

УДК 629.4.014.024

В. В. Никитин, А. Я.-Ю. Пармас

Петербургский государственный университет путей сообщения

В. М. Пивоваров

ОАО «Конструкторское бюро специального машиностроения»

Р. Р. Саттаров

Петербургский государственный университет путей сообщения

БЕЗРЕДУКТОРНЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ГОРОДСКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

Рассматриваются современные тенденции развития тягового электропривода городского рельсового транспорта, предлагаются варианты тягового привода трамвая на базе электромотор-колеса – асинхронного с криволинейным воздушным зазором и ступичного синхронного с постоянными магнитами. Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга (грант 2010 года в области научной и научно-технической деятельности № 153/10).

городской электротранспорт, тяговый электропривод, постоянные магниты.

Введение

В последние несколько лет в развитых странах Европы и Азии наметилась устойчивая тенденция к расширению роли общественного транспорта в крупных городах. Рост числа личных автомобилей привел к повсеместному возникновению проблемы уличных заторов, простои автомобилей в заторах резко ухудшили экологическую обстановку, поскольку двигатели автомобилей в этом случае работают в неэкономичном режиме, что существенно ухудшает условия сгорания топлива и приводит к увеличению загазованности городов. В связи с этим городские администрации практически всех сравнительно крупных городов Европы вновь обратились к развитию общественного транспорта, особенно электрического (трамваев и троллейбусов), как наиболее экологичного вида.

Трамваи по сравнению с троллейбусами имеют ряд преимуществ: меньшее сопротивление движению обуславливает меньший расход энергии на тягу; возможность

использования в качестве второго провода направляющих рельсов обуславливает меньшее загромождение уличного пространства сложной контактной сетью и позволяет трамваям перемещаться с большими средними скоростями.

Эксплуатируемые в настоящее время трамваи отечественного производства не вполне соответствуют современному уровню, т. к. выполнены на основе традиционных технических решений экипажной части и тягового привода, заложенных несколько десятилетий назад (длинные вагоны с весьма высокой массой тары, высоким уровнем пола, на двухосных тележках с колесными парами и двигателями постоянного тока). Современные трамваи должны соответствовать ряду весьма жестких требований, важнейшими из которых являются комфорт и безопасность проезда пассажиров, низкое энергопотребление и малый уровень шума, высокая маневренность, которая определяется малым радиусом кривых участков пути, проходимых трамвайным поездом. Соответствие разрабатываемых трамваев этим требованиям в зна-

чительной мере определяется техническими решениями, заложенными при разработке тягового привода.

Наиболее перспективным с точки зрения обеспечения комфорта пассажиров в сочетании с низким энергопотреблением следует считать тяговый привод на основе электромотор-колес. Именно такое принципиальное решение позволяет создавать трамваи с низким уровнем пола и наиболее экономичным приводом, имеющим минимальные потери мощности за счет отказа от тягового редуктора, который у трамваев с традиционным редукторным приводом выполняется, как правило, многоступенчатым.

1 Современные тенденции в развитии тягового привода трамваев ведущих мировых производителей

На конференции 2nd UIPT Conference, состоявшейся в Амстердаме в сентябре 1994 г., были выработаны основные требования, которые предъявляются к современным трамваям: высокая экономичность, низкие эксплуатационные расходы, современный технический уровень, высокий уровень комфорта пассажиров. Трамваи, соответствующие современному техническому уровню, должны быть оборудованы асинхронным приводом, обеспечивающим возможность рекуперативного или реостатного торможения, системой диагностики, и должны обеспечивать низкий уровень шума и безопасность перевозок. Понятие высокий уровень комфорта пассажиров соответствует обязательному наличию пола с низким уровнем в пассажирском салоне (предпочтение отдается одинаковому низкому уровню пола, по возможности без ступенек в пассажирском салоне), выделенных площадок для размещения и фиксации передвижных инвалидных кресел, достаточной ширине прохода между креслами, применению современных экологичных материалов в отделке салона и его эстетичности, поддержанию комфортных климатических условий в салоне и достаточному информационному обеспечению пассажиров.

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.

В соответствии с устоявшейся классификацией [1] по высоте пола в пассажирском салоне относительно уровня головки рельса трамваи делят на трамваи с высоким полом (high-floor trams) – 560...600 мм и более; трамваи с низким полом (low-floor trams) – от 300 до 350 мм; трамваи с ультранизким полом (ultra low-floor trams) – 180...200 мм. Используется также классификация трамваев по доле площади низкого пола в пассажирском салоне по отношению к общей площади салона: трамваи с полностью низким полом (100% низкого пола); трамваи с частично низким полом (от 40 до 70% низкого пола).

В настоящее время зарубежные трамвайные вагоны производятся большим количеством предприятий, среди которых присутствуют как мощные транснациональные корпорации (Siemens, Bombardier, Alstom), так и менее крупные компании (Skoda, AnsaldoBreda, Koncar, Stadler, CAF, Vossloh). Технические параметры трамвайных вагонов весьма разнообразны даже в рамках одного семейства, причем зачастую производителям приходится удовлетворять самые различные требования заказчиков, которыми чаще всего выступают городские транспортные администрации. Заказываются, как правило, небольшие партии трамваев, поэтому производство трамвайных вагонов не дает значительных доходов крупным производителям, в результате чего и создается возможность для менее крупных предприятий успешно конкурировать в этом секторе рынка [2].

Обзор технических характеристик современных трамваев позволяет сформулиро-

вать 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, как правило, 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 двигателей все 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, вращая одно или два ведущих колеса 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. В трамваях семейства ULF компоновка тягового привода существенно отличается от остальных серий: в них применены одноосные порталные тележки, расположенные между секциями состава, а тяговые двигатели размещены вертикально с наружной части тележек. Применение порталных тележек позволило снизить уровень пола до минимальных значений 200...210 мм. В трамваях семейства Variobahn/Variotram использовано принципиально иное решение тягового привода – безредукторный привод на основе электромотор-колеса в виде цилиндрического асинхронного двигателя с наружным ротором. Оно также обеспечивает независимое

вращение колес и низкий уровень пола в пассажирском салоне (300...350 мм).

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

6. 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.

2 Конструктивные решения тягового привода трамваев

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 (рис. 1). Тяговые 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

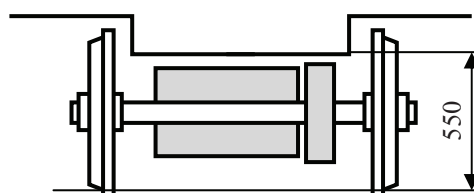


Рис. 1. Традиционная компоновка тягового привода

Карлсруэ (1997) с частотой вращения вала двигателя до 6000 об/мин или трамвай 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 (рис. 2). В том случае, 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%.

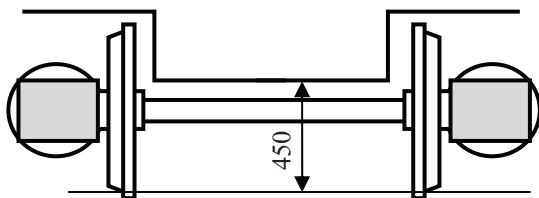


Рис. 2. Компоновка моторной тележки с тяговыми двигателями и редукторами, вынесенными во внешнее пространство

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 (рис. 3). 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), разра-

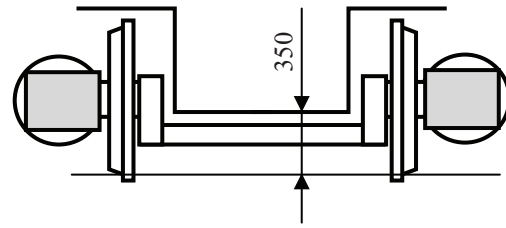


Рис. 3. Компоновка тягового привода с независимо вращающимися колесами

ботанная 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 (Koncar, 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 (рис. 4).

Все рассмотренные варианты исполнения тягового привода основаны на использовании традиционных асинхронных тяговых

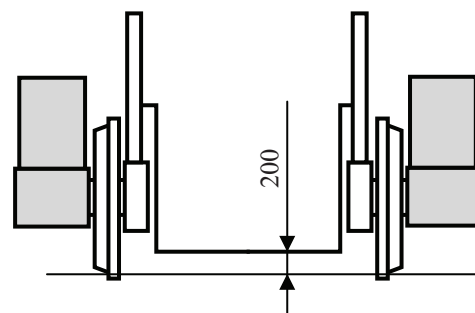


Рис. 4. Компоновка привода порталной тележки трамвая ULF

двигателей и редукторов того или иного исполнения.

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 (рис. 5) 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 [3]. 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 мотор-колесо имеет наружный диаметр трубы ротора 440 мм, длину 460 мм, вес 510 кг (без учета бандажа).

3 Тяговый привод трамвая типа электромотор-колесо на базе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов

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 ха-

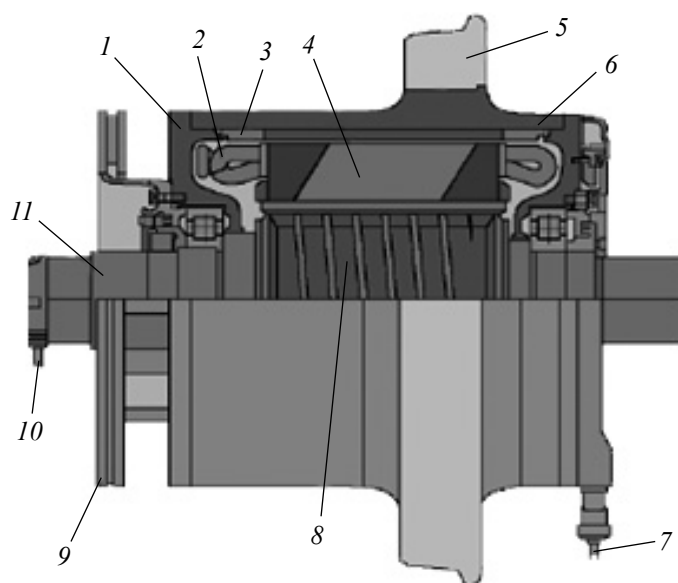


Рис. 5. Мотор-колесо трамвая семейства Variobahn/Variotram:

- 1 – вращающийся подшипниковый щит; 2 – лобовые части обмотки статора; 3 – стержни ротора; 4 – сердечник статора; 5 – колесный бандаж; 6 – труба корпуса внешнего ротора; 7 – подвод охлаждающей жидкости; 8 – труба рубашки охлаждения; 9 – тормозной диск; 10 – разъем для подвода питания; 11 – полая ось

рактически характеризуются остаточной магнитной индукцией порядка 1...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.

В рамках научно-исследовательской работы по гранту Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга авторами определены основные параметры синхронного двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением для индивидуального безредукторного тягового привода трамвая с типовыми для современных трамваев характеристиками:

Количество осей, всего/моторных	4/4
Количество тяговых двигателей	8
Тип тягового двигателя	электромотор-колесо
Диаметр колеса, м	0,71
Ширина колеи, м	1,524
Длина кузова, м	22,5
Тип кузова	сочлененный с двумя сочленениями
Вместимость, номинальная/максимальная, пасс.	206/293
Масса тары, кг	20 000
Скорость максимальная, км/ч (м/с)	60 (16,67)
Напряжение контактной сети, В	550
Скорость выхода на автоматическую характеристику, км/ч (м/с)	25 (6,94)
Пусковое ускорение, м/с ²	1,3
Тормозное замедление, м/с ²	1,3
Вращение колёс	независимое
Коэффициент инерции вращающихся масс	1,02

Для расчета удельного сопротивления движению (Н/кг) при скорости v (м/с) под током и без тока принята формула:

$$w = 0,005 + 0,000487v^2.$$

Получены следующие параметры тягового двигателя:

Мощность, кВт	30
Линейное напряжение (действующее значение основной гармоники), В	427
Вращающий момент, Н·м	1390
Номинальная частота, Гц	60
Число пар полюсов	17
Наружный диаметр активной части двигателя трамвая, м	0,497
Диаметр расточки, м	0,41
Активная длина, м	0,2
Средняя индукция в воздушном зазоре, Тл	0,9
Материал постоянных магнитов	SmCo ₅
Вентиляция	принудительная
Масса двигателя, кг	280

В таблице 1 приведены свойства промышленных постоянных магнитов различного применения, в том числе для роторов электрических машин. На основании этих сравнительных данных, а также с учетом недостаточной механической прочности ферритов (металлокерамика) наиболее приемлемым материалом для использования в тяговых двигателях является сплав из редкоземельных элементов SmCo₅. Хотя сплав NdFeB (ниодим–железо–бор) обладает более высокими магнитными свойствами, его рабочая температура не соответствует допустимой температуре отдельных частей тягового двигателя (для нагревостойкости изоляции класса Н допускается 200 °С).

Геометрия поперечного сечения двигателя представлена на рисунке 6.

4 Сравнение технико-экономических показателей трамваев с традиционным и перспективным тяговым приводом

Ниже дается сравнение технико-экономических показателей трамвайных вагонов: существующего ЛВС-86 И с тиристорно-импульсной системой управления тяговыми двигателями постоянного тока и перспективного с безредукторным тяговым приводом типа электромотор-колесо. Результаты расчета расхода электроэнергии на тягу, потре-

ТАБЛИЦА 1. Свойства постоянных магнитов

Свойства постоянных магнитов	Материал магнита и максимальные величины сравниваемых параметров			
	Sr (FeO ₂) ₂	ЮНДК (Al–Ni–Co–Cu)	SmCo ₅	NdFeB
Остаточная магнитная индукция B_r , Тл	0,4	1,5	0,95	1,25
Коэрцитивная сила H_c , кА/м	240	160	700	900
Максимальная удельная энергия $(BH)_{\max}/2$, кДж/м ³	14	45	90	145
Температура Кюри, °С	450	850	825	310
Максимальная рабочая температура, °С	250	550	350	150
Плотность, кг/м ³	5000	7300	8500	7500
Рыночная цена, у. е/кг	12	95	400	130

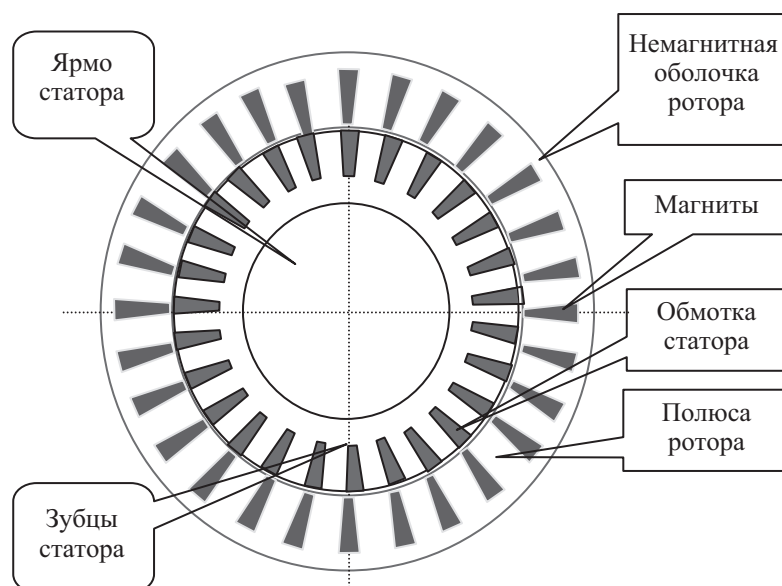


Рис. 6. Геометрия поперечного сечения синхронного тягового двигателя с возбуждением от постоянных магнитов для индивидуального привода мотор-колес трамвая

бляемой новым трамвайным вагоном, оборудованным разработанными в настоящем проекте мотор-колёсами, приведены в таблице 2. Для сравнения в таблице приведены аналогичные показатели современного трамвайного вагона ЛВС-86 И, имеющего импульсное регулирование напряжения тяговых двигателей постоянного тока.

Расчетное снижение удельного расхода электроэнергии для новых вагонов на 1 ткм

брутто ожидается 26,6%, нетто на 1 пасс.-км – 39,38%.

Заключение

Индивидуальный тяговый привод типа электромотор-колесо обеспечивает существенную экономию электроэнергии на тягу, а также позволяет добиться следую-

ТАБЛИЦА 2. Сравнение технико-экономических показателей трамвайных вагонов

Наименование показателей	Величины показателей	
	ЛВС-86 И	нового
Длина вагона, м	22,5	22,5
Число сочленённых кузовных секций	2	3
Количество тележек/осей в тележке	3/2	4/1
Количество осей, всего/моторных	6/4	4/4
Масса тары, кг	29 500	20 000
Высота уровня пола над УГР, мм	840	320
Вместимость номинальная, пасс.	223	206
Масса номинальная брутто, кг	45 110	34 420
Число тяговых двигателей × мощность одного двигателя, кВт	4×80	8×30
Передаточное число редуктора	7,07	1,0 (без ред.)
Параметры движения на участке 350 м с номинальной загрузкой		
Скорость сообщения, км/ч	25	25
Расход энергии на тягу, Дж/Вт·ч	6 337 504/1760,4	3 548 555/985,7
Объём перевозок брутто, ткм	15,7885	12,047
Объём перевозок нетто, пасс.-км	78,05	72,1
Удельный расход электроэнергии брутто, Вт·ч/ткм	111,5	81,822
Удельный расход электроэнергии нетто, Вт·ч/пасс.-км	22,55	13,67

ших 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.

Библиографический список

1. **Optimal** design of low-floor tram / J. Capek, J. Kolar // From horse-drawn railway to high-speed transportation system (Conference, Prague, April 17–19, 2007). – Prague, 2007. – PP. 27–30.
2. **Мировой рынок** подвижного состава облегченного рельсового транспорта // Железные дороги мира. – № 8. – 2005. – С. 34–49.
3. **Ступичный** асинхронный тяговый двигатель с внешним ротором // Железные дороги мира. – № 4. – 2002. – С. 29–31.