

порядка 1,0–1,5 Тл и максимальной удельной энергией до 100–150 кДж/кг. Такие параметры позволяют создавать с помощью постоянных магнитов поля в рабочем воздушном зазоре на том же уровне, что при традиционном (электромагнитном) возбуждении, но исключить при этом затраты энергии на питание обмотки возбуждения.

Индивидуальный тяговый привод типа электродвигатель-колесо обеспечивает существенную экономию электроэнергии на тягу, а также позволяет добиться следующих преимуществ: меньшей массы тары за счет отсутствия громоздких двухосных тележек; ускоренной посадки и высадки пассажиров за счет низкого уровня пола по всей длине трамвайного вагона; упростить технологию смены колесно-моторных блоков при ремонте; понизить силы сопротивления и воздействия на путь при прохождении прямолинейных и особенно криволинейных участков пути за счет независимо вращающихся колес и принудительного их поворота в кривых.

УДК 656.225.073

## **О ПОСТРОЕНИИ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА В КООРДИНАТАХ «ПУТЬ – ВРЕМЯ»**

*К. И. ЖЕЛЕЗНОВ, Л. В. УРСУЛЯК, А. А. ШВЕЦ*

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
им. акад. В. Лазаряна, Украина*

Построение оптимальной траектории с использованием сетки в координатах «скорость – путь» не позволяет сразу получить траекторию движения поезда, обеспечивающую заданное время хода по участку. В результате для достижения приемлемого по времени хода результата приходится вводить дополнительные критерии и повторять расчет несколько раз. А в некоторых ситуациях, когда ресурсы управления сильно ограничены и параметры сетки по пути и/или по скорости выбраны недостаточно малыми, достичь хотя бы приближенно требуемого времени хода не удастся вообще. Но это не означает, что задача не может быть решена. Это означает, что при выбранных параметрах решения значения времени хода при небольшом изменении дополнительного критерия сильно отличаются друг от друга. В таких случаях остается только уменьшать шаг сетки по пути и/или скорости и повторять все расчеты заново [1].

Однако если построить сетку в координатах «путь – время», то конечная точка построенной траектории движения будет соответствовать перемещению поезда на заданное расстояние за заданное время. В результате решение этой задачи сводится к поиску множества допустимых управлений, переводящих поезд из данного узла сетки в следующий при условии соблюдения всех ограничений. В работе узлами сетки называются точки пересечения её горизонтальных и вертикальных линий, а сечениями – горизонтальные/вертикальные линии, соответствующие постоянным значениям пути/времени. Прежде всего, для построения сетки в координатах «путь – время» необходимо выбрать шаг между узлами сетки по пути и по времени. Для выбора шага по времени можно задать «минимальный интервал реализации управления». Как известно, любое управление поездом, будь то режим тяги, электрического или пневматического торможения, требует выполнения некоторых манипуляций органами управления локомотива и состава. Любая такая манипуляция может быть выполнена за вполне определенный интервал времени. Так, набор или сброс тяги (кроме аварийного) для любого локомотива может быть выполнен за конечный и вполне определенный промежуток времени. В общем случае эта величина может быть определена для конкретного типа локомотива отдельно. В режиме пневматического торможения поезда «минимальный интервал реализации управления» значительно больше и зависит от типа подвижного состава (грузовой или пассажирский), его длины (количества вагонов) и параметров тормозной системы.

Шаг сетки по пути должен быть кратен 100 м (пикету) для того, чтобы машинисту было проще ориентироваться в пути следования при реализации режимов управления поездом. Величину шага сетки по пути можно выбрать, задавшись шагом изменения скорости. Так как на большинстве локомотивов до сих пор применяются механические скоростемеры, целесообразно задать шаг изменения скорости, равный  $\Delta v = 5$  км/ч. Тогда шаг сетки по пути следует выбирать из соотношения:  $\frac{\Delta S}{\Delta v} = \Delta T$ , где соответству-

ет  $\Delta T$  «минимальному интервалу реализации управления» Вообще может возникнуть ситуация, при которой не найдется ни одного управления из числа возможных, позволяющего перевести поезд из текущего состояния в состояние, соответствующее следующему узлу сетки. В этом случае поиск управления для такого перехода может быть выполнен с разбиением шага по пути и времени на части (построением «подсетки»). Но при этом следует иметь в виду, что при таком варианте поиска управления на режимы управления должны быть наложены ограничения. Например, если на первых шагах поиска по «подсетке» определено, что должен быть реализован режим тяги, то на всех остальных шагах этот режим должен быть сохранен или изменен на режим выбега, но никак не на торможение, поскольку режим «тяга + торможение» никак не может быть реализован за установленный интервал времени, который был выбран из условия реализации какого-то одного режима управления [1].

Построение траектории движения поезда в координатах «путь – время», имеет ряд особенностей. Одной из них является невозможность использования всех узлов при поиске переходов. На самом деле одним из неявных условий решения этой задачи является требование безостановочного движения поезда. Это означает невозможность «горизонтальных» отрезков траектории, т. е. максимально возможное время достижения конечной точки пути, которое определяется реализацией движения поезда с минимальной скоростью. В то же время из-за имеющихся ограничений по управлению поездом невозможны и «сколь угодно крутые» отрезки траектории, т. е. минимальное время хода по участку, которое зависит также от ограничения скорости движения поезда для конкретного участка пути. В результате эта траектория будет ломаной линией, но ее наличие позволит исключить значительное количество узлов из процедуры поиска допустимых переходов от текущего узла к следующему.

Другой особенностью построения кривой скорости в координатах «путь – время», является неопределенность скорости в конечном узле перехода, т. е. величина конечной скорости. На самом деле начальная скорость всегда известна. В начале сетки эта скорость будет равна нулю, при трогании с места, или какому-то заданному значению. Для произвольного узла сетки эта скорость будет равна скорости в конечном узле при предыдущем переходе по узлам сетки. Для того чтобы определить зависимость скорости от пути, необходимо решить уравнение движения поезда при известном управлении. Но на данном этапе управление как раз ищется, т. е. в такой постановке задача определения конечной скорости движения на отрезке пути не может быть решена. Поэтому предложена некоторая функция изменения скорости от пути, которая могла бы достаточно точно описывать реальное изменение скорости. Определены и проанализированы ее параметры:

$$v(s) = v_b + \Delta v \frac{\Delta L + b}{\Delta L} \cdot \frac{s}{s + b}. \quad (1)$$

Параметр  $\Delta v$  в этом выражении позволит задать приращение скорости, а параметр  $b$  – регулировать кривизну кривой.,  $\Delta L$  – расстояние между узлами сетки;  $s$  – текущая координата, которая меняется от 0 до  $\Delta L$ ;  $v_b$  – значение скорости в текущем узле сетки. Такая функция позволит построить монотонные кривые скорости с различной кривизной и для разгона, и для замедления поезда, а также определить в конечной точке  $s = \Delta L$  отрезка пути значение конечной скорости.

Для того чтобы оценить, насколько точно с помощью выражения (1) можно аппроксимировать реальные кривые изменения скорости, были проведены численные эксперименты по разгону и торможению поезда весом 3500 т и длиной 50 полувагонов (700 м) на прямом горизонтальном участке пути при различных начальных скоростях и различных управлениях, а также движения поезда с изменением режимов управления: трогание – разгон – выбег – торможение. В качестве локомотива выбран достаточно широко распространенный локомотив переменного тока ВЛ-80т [2].

Проанализированы кривые скорости, полученные в результате численных экспериментов и по формуле (1). В качестве контролируемых параметров использовались значения величин средней скорости движения на отрезке пути, конечной скорости и времени хода. Последний критерий особенно важен, т. к. время хода должно максимально соответствовать значению в конечном узле сетки, иначе отклонения могут накапливаться и привести к существенным расхождениям в конечной точке.

#### Список литературы

- 1 The Revised Method for Calculating of the Optimal Train Control Mode / K. Zhelieznov [et al.] // Archives of Transport. – 2019. – Vol. 51, iss. 3. – P. 21–34. – DOI: 10.5604/01.3001.0013.6160.
- 2 Правила тяговых расчетов для поездной работы / П. Т. Гребенюк [и др.]. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.