезду двигаться со скоростью, максимально близкой к скорости режима стабилизации. Множество траекторий, отвечающих необходимым условиям оптимальности, рассчитывается простым перебором точек переключения режимов ведения.

Для выбора оптимального управления поездом создается матрица оптимальных решений, где каждый столбец соответствует координате конца участка, а каждая строка соответствует округленной (до 1 км/ч) скорости одной из оптимальных траекторий в конце участка. В ячейке матрицы записываются: точная скорость в конце участка, время хода от начала перегона, режимы ведения поезда от начала перегона, значение критерия оптимальности  $J$ . В ячейке матрицы сохраняется один из множества возможных режимов, который имеет минимальное значение критерия оптимальности. Каждая траектория, сохраненная в матрице, является оптимальной для конкретных граничных условий. На последнем участке конечная скорость всегда равна нулю и остается единственно оптимальная траектория и соответствующий режим ведения поезда. Таким образом выбор оптимальной траектории выполняется методом динамического программирования. В отличие от стандартного алгоритма динамического программирования [2] размерность матрицы невелика, для перегонов без локальных ограничений скорости вырождается до единственного столбца, а траектории на каждом шаге соответствуют необходимым условиям оптимальности, полученным из уравнений принципа максимума.

Предлагаемый алгоритм оптимизации разработан для нужд проектного института, к нему предъявляются особые требования – программное обеспечение должно быть максимально простым и удобным для пользователя, давать наглядные, легко объяснимые результаты. Метод должен работать для любых типов подвижного состава, который эксплуатируется в метрополитенах.

Отдельно следует рассмотреть выбор реальных режимов ведения на участке стабилизации. Это достаточно сложная задача, если в системе управления поезда отсутствует возможность автоматического поддержания заданной скорости. Для участков, имеющих сложный профиль, может оказаться недостаточной сила тяги для поддержания требуемой скорости. Методика ЛМГТ реализует следующее решение.

Назначается диапазон, из которого не должна выходить скорость поезда в режиме стабилизации. При достижении любой из границ диапазона выбирается режим ведения, который обеспечивает максимальное расстояние, которое поезд проходит с использованием выбранного режима до следующего выхода на границу диапазона и выбора иного режима ведения. Единственное исключение, при котором допускается выход за нижнюю границу диапазона скоростей – сложный профиль, при котором даже в режиме максимальной силы тяги скорость снижается. Этот же алгоритм используется для выбора режима подтормаживания, перед ограничением. Дополнительно вводится штраф, увеличивающий значение критерия оптимальности при каждом изменении режима ведения. Штраф позволяет исключить кратковременные переключения режимов на границах расчетных участков и при резких изменениях уклонов продольно профиля.

На рис. 2 показано построение оптимальной траектории на перегоне, состоящем из трех участков, отличающихся максимально допустимой скоростью.

На участке 1 при заданных ограничениях возможна только одна траектория – максимальный разгон.

На участке 2 – продолжается разгон до максимальной скорости, далее режим стабилизации, включение максимальной тяги и снижение скорости ниже нижней границы допустимого диапазона на крутом подъеме. Скорость продолжает падать, но логически продолжается режим стабилизации. Для построения семейства частичных оптимальных траекторий перебираются допустимые точки перехода от режима стабилизации к режиму выбега.

Для последнего участка 3 окончанием расчета является момент пересечения траектории с построенной заранее траекторией служебно-го торможения.

На рис. 3 показана расчетная оптимальная траектория движения на одном из реальных перегонов метрополитена Санкт-Петербурга. План и профиль перегона достаточно сложные, так что существуют семь участков с различными ограничениями скорости. Коэффициент Лагранжа принят равным 0,3. Многочисленные опытные расчеты показали, что такое значение позволяет получить режимы ведения, достаточно близкие к реальным режимам ведения на Петербургском метрополитене.

Программное обеспечение оптимизации режимов ведения поездов разработано и интегрировано в систему автоматизированного проектирования БМТ, предназначенную для проектирования тяговых сетей и систем АТДП [4].

Непосредственное использование оптимизированных режимов в некоторых, достаточно редких, случаях может быть затруднительно. Например, на стыке различных ограничений скорости, а также в режиме стабилизации при отсутствии режима поддержания скорости могут возникать кратковременные включения тяги или торможения, которые невозможно исключить введением штрафа за переключения. Кроме того, при расчете оптимальных траекторий не учитываются плавные изменения ускорения поезда.

Чтобы исключить возможные затруднения, комплекс БМТ имеет модуль адаптации оптимальных режимов, который исключает кратковременные включения или отключения тяги и торможения. При адаптации корректируются координаты переключения режимов, чтобы сохранить траекторию при плавном изменении ускорения поезда. Полученная траектория сохраняется для использования в дальнейшем проектировании.

## Выводы

Разработанный метод и программное обеспечение позволяют найти и использовать рациональные режимы ведения поездов, которые могут выровнять нагрузку тяговых подстанций на линии и создать обоснованный запас мощности системы.

Автоматизированный поиск оптимальных режимов ведения поездов существенно снижает трудозатраты времени на проектирование тяговых сетей.

Метод оптимизации режимов ведения может быть полезен службам метрополитенов при составлении графиков движения поездов, обеспечивающих снижение расхода энергии на тягу при сохранении заданного времени оборота составов на линии.

## Ключевые слова

Движение поездов, расход энергии на тягу, система автоматизированного проектирования.

Train movement, traction energy consumption, computer-aided design system.

## Список литературы

1. Оптимизация управления движением поездов. Учебное пособие под редакцией д. т. н. профессора Л. А. Баранова. Москва, МИИТ, 2011, 164 с.
2. Ерофеев Е. В. Определение оптимального по расходу энергии перегонного времени хода поездов метрополитена. Вестник ВНИИЖТа, 1979, № 2, с. 56–57.
3. Плакс А. В. Лянда А. А. Оптимизация режимов движения поездов метрополитена. Вестник ВНИИЖТа, 1981, № 6, с. 23–27.
4. С. Ю. Козлов, А. А. Лянда, Д. А. Пентегов, И. А. Сиваков. Автоматизация тяговых расчетов при проектировании систем тягового энергоснабжения и систем АТДП. «Метро и тоннели» № 1, 2022, с. 35–38.

## Для связи с авторами

Лянда Александр Авраамович

[alanda@lmgmt.ru](mailto:alanda@lmgmt.ru)

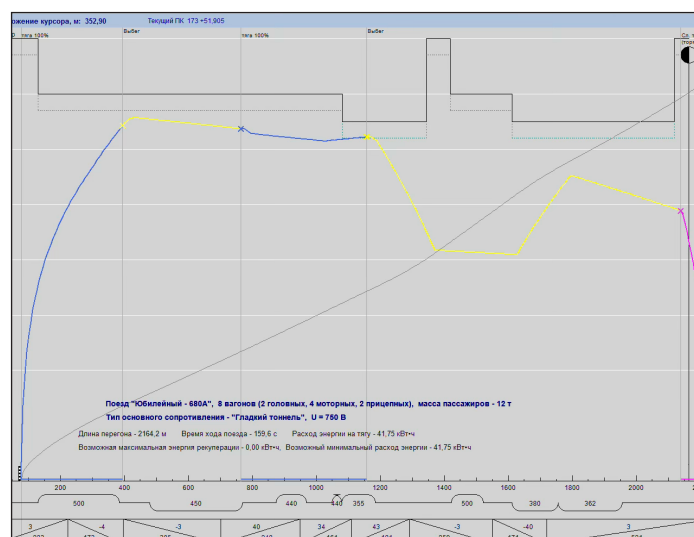


Рис. 4. Адаптированная оптимальная траектория движения поезда