Анализ существующих методов разработки оптимальных режимов движения поездов

Панченко Андрей Владимирович,
Студент Поволжского филиала МИИТ,
Россия, г. Саратов
E-mail: andr_panchenko@mail.ru

Важнейшие показатели работы электрифицированной дороги — скорость движения по участку и расход электрической энергии — определяются режимом ведения поездов. Выбирая этот режим, целесообразно использовать все способы, снижающие расход энергии, сохраняя данную скорость, или позволяющие повысить скорость без увеличения потребления энергии. Однако в большинстве случаев с увеличением скорости возрастает, а с её уменьшением снижается расход энергии. Поэтому вопрос о выборе режима ведения поезда может быть решен только путём анализа влияния скорости и количества израсходованной энергии на основные издержки, связанные с движением, и определения условий, при которых эти издержки минимальны.

Фактически на сегодняшний день в локомотивных депо основным критерием в разработке оптимальных режимов движения поездов обеспечивающих максимальную скорость и минимальные расходы электроэнергии является передовой опыт машинистов, и их практические приёмы вождения поездов по заданному профилю.

В итоге при изменении плеч обслуживании локомотивными бригадами, возникает вакуум в подобной информации. На протяжении длительного времени происходит наработка нужных приемов ведения поездов с различной массой по этим участкам. Восполнить данный пробел возможно с помощью применением различных аналитических методов расчета оптимальных режимов ведения поездов.

Широко известные способы выполнения оптимальных тяговых расчетов, основанные на численных методах направленного перебора (например, дискретный вариант метода динамического программирования), обладают существенным недостатком: требуют очень больших объемов запоминающих устройств и больших затрат машинного времени при многопараметрических расчетах. Особенно это сказывается при увеличении длины исследуемого перегона. Поэтому более приемлемым путем решения поставленной задачи может быть использование аналитических методов оптимизации, с помощью которых можно получить некоторые расчетные соотношения для выбора энергооптимального управления.

Анализ научно-технической литературы показывает, что наиболее просто аналитические соотношения можно получить, предполагая, что профиль пути и ограничение скорости на перегоне постоянны. Однако, в этом случае даже спрямление профиля только на участке выбега может привести к перерасходу электроэнергии свыше 2 %. Поэтому далее рассматривается режим ведения поезда по произвольному профилю пути и действии на перегоне ограничений скорости.

В качестве объекта управления рассматривается электроподвижной состав без рекуперативного торможения [2]. Допускается, что к. п. д. постоянен. В таком случае задача построения оптимальной траектории поезда формализуется в виде известной вариационной задачи с закрепленными концами и ограничениями на управляющие воздействия и фазовую координату [1]. С учетом изопериметрического условия на время хода T критерий качества имеет вид:

$$J=A+\lambda T,$$

где A — удельная работа силы тяги;

λ — постоянный множитель Лагранжа, подбираемый таким образом, чтобы в точке минимума J оставшееся время было равно заданному.

Применяя к данной задаче принцип максимума, легко показать, что оптимальная траектория содержит следующие режимы управления:

— движением с максимально допустимой силой тяги (тяга),

— движение с постоянной скоростью под тягой (стабилизация),

— движение на выбеге,

— движение с постоянной скоростью при торможении (подтормаживание)

— движение с максимально допустимой силой торможения (торможение).

При этом в режиме стабилизации скорость поддерживают либо на постоянном для всего перегона уровне V_C, либо на уровне ограничения $V_Д$, если на данном участке он меньше V_C. В режиме подтормаживания" применяемом только на вредных спусках, скорость поезда равна уровню ограничения.

Построенный в работах Я.М.Головичера граф переключений режимов управления, допустимых на оптимальной траектории, и полученные условия таких переключений позволили установить, что режим тяги на оптимальной траектории реализуется лишь в следующих случаях:

— в начале траектории,

— после ограничения скорости, меньшего по уровню v_C,

— в окрестности крутого подъема, где скорость поезда в режиме тяги падает.

Аналогично, режим выбега существует либо:

— в окрестности границ оптимальной траектории,

— перед режимом торможения,

— перед началом ограничения скорости, уровень которого меньше V_C,

— в окрестности вредного спуска.

Для расчета оптимальных траекторий в режиме тяги и выбега были получены необходимые условия их оптимальности [2]. Например, для режима выбега перед торможением или подтормаживанием необходимое условие оптимальности имеет вид:

$$\Phi = 1 - \lambda \sum_{n=1}^{m} \frac{1/v_n - 1/v_{n-1}}{w_0(1/v_{n-1}) + i_n} \prod_{i=1}^{n=1} \frac{w_0(v_j) + i_j}{w_0(v_{j-1}) + i_j} = 0$$

$$\lambda = v_c^2 \frac{dw_0(v)}{dv}\bigg|_{v = v_c}$$

где w_0 — удельное основное сопротивление движению поезда;

τ — число элементов профиля на участке выбега;

v_n — скорость поезда в конце n-го элемента;

i_n — уклон пути на n-м элементе.

Полученные выражения позволяют проверить оптимальность траекторий в режиме тяги

и выбега, построенных исходя из ограничений скорости. Например, траектория может рассчитываться так, чтобы к началу участка ограничения скорость поезда на режиме выбега снижалась до уровня ограничения. Такая траектория оптимальна, если величина Ф неотрицательна или, если при постоянном профиле на выбеге величина ограничения скорости не меньше *vопт.* Аналогично траектория, соответствующая достижению максимально допустимой скорости в конце вредного спуска, будет энергооптимальна, если величина Ф, подсчитанная до окончания вредного спуска, неотрицательна, а средняя скорость на всем участке выбега $V<V_C$, Таким образом, предлагаемые условия оптимальности совместно с уравнением движения при известных ограничениях скорости, уровне V_C и граничных условиях образуют систему соотношений, достаточную для построения оптимальной траектории на любом перегоне. Величина V_C, однозначно связанная со значением λ, может быть определена исходя из заданного времени хода.

Вывод таких соотношений связан, как правило, с некоторым упрощением математического описания объекта управления, при этом рассчитанная на основании полученных формул траектория движения поезда может отличаться от действительно оптимальной. Следовательно, при формализации поставленной задачи необходим разумный компромисс между адекватностью математической модели реальному объекту управления и сложностью процедуры расчета оптимального управления. При этом надо принять во внимание, что любая априорная модель не может учесть многочисленные факторы, меняющиеся случайным образом в процессе движения (напряжение контактной сети, силу сопротивления движению и т. д.). С этой точки зрения введение разумных допущений может практически не сказаться на качестве управления.

Список литературы

1. Петров Ю.П. Оптимальное управление движением транспортных средств. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ие, 1969. — 96 с
2. Петров Ю.П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ие, 1971. — 144 с
3. Осипов С.И., Миронов К.А., Ревич В.И. Основы локомотивной тяги. М., «Транспорт», 1979 — 440 с.;
4. Осипов С.И. Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов. М., «Транспорт», 1984 — 280 с.;