

## Список литературы

- 1 О Государственной программе развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016–2020 годы : постановление Совета Министров Республики Беларусь 28.04.2016 № 345.
- 2 Путьевые машины : учеб. / М. В. Попович [и др.] ; под ред. М. В. Поповича, В. М. Бугаенко. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 820 с.
- 3 **Воробьев, Э. В.** Технология, механизация и автоматизация путьевых работ : учеб. пособие. Ч. 1 / Э. В. Воробьев, Е. С. Ашпиз, А. А. Сидраков. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – 308 с.
- 4 **Моргунов, Ю. Н.** Техническая эксплуатация путьевых и строительных машин : учеб. пособие / Ю. Н. Моргунов. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 701 с.
- 5 ГОСТ 2.602–95. Единая система конструкторской документации. Ремонтные документы. – Минск : ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 23 с.
- 6 Техническая эксплуатация автомобилей : учеб. для вузов / Е. С. Кузнецов [и др.]. – 4-е изд., перераб и доп. – М. : Наука, 2001. – 535 с.

УДК 621.313.3:629.433

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЕВ

*Д. В. ДОРОЩУК*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*М. А. ДУДКО*

*ЗАО «Штадлер Минск», г. Фаниполь, Республика Беларусь*

Одно из главных технических требований, которому стремятся удовлетворить производители трамвайных вагонов в условиях возрастающей конкуренции на рынке данного типа подвижного состава, – низкий уровень пола, при котором облегчаются условия посадки и высадки пассажиров, особенно пассажиров с детьми и пассажиров с ограниченными физическими возможностями (пожилых, инвалидов), за счет чего сокращается время стоянки состава на промежуточных остановках и время оборота состава между конечными пунктами.

Обзор технических характеристик современных трамваев позволяет сформулировать следующие основные принципы, которых стремятся придерживаться зарубежные производители трамвайных вагонов.

1 Трамваи выполняются из коротких сочлененных секций длиной не более 6–9 м, что облегчает условия вписывания состава в кривые участки пути. Секции выполняются по модульному принципу, что позволяет легко наращивать вместительность состава при увеличении пассажиропотоков. Высота пола в пассажирском салоне в большинстве случаев не превышает 300–350 мм.

2 В качестве тяговых производители используют асинхронные двигатели, управляемые от инвертора с регулируемой величиной и частотой выходного напряжения, выполняемого на IGBT. Это позволяет сочетать высокую надежность, меньшие массогабаритные параметры и малые эксплуатационные затраты на асинхронные двигатели с пониженным энергопотреблением и хорошими регулировочными свойствами привода.

3 Тяговые мотор-редукторы вынесены в наружную зону моторных тележек и размещены продольно, с вращением одного или двух ведущих колес по каждой стороне тележки (раздельный привод на левый и правый борт). Таким способом обеспечивается независимое вращение колес, что позволяет снизить износ рельсов в кривых участках пути, и высвобождается межколесное пространство над моторной тележкой для понижения уровня пола.

4 Для повышения комфорта и увеличения полезной площади пассажирского салона основное преобразовательное электрооборудование вынесено в специальные ниши под крышей вагона.

5 Для сокращения времени стоянки на остановочных пунктах при посадке и высадке пассажиров трамваи выполняются с 6–8 входными дверями (на состав длиной около 30 м), большая часть которых – двухстворчатые, шириной не менее 1300 мм.

Создание трамваев с низким полом развивалось на базе нескольких конструктивных решений, которые определяли общую компоновку тягового привода. Первым этапом на этом пути следует считать техническое решение, основанное на традиционной компоновке привода. Тяго-

вые двигатели и редукторы размещались поперечно направлению движения во внутреннем пространстве моторных тележек. Вращающий момент двигателя передавался через редуктор на колесную пару. Разработчики двигались по пути снижения габаритов тягового двигателя, при этом удалось снизить высоту пола в пассажирском салоне до 550–600 мм от уровня головки рельса. Примером могут служить трамваи серии K5000 производства Bombardier Transportation для Кельна (2002) с частотой вращения вала двигателя до 5576 об./мин, трамваи серии GT8-100 производства той же компании для Карлсруэ (1997) с частотой вращения вала двигателя до 6000 об./мин или трамваи производства японской компании Kinki Sharyo для Нью-Джерси (1997) с частотой вращения вала двигателя до 5000 об./мин.

Следующим этапом явилось техническое решение, при котором тяговые двигатели и редукторы вынесены в наружное пространство тележки и размещены продольно по обеим ее сторонам. Если производители сохраняли колесную пару, это решение позволяло понизить уровень пола до 450 мм и создавать трамваи с частично низким уровнем пола, в том числе за счет размещения электроаппаратуры на крыше вагона. Примером могут быть трамваи производства Bombardier Transportation с тележками типа FLEXX2500. При диаметре колес 630–700 мм такие вагоны имели долю низкого пола до 70 %. Такое же принципиальное решение использовано в тележках FLEXX1000 и FLEXX Urban 3000 для трамваев семейства FLEXITY2, с той лишь разницей, что диаметр колес был уменьшен до 570 мм. В результате доля низкого пола (320–350 мм) возросла до 100 %.

Третий этап заключался в отказе от колесной пары и создании тележки с независимо вращающимися колесами. При этом колеса соединялись поперечной балкой прямоугольного сечения U-образной формы. Независимое вращение колес по разные стороны тележки позволяло с меньшими динамическими усилиями проходить кривые участки пути. Тяговые двигатели и редукторы размещались с наружной стороны тележки продольно. Примером может служить тележка типа SF30 C TFW (Siemens), разработанная в 1996 году и с 1998 года применяющаяся на трамваях семейства Combino. При диаметре новых колес 600 мм производителю удалось понизить уровень пола до 300 мм. По этому варианту выполнено значительное количество трамваев компанией Siemens, а также трамваи семейства SIRIO (AnsaldoBreda, Италия), CITADIS (Alstom), серии ТМК2200 (Консар, Хорватия) и ряд других серий производства Чехии, Польши, Японии.

Последним этапом, реализованным в 2004–2006 годах концерном Siemens, является создание трамвая серии ULF с предельно низким уровнем пола (200–210 мм). Отличительной особенностью трамваев данной серии являются одноосные тележки порталного типа с независимо вращающимися колесами, расположенные между секциями трамвая. Колесо с каждой стороны приводится отдельным двигателем, размещенным вертикально, через конический редуктор.

Все рассмотренные варианты исполнения тягового привода основаны на использовании традиционных асинхронных тяговых. Особый тип привода – безредукторный, основанный на применении тягового асинхронного двигателя типа мотор-колесо, использован при производстве трамваев семейства Variobahn (Variotram), выпускавшихся компаниями Adtranz/Bombardier, а несколько лет назад переданных для производства компании Stadler (Швейцария). Безредукторный привод выполнен в виде трехфазного восьмиполусного асинхронного двигателя мощностью 35–45 кВт цилиндрического исполнения с внешним ротором, совмещенным с движущим колесом, и внутренним статором с жидкостным охлаждением. Статор состоит из неподвижного полого вала с трубой, образующей рубашку охлаждения, шихтованного магнитопровода со стягивающими кольцами, статорной обмотки с токоподводами и разъемом для подключения, элементов уплотнения. Труба корпуса ротора имеет пазы, в которые укладываются стержни, образующие вместе с короткозамыкающими кольцами «беличью клетку» ротора. На наружную поверхность трубы ротора насаживается колесо, состоящее из бандажа, резинового шумогасящего элемента и стопорного кольца. С обоих концов труба закрывается вращающимися подшипниковыми щитами. Каждое моторколесо имеет наружный диаметр трубы ротора 440 мм, длину 460 мм, вес 510 кг (без учета бандажа).

Безредукторный индивидуальный тяговый привод типа электромотор-колесо на базе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов позволяет наилучшим образом сочетать высокую маневренность трамвая, умеренное динамическое воздействие на путь и городские сооружения, низкий уровень шума с высокой экономичностью. Промышленно выпускаемые в настоящее время постоянные магниты характеризуются остаточной магнитной индукцией

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-