

РАЗВИТИЕ СЕМЕЙСТВА ЛОКОМОТИВОВ НА БАЗЕ ОДНОСЕКЦИОННОГО ТЕПЛОВОЗА

Рассмотрена задача улучшения эксплуатационных показателей тепловоза ТЭ26, создаваемого АО «УК БМЗ». Предложена конструкция подвески тягового электродвигателя, не содержащей изнашиваемых частей. Доказана целесообразность создания пассажирского варианта тепловоза ТЭ26 для повышения степени унификации эксплуатируемых тепловозов, что позволит повысить тяговые свойства пассажирских тепловозов на 14–22%.

Ключевые слова: тепловоз, тяговые свойства, экипажная часть, тяговый привод, конструирование

EDN: PKFKWG



А.С. Космодамианский



В.И. Воробьев

В предыдущей статье [1] авторами были рассмотрены проблемы создания универсального односекционного тепловоза для малолетельных линий в качестве замены морально устаревших тепловозов серий М62/2М62, созданных 60 лет назад. В результате проведенного анализа, в частности, были сделаны следующие выводы:

- наилучшим вариантом подобного тепловоза из созданных за последние несколько десятилетий является проектный тепловоз ТЭ26, предложенный АО «УК «БМЗ» («Трансмашхолдинг»);
- основным недостатком проекта ТЭ26 является то, что он пока не является основой ряда моделей тепловозов различного рода службы, что позволило

бы найти новые области сбыта и расширить производство;

- на базе ТЭ26 может быть создан пассажирский тепловоз с конструкционной скоростью 160 км/ч и силой тяги в продолжительном режиме на 14% выше выпускаемого в настоящее время ТЭП70БС, а при использовании бесколлекторных ТЭД — способен развивать в длительном режиме силу тяги выше, чем М62;
- в восьмисном исполнении ТЭ26 будет превосходить по силе тяги тепловоз 2М62.

В связи с тем, что в средствах массовой информации были анонсированы планы изготовления опытного образца тепловоза ТЭ26 уже к концу 2024 года,

Космодамианский Андрей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: автоматизация агрегатов и систем тягового подвижного состава, электрические передачи локомотивов. Автор 447 научных работ, в том числе 28 монографий, одного учебника и 27 учебных пособий. Имеет 130 патентов РФ.

Воробьев Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ). Область научных интересов: электрические передачи локомотивов, тяговый и вспомогательный электроприводы. Автор более 90 научных работ, в том числе 13 монографий. Имеет 86 патентов РФ.

Измеров Олег Васильевич, соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ). Область научных интересов: динамика и методы конструирования тяговых приводов рельсового подвижного состава. Автор 87 научных работ, в том числе 22 монографий и десяти учебников. Имеет 95 патентов РФ.

Карпов Артем Евгеньевич, ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав», заведующий лабораторией «Системы управления транспортными средствами» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: электрические передачи локомотивов, тяговый электропривод. Автор 20 научных работ, в том числе одного учебного пособия. Имеет 17 патентов РФ.

возникает вопрос, в какой степени указанные возможности развертывания ряда локомотивов могут быть реализованы за минимальный промежуток времени при незначительных изменениях экипажной части локомотива. Этот вопрос необходимо рассматривать в комплексе, т.е. с учетом других конструкций тепловозов, созданных АО «УК «БМЗ». Решение подобных задач, как ранее было отмечено авторами в [1], сталкивается с проблемой рационального выбора конструктивных решений локомотива. Предлагаемая статья является попыткой решения данной проблемы.

Объект исследования

Как уже было отмечено в [1], к данному классу тепловозов предъявляются требования, вытекающие из следующей области их применения на отечественных железных дорогах:

- работа в вывозном движении с поездами массой примерно до 2000 т;
- работа в пассажирском движении с поездами местного и пригородного сообщения;
- различные виды хозяйственных работ, в частности, вывоз и обеспечение энергией строительной и путевой техники.

Также одним из требований является возможность поставки на экспорт, что требует использования европейского габарита и возможности быстрой переделки на колею 1435 мм. Потребность в таких тепловозах существует и на железных дорогах, расположенных вблизи западных границ России.

Тепловоз ТЭ26 (рис. 1) представляет собой шестикабинный двухкабинный локомотив длиной 21,8 м традиционной компоновки, с одним дизель-генератором, мощность которого по дизелю составляет 2850 кВт, что близко к мощности серийного пассажирского

тепловоза ТЭП70, а также к суммарной мощности тепловоза 2М62. В длительном режиме сила тяги должна составить 323 кН, что достаточно для работы с поездами массой до 3100 т на уклоне 9 тысячных.

Предусмотрена возможность работы с местными пассажирскими поездами и путевой техникой, с отбором мощности 600 кВт на энергоснабжение, для работы с думпкарами предусмотрено наличие двух компрессоров, используются отечественный дизель ряда Д49 и тележки, унифицированные с тепловозами серии 2ТЭ25КМ.

К недостаткам тепловоза можно прежде всего отнести использование унифицированной трехосной бесчелюстной тележки. Как показали исследования [2], при расчетном коэффициенте тяги, равном $\psi=0,24$, величина коэффициента использования сцепного веса для данной тележки $\eta=0,88$, в то время как в требованиях ОАО РЖД к новым локомотивам эта величина должна быть не менее $\eta=0,92$. Это, как минимум, ограничивает возможности для дальнейшего роста тяговых усилий. Тепловозы 2М62 развивают длительную силу тяги 292 кН и способны работать с поездами массой до 3600 т на уклоне 9 тысячных. Таким образом, часть устаревших тепловозов 2М62, которые работают с поездами предельной массы, придется заменять тепловозами 2ТЭ25КМ, мощность которых может оказаться избыточной при имеющейся интенсивности движения на таких участках.

Другим недостатком тепловоза ТЭ26 является отсутствие его пассажирской модификации с конструкционной скоростью до 160 км/ч. В настоящее время назрела необходимость унификации пассажирских тепловозов с грузовыми [3;4], что позволило бы снизить эксплуатационные расходы. До недавнего времени подобной унификации препятствовало отсут-

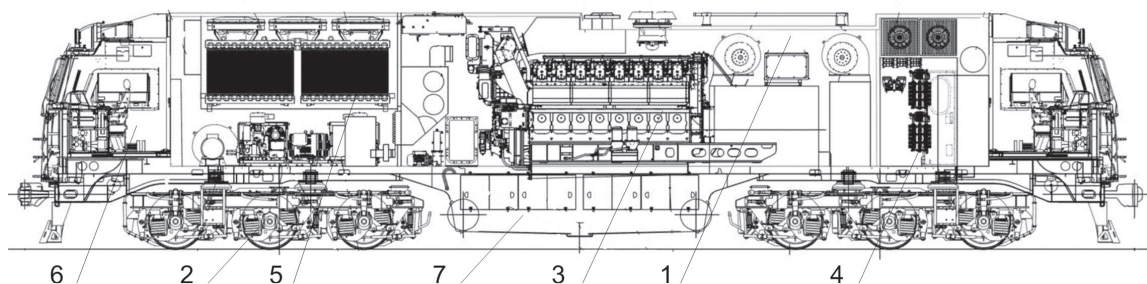


Рис. 1. Проект тепловоза ТЭ26: 1 – кузов; 2 – тележка; 3 – дизель-генератор; 4 – высоковольтная камера; 5 – холодильная камера; 6 – кабина; 7 – топливный бак

ствие выпуска односекционных грузовых локомотивов, но появление ТЭ26 изменяет эту ситуацию.

Кроме того, некоторые технические решения унифицированной трехосной бесчелюстной тележки устарели, в первую очередь пружинное подвешивание тяговых электродвигателей (ТЭД).

Рассмотрим, каким образом можно устранить эти недостатки.

Улучшение сцепных свойств локомотива

Ранее в [5] были рассмотрены принципиальные возможности улучшения сцепных свойств локомотива за счет выбора рациональных решений экипажной части. Необходимость максимально быстрого внедрения в производство нового локомотива исключает такую меру снижения относительного скольжения колеса по рельсу как изменение базы тележки.

Принципиально существует возможность использования решений трехосной тележки с радиальной установкой колесных пар (РУКП), ранее созданной заводом-изготовителем для тепловоза 2ТЭ25А, при установке на нее коллекторных ТЭД. В результате проведенных в БГТУ исследований с использованием методов математического моделирования, [6] удалось установить, что, благодаря РУКП, «в кривой радиусом 600 м работа сил трения на гребне меньше в 2,8...2,14 раза, а на поверхности катания — в 3,2...2,9 раза. Аналогичные результаты получены и по суммарной работе сил трения в кривых радиусами 300, 600 и 1000 м». Уменьшение работы сил трения на гребне и поверхности катания свидетельствует о снижении относительного скольжения колесных пар и, соответственно, об увеличении коэффициента сцепления. Недостатками тележек с РУКП являются рост стоимости и затрат на техническое обслуживание. Так, в США тележки с РУКП были созданы фирмами «General Motors» и «General Electric» в 1993–1995 годах, однако до настоящего времени они мало распространены. Кроме того, тележка тепловоза 2ТЭ25А имеет вторую ступень рессорного подвешивания типа «Флексикойл» и механизм передачи тягового усилия на кузов в виде наклонной тяги, что исключает возможность совместимости с трехосной тележкой.

Рассмотрим возможности улучшения сцепных свойств при использовании унифицированной трехосной тележки. Основными причинами низкого коэффициента использования сцепного веса для указанной тележки являются несбалансированное рессорное подвешивание в сочетании с упругими опорами кузова на тележку при высоко расположенном шкворне. Согласно расчетам [2], использование сбалансированного рессорного подвешивания в совокупности с

жесткими опорами при коэффициенте тяги $\psi=0,33$ увеличивает коэффициент использования сцепного веса η с 0,832 до 0,922 за счет равномерного распределения нагрузок по осям тележки. Поскольку, как указано в [2] величина η снижается с увеличением ψ , то для $\psi=0,24$ коэффициент использования сцепного веса будет заведомо выше 0,92. При этом основной эффект достигается за счет сбалансированного рессорного подвешивания.

Применение несбалансированного рессорного подвешивания для унифицированной тележки, согласно [7], было обусловлено следующими недостатками сбалансированного подвешивания тепловозов ТЭ3 и 2ТЭ10Л:

- наличие большого количества изнашиваемых узлов трения, поскольку, помимо балансиров, подвешивание тепловозов ТЭ3 и 2ТЭ10Л содержало еще и по 4 подвески на каждую колесную пару;
- большое количество узлов трения затрудняло перераспределение нагрузок по осям;
- кратковременно действующие динамические нагрузки не успевали перераспределиться по осям из-за значительной инерции балансиров и рессор.

Впоследствии сбалансированное рессорное подвешивание было применено для трехосной тележки тепловоза 2ТЭ121, где указанные недостатки удалось устранить благодаря тому, что увеличение диаметра колес до 1250 мм позволило разместить рессоры непосредственно под буксами. При этом был достигнут коэффициент использования сцепного веса $\eta=0,92$ [8].

Сбалансированное рессорное подвешивание для тележки с бесчелюстными буксами и диаметром колес 1050 мм ранее было применено на тепловозе ТЭП60, хорошо описанном в отечественной технической литературе, например, [7;9]. При этом можно считать данное рессорное подвешивание с точки зрения его динамических свойств одноступенчатым, поскольку при колебаниях галопирования и подпрыгивания кузова, которые определяют вертикальную динамику обрессоренных масс кузова при прохождении неровностей пути, пружины рессорного подвешивания, расположенные между тележкой и кузовом, не меняют величины прогиба, поскольку параллельно с ними воспринимают нагрузку маятниковые опоры с резиновыми конусами, статический прогиб которых незначителен, и пружины фактически частично разгружают резиновые конусы. При этом рессорное подвешивание тепловоза ТЭП60 обеспечивало удовлетворительные показатели вертикальной динамики тепловоза при скорости до 160 км/ч, что доказывает возможность создания пассажирских тепловозов с одноступенчатым рессорным подвешиванием. Недостатком рессор-

ного подвешивания ТЭП60 является его сложность и увеличение трудоемкости ремонта, в связи с чем копирование его в данном случае нецелесообразно.

Модернизация унифицированной бесчелюстной тележки с целью изменить несбалансированное рессорное подвешивание на сбалансированное существенно затруднена тем, что при меньшем межосевом расстоянии, чем для тележки ТЭП60 (1850 мм вместо 2200–2400 мм) места для размещения упругих элементов между осями оказывается значительно меньше и, кроме того, длина и размещение поводков буксы и конструкция кронштейнов тележки тепловоза ТЭП60 были специально выбраны из условия возможности размещения балансиров, в которых устанавливались листовые рессоры. Вследствие этого модернизация унифицированной тележки для механического сбалансирования первой ступени подвешивания по объему работ сопоставима с проектированием новой тележки.

Из изложенного следует, что выравнивание нагрузки на оси тележки должно быть реализовано с помощью других физических эффектов. Так, тепловоз 2ТЭ116-184 был в опытном порядке оборудован пневмопружинным подвешиванием [2;10] (рис. 2,3).

Согласно [10], в пневмоподвешивании была использована двухгофровая пневмооболочка типа Н-5 и укороченный комплект буксовых пружин, имеющих статический прогиб 41 мм, при этом суммарный статический прогиб составил 150 мм. Выравнивание нагрузок по осям осуществляется за счет перетока воздуха (при этом может быть реализовано сбалансированное четырехточечное или трехточечное подвешивание). Демпфирование вертикальных колебаний реализовано с помощью дросселирования потока воздуха между оболочками и дополнительным резервуаром, размещенным на раме тележки.

По сравнению с серийным вариантом при пневмопружинное подвешивание амплитуды динамических нагрузок на буксы снизились в 1,3...1,5 раза. Тепловоз эксплуатировался на Юго-Восточной железной дороге, результаты эксплуатации успешные. По данным ВНИКТИ [2], экономический эффект от внедрения такого подвешивания достигается за счет снижения проката бандажей и меньшего износа верхнего строения пути.

При реализации такого подвешивания необходимо предусмотреть ограничение вертикальных перемещений буксы при движении тепловоза без воздуха в системе, например, на деповских путях во время ремонта. Исследованиями установлено, что динамические перемещения букс бесчелюстной тележки снижаются при сбалансированном одноступенчатом подвешивании с 30...35 мм [11] до 22...26 мм [11;12], что позволяет ограничить вертикальные перемещения буксы до величины 35 мм установкой резиновых упоров.

Простая установка жестких опор, как у тепловозов ТЭЗ, для бесчелюстной тележки невозможна, поскольку данная тележка должна не только поворачиваться вокруг своей оси, но и иметь поперечные перемещения, однако жесткость опоры может быть повышена (рис. 4). Опора кузова бесчелюстной тележки (рис. 4,а) представляет собой набор дисковых плоских однослойных резинометаллических элементов, имеющих толщину резинового слоя 30 мм, к которым с обеих сторон привулканизированы металлические пластины толщиной 2 мм.

Таким образом, 12,5% от высоты пакета приходится на металлическую арматуру. Подобная конструкция упрощает технологическую оснастку при изготовлении элементов и позволяет заменять отдельные поврежденные элементы. В то же время опоры кузова тепловозов США (рис. 4,б) представляют

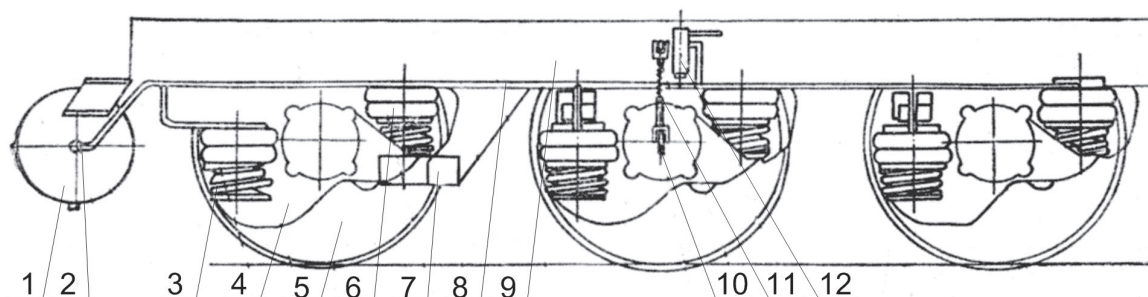


Рис. 2. Схема пневмопружинного подвешивания на унифицированной бесчелюстной тележке: 1 – резервуар; 2 – дроссель; 3 – пружина; 4 – букса; 5 – колесная пара; 6 – пневмооболочка; 7 – поводок буксы; 8 – трубопровод; 9 – рама тележки; 10 – кронштейн; 11 – пружина; 12 – высотрегулирующий клапан

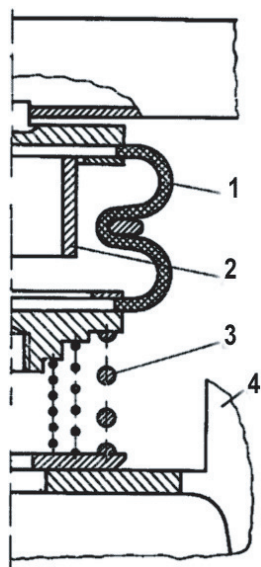


Рис. 3. Пневмопружинное подвешивание (разрез по пружине): 1 – оболочка; 2 – упор; 3 – пружина; 4 – буksа

собой многослойные резинометаллические пакеты. Это, хотя и усложняет оснастку, но при этом позволяет уменьшить толщину промежуточной арматуры и обеспечить одинаковые свойства резины в опоре.

Применение многослойного элемента позволяет при той же суммарной толщине резинового слоя (что обеспечивает те же относительные деформации сдвига резинового слоя при повороте тележки) существенно уменьшить расстояние между пластинами, увеличив тем самым жесткость опоры в разы, что

ведет к повышению коэффициента использования сцепного веса (рис. 4, в).

Еще одним скрытым резервом повышения реализуемого в эксплуатации коэффициента сцепления является использование упругих зубчатых колес (УЗК) в тяговой передаче. Согласно [13], на тепловозе 2ТЭ10Л с опорно-осевым приводом и жесткой зубчатой передачей, на участках пути, имеющих волнообразный износ рельсов, было зарегистрировано снижение коэффициента сцепления на 20% и более. Согласно [9], динамический момент, возникающий в тяговом приводе с жесткой тяговой передачей, является причиной развития волнообразного износа рельсов. В связи с указанными обстоятельствами, а также для повышения долговечности работы тяговой передачи, в нашей стране на грузовых магистральных тепловозах с конца 60-х годов XX века началось внедрение УЗК, которые массово применялись более 40 лет. Однако внедрение моторно-осевых подшипников (МОП) качения и улучшение технологии изготовления зубчатых передач привело к тому, что срок службы упругих элементов зубчатых передач стал лимитировать межремонтные пробеги тепловозов, и, согласно [14], около 10 лет назад произошел возврат к использованию жестких зубчатых колес (ЖЗК).

Основной проблемой при решении вопроса о целесообразности дальнейшего применения УЗК является недостаточная информация о влиянии ЖЗК на коэффициент сцепления в эксплуатации, учитывая тот факт, что волнообразный износ рельсов пока не характерен для участков с небольшой интенсивностью движения. Что касается влияния на коэффициент сцепления ударов в момент прохождения стыков

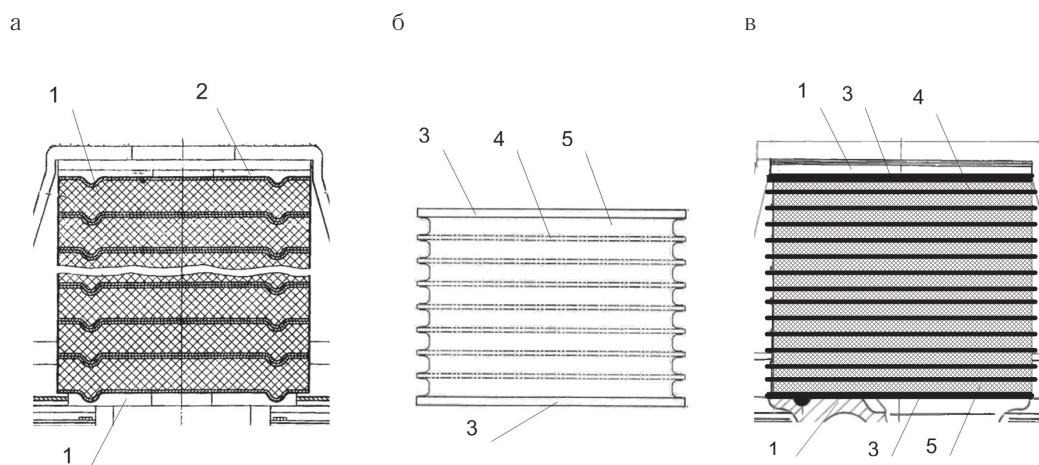


Рис. 4. Резинометаллические опоры кузова на тележку: а – трехосной бесчелюстной тележки; б – тепловоза ТЭ33а (США); в – предлагаемая; 1 – опорные плиты; 2 – резинометаллический элемент; 3 – крайние пластины арматуры; 4 – промежуточные пластины арматуры; 5 – слой резины

(участки с небольшой интенсивностью движения, как правило, имеют звеньевой путь), то до настоящего времени экспериментальных исследований этого явления в объеме, позволяющем получить количественные оценки, пока не проводилось. В [15], со ссылкой на исследования в Японии, утверждается, что коэффициент сцепления колесных пар локомотива с опорно-осевым приводом, движущегося со скоростью 25 км/ч (что соответствует скорости движения ТЭ26 на руководящем подъеме), на 12% ниже, чем с опорно-рамным приводом, однако при этом не указано, что именно привело к изменению коэффициента сцепления: снижение динамического момента или уменьшение перераспределения нагрузок по осям в режиме тяги, что могло быть в опорно-рамном приводе с компенсирующим механизмом на тихоходной стороне.

Кроме того, надо учесть, что характеристика жесткости серийного варианта УЗК для тепловозов выбиралась из условия снижения динамического момента при движении со скоростью выше, чем в продолжительном режиме тяги, поэтому имеет прогрессивную характеристику, и в продолжительном режиме тяги работает на упорных элементах, что существенно увеличивает его жесткость. Так, согласно [14], для тепловоза 2ТЭ116 УЗК работает на упорных элементах вплоть до скорости 45 км/ч, когда коэффициент тяги падает до величины примерно 0,1 и срыв в боксование маловероятен. Для эффективного снижения ударных моментов в указанном режиме желательно, наоборот, иметь регрессивную характеристику, как у варианта УЗК разработки ВНИИЖТ с овально-призматическими упругими элементами [14], для которого мягкая характеристика обеспечивается при скорости выше 20 км/ч, что соответствует продолжительному режиму тяги.

Таким образом, вопрос о целесообразности применения УЗК в приводе тепловоза ТЭ26 в грузовом варианте для улучшения сцепных свойств требует дальнейших исследований как эффективности УЗК, так и рациональных характеристик УЗК. Возможные пути повышения долговечности УЗК будут рассмотрены ниже.

Данное обстоятельство требует при модернизации узла подвешивания ТЭД использовать конструкцию, которая может быть применена как при упругом, так и при жестком зубчатом колесе. Авторами предложена подвеска (рис. 5) с двумя комплектами резинометаллических амортизаторов и центральным шарниром, размещенным между выступами на остовах ТЭД. На конструкцию подвески получен патент на полезную модель [16].

Пассажирский тепловоз для магистральных неэлектрифицированных линий

Несмотря на развитие скоростного и высокоскоростного движения, потребность в выпуске пассажирских тепловозов остается низкой. Если в СССР в период реконструкции тяги в 1965 году было выпущено 202 секции тепловозов ТЭП10, ТЭП10Л и ТЭП60, то в 1975 году — 63 тепловоза ТЭП60, и далее их выпуск оставался примерно на том же уровне до 1985 года. Последние 20 лет выпуск пассажирских тепловозов не превышал 45 секций в год, а последние 10 лет — 32 секций, в то время как поставки грузовых тепловозов семейств 2ТЭ25 и 2ТЭ116 за последние 10 лет достигали около 260 секций в год. Это объясняется электрификацией железных дорог и развитием скоростного и высокоскоростного движения главным образом на электрифицированной части полигона. За последние 5 лет объем поставок пассажирских тепловозов ТЭП70БС сократился до 5 секций в год. В целом после начала роста промышленного производства на постсоветском пространстве в первом десятилетии нынешнего века объем производства грузовых тепловозов примерно на порядок превышает производство пассажирских (рис. 6).

Данное обстоятельство ставит вопрос о дальнейшей целесообразности специализированного производства пассажирских тепловозов и о необходимости выпуска либо пассажирских модификаций грузовых

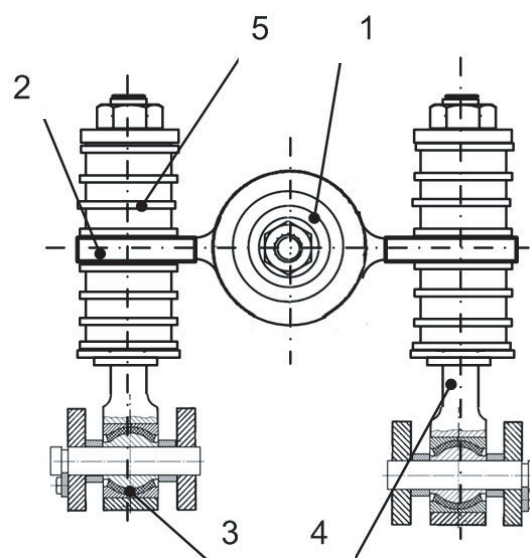


Рис. 5. Упругая подвеска ТЭД: 1 – центральный шарнир; 2 – траверса; 3 – сферический шарнир; 4 – тяга; 5 – резинометаллический элемент

тепловозов, максимально унифицированных с базовой моделью либо тепловозов на базе механической части пассажирского электровоза. Примером подобной унификации является, в частности, модификация тепловоза ТЭП33а фирмы General Electric (США), который унифицирован с грузовым тепловозом ТЭ33а той же фирмы, за исключением тележек.

Основной трудностью создания пассажирского тепловоза на базе электровоза является то, что экипажная часть шестиосных пассажирских электровозов наиболее массовой серии ЭП1 и скоростных электровозов ЭП20 представляют собой три двухосные тележки, вследствие чего становится невозможным разместить в межтележечной части кузова топливный бак достаточного объема. Таким образом, наиболее быстро осуществимым решением является переход на производство пассажирских тепловозов на базе односекционного тепловоза ТЭ26.

Вопросы создания пассажирского тепловоза, максимально унифицированного с грузовыми, который мог бы использоваться не только на линиях с небольшой интенсивностью движения, но и как полноценная замена существующему ТЭП70, ранее рассматривался авторами в [1;3;4], в связи с чем в данной статье будет рассматриваться вопрос, каким образом проще всего реализовать такую конструкцию, а также определить пути дальнейшего ее развития.

Начнем с того, что, что ТЭ26 может почти без переделок заменить грузопассажирскую модификацию тепловоза ТЭП70БС с передаточным числом редуктора $u=4,15$, при этом сила тяги в продолжительном режиме повышается с 222 кН почти до 270 кН (при конструкционной скорости 120 км/ч), т.е. на 22%, и становится равной силе тяги электровоза ЭП1П в часовом режиме, что позволяет вести на неэлектрифицированных участках пути составы той же массы, что и электровозы.

При установке дизель-генератора 2А-9ДГ-02, который, как и 18-9-ДПМ-02, использует дизель 16ЧН26/26, мощность по дизелю может быть повышена до 3 МВт. При этом на имеющихся в эксплуатации тепловозах ТЭП70БС с $u=4,15$ тяговая передача может быть переделана на передаточное число $u=3,12$ для использования на тех участках, где не требуется сила тяги длительного режима выше 167 кН, как для штатной модификации ТЭП70.

Как уже упоминалось в [1], создание на базе тепловоза ТЭ26 пассажирского варианта с конструкционной скоростью 160 км/ч возможно при использовании тележек тепловоза ТЭП150, которые практически полностью унифицированы с тележками серийных грузовых тепловозов производства БМЗ, за исключением тягового привода (рис. 7). Как известно [15], при использовании коллекторных ТЭД воздействие динамических нагрузок при прохождении неровностей пути ведет к тому, что при опорно-осевом приводе повреждаемость ТЭД тепловозов в 3,5 раза выше, чем при опорно-рамном.

Положительными преимуществами дисковых резинокордных муфт (РКМ) в опорно-рамном приводе являются их небольшой габарит, а также значительная нагрузочная способность. Так, на опытном тепловозе ТЭ120 постройки начала 70-х годов прошлого века РКМ рассчитывались на реализацию силы тяги в длительном режиме 256 кН. Как уже было отмечено в [1], имеются резервы увеличения несущей способности РКМ как в результате уточнения условий эксплуатации (возможности уменьшить расчетные угловые деформации за счет снижения вертикальных перемещений первой ступени рессорного подвешивания), так и за счет предложенных авторами решений по созданию равнопрочных муфт [17;18].

Необходимо отметить, что тяговый привод тепловоза ТЭП150 потребует переработки при использо-

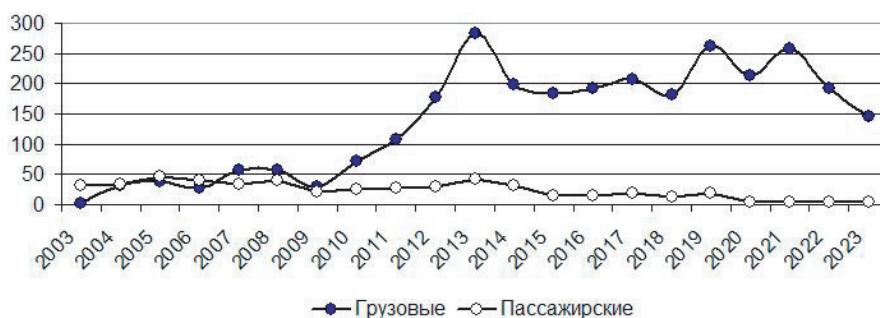


Рис. 6. Число секций грузовых и пассажирских тепловозов собственной разработки, изготовленных в республиках бывшего СССР за последние 20 лет

вании, поскольку он рассчитан на применение ТЭД ЭД150, который, как ТЭД ЭД121, примененный на ранее построенном тепловозе ТЭ125, имеет меньшую длину по сравнению с двигателями ЭД133УХЛ1, применяемый на серийных тепловозах 2ТЭ25К^М и, соответственно, меньший крутящий момент.

Однако следует учитывать, что тепловоз ТЭ125 создавался на экспорт с возможностью эксплуатации на линиях с колеей 1435 мм, что создало дополнительные ограничения на размещение ТЭД. Известно, что в 70-х годах «Лугансктепловоз» совместно с ВНИТИ разработал опорно-центральный привод, в котором в качестве упругих элементов были применены резинокордные муфты, с использованием ТЭД ЭД118, имеющий ту же длину, что и ЭД133УХЛ1 [11;14]. Это указывает на возможность создания варианта привода с резинокордными муфтами для тепловоза, предназначенного для работы только на пути с колеей 1540 мм, с двигателями на базе ЭД133УХЛ1. Применение данного ТЭД, имеющего крутящий момент в длительном режиме 6600 Н·м позволяет реализовать силу тяги 192 кН, то есть, на 14% выше, чем у тепловоза ТЭП70БС.

Однако при этом возникает вопрос, есть ли смысл создавать пассажирский тепловоз с диаметром колеса 1050 мм, используя коллекторные ТЭД, мощность которых ограничена, в то время как отечественными производителями успешно создаются новые локомотивы с бесколлекторными ТЭД, например, ТЭМ23. Известно, что в 70-х годах прошлого века был построен опытный тепловоз ТЭ120, который при передаточном отношении тяговой передачи $u=3,409$ развивал тягу в продолжительном режиме 256 кН.

Максимальная расчетная частота вращения ТЭД типа ЭД900 данного тепловоза составляла $n_{\max}=3600$ мин⁻¹ [15], тогда максимальная скорость движения при этой частоте вращения

$$v_{\max} = \frac{3,6\pi D_{\kappa} n_{\max}}{60u}, \quad (1)$$

где $D_{\kappa}=1,05$ м — диаметр колеса. При указанных данных $v_{\max}=209$ км/ч, что значительно выше конструкционной скорости пассажирских тепловозов ТЭП70 и ТЭП150, равной 160 км/ч. При указанной скорости частота вращения ротора ЭД-900 составит всего 2755 мин⁻¹. Таким образом, применение асинхронного ТЭД, равноценного по характеристикам и габаритам ЭД900, при опорно-рамном приводе с резинокордными муфтами, позволяет создать тепловоз, который может быть использован и как пассажирский, и как грузопассажирский, развивая в длительном режиме тяговое усилие на 15% выше, чем грузопассажирский вариант ТЭП70.

С другой стороны, в настоящее время нет и ответа на вопрос, насколько оправдано требование использовать опорно-рамный привод на пассажирских тепловозах при бесколлекторных ТЭД, которые намного более устойчивы к воздействию динамических нагрузок, чем коллекторные. До сих пор не принято каких-либо норм или рекомендаций, позволяющих определять предельную неподдрессоренную массу, приходящуюся на одну ось локомотива, в зависимости от конструкционной скорости или среднетехнической скорости движения на перегоне. В табл. 1 приведены данные о неподдрессоренной массе m_n различных локомотивов отечественных железных дорог в зависимости от скорости движения.

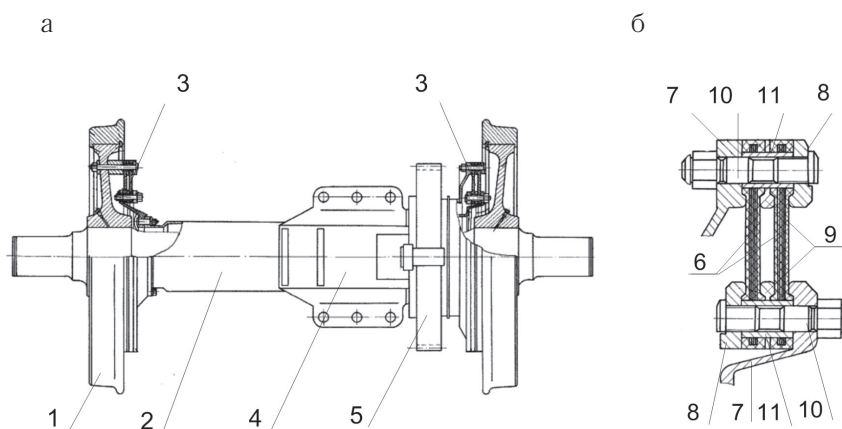


Рис. 7. Тяговый привод ТЭП150: а – передаточный механизм; б – муфта; 1 – колесная пара; 2 – полый вал; 3 – муфты; 4 – опора; 5 – зубчатое колесо; 6 – резинокордные элементы; 7 – фланцы; 8 – нажимные кольца; 9 – промежуточные кольца; 10 – болты; 11 – дистанционные втулки

Таблица 1

Неподрессоренная масса локомотивов

Серия	Вид тяги	Род службы	D_k , м	V_{max} , км/ч	Тип привода	m_n , кг
ЧС2	электровоз	пассажирский	1,25	160	опорно-рамный	3850
ЧС200	электровоз	пассажирский	1,25	200	опорно-рамный	3250
ЧС6	электровоз	пассажирский	1,25	190	опорно-рамный	3250
ЭП1М	электровоз	пассажирский	1,25	140	опорно-рамный	3900
ЭП2К	электровоз	пассажирский	1,25	160	опорно-рамный	3900
ЭП20	электровоз	пассажирский	1,25	200	опорно-рамный	2946
ТЭП70БС	тепловоз	пассажирский	1,22	160	опорно-рамный	2760
2ТЭ25А	тепловоз	грузовой	1,05	110	опорно-осевой	3900

Как видно из табл. 1, на отечественных железных дорогах в качестве пассажирских длительное время массово используются локомотивы с неподрессоренной массой около 3900 кг, при этом за период эксплуатации этих машин с начала 60-х годов ни МПС, ни РЖД не ставилось вопроса о срочной замене их на локомотивы с меньшей неподрессоренной массой. Более того, результаты испытаний тепловоза HS4000 фирмы Brush (Великобритания), имевшего опорно-осевой привод с УЗК, при скорости до 200 км/ч, выявили лучшие динамические характеристики по сравнению с тепловозом ТЭП75, имевшим ту же экипажную часть, что и у серийного ТЭП70 [11].

Наконец, опорно-осевой привод при бесколлекторных ТЭД был допущен к использованию на пассажирском моторвагонном подвижном составе как на импортных электропоездах ЭШ2 с $V_{max}=160$ км/ч, так и на отечественном ЭГ2Тв, который может выпускаться в вариантах с максимальной скоростью 120 или 160 км/ч.

Следует также отметить, что на участках с тепловозной тягой длительное время в большом количестве эксплуатировались тепловозы ТЭП10 и ТЭП10Л с конструкционной скоростью 140 км/ч и жестким зубчатым колесом, вследствие чего, согласно [2], неподрессоренная масса с учетом моментов инерции вращающихся масс ТЭД, должна составить

$$m_{np} = m_n + \frac{J_o + J_a(1+u)^2}{l_d^2}, \quad (2)$$

где $m_n=4410$ кг — неподрессоренная масса без учета моментов инерции; $J_o=410$ кг·м² — момент инерции остова ТЭД относительно оси вращения ротора; $J_a=26,3$ кг·м² — момент инерции ротора; $u=3,04$ — передаточное число ТЭП10Л поздних выпусков с бандажными колесами; $l_d=0,905$ м — расстояние между осью колесной пары и точкой подвешивания ТЭД. При

указанных данных $m_{np}=5435$ кг. Исходя из того, что при ударе во время прохождения стыка кинетическая энергия неподрессоренной массы, которая должна поглощаться основанием пути, пропорциональна квадрату скорости движения, неподрессоренная масса тепловоза ТЭП10Л при скорости движения 140 км/ч должна оказывать такое же воздействие на путь, как и неподрессоренная масса $m_{np}=4160$ кг при скорости движения 160 км/ч, что на 6,7% выше, чем неподрессоренная масса тепловоза 2ТЭ25А с УЗК. Тепловозы ТЭП10Л были выведены из эксплуатации только в 80–90-х годах прошлого века.

Наконец, в России успешно прошел испытания электровоз 2ЭВ120 с конструкционной скоростью 140 км/ч и опорно-осевым тяговым приводом, аналогичным примененному на электровозе 2ЭС10, что дает основание оценивать в первом приближении его необдрессоренную массу без учета моментов инерции в 5500 кг, а с учетом моментов инерции вращающихся частей примерно в 6500 кг. Эта масса по величине энергии, передаваемой пути при скорости движения 140 км/ч, эквивалентна массе в 5000 кг при скорости движения 160 км/ч, что на 28% выше, чем у 2ТЭ25А с УЗК. Тем не менее в октябре 2017 года электровоз 2ЭВ120 получил сертификат соответствия (сертификат соответствия ФБУ «РС ФЖТ» по ТР ТС 001/2011), позволяющий начать производство установочной серии.

Таким образом, анализ опыта эксплуатации на отечественных железных дорогах локомотивов с конструкционной скоростью 140...160 км/ч и неподрессоренной массой 3900...5400 кг не дает оснований для вывода о недопустимости использования на пассажирских тепловозах опорно-осевого привода с неподрессоренной массой 3900 кг.

При использовании тех же ТЭД, что на тепловозе 2ТЭ25А (ДТА-350Т) с увеличением конструкционной

скорости со 120 до 160 км/ч сила тяги тепловоза в расчетном режиме составит 293 кН, что на 30% выше силы тяги тепловоза ТЭП70 в грузопассажирском варианте и лишь на 10% ниже силы тяги грузового варианта ТЭ26 с коллекторными ТЭД. При этом частота вращения асинхронного ТЭД составит лишь 2300 мин⁻¹. В связи с этим возникает вопрос, может ли быть увеличена максимальная частота вращения асинхронного ТЭД (до 2500...2600 мин⁻¹), что позволило бы создать универсальный тепловоз, который может использоваться и как пассажирский и как грузовой на малодеятельных линиях.

Самым проблемным узлом тягового привода в этом случае становится УЗК. Оптимизация жесткостной характеристики УЗК производилась применительно к задачам грузового движения, когда скорость движения тепловоза на руководящем подъеме находится в пределах 20...30 км/ч, при этом динамические моменты в приводе при прохождении неровностей пути невелики. Исходя из этого, для УЗК тепловозов серий 2ТЭ10В/М и 2ТЭ116 была принята прогрессивная жесткостная характеристика: при движении на руководящем подъеме вступали в действие упорные резинометаллические элементы (РМЭ), что повышало жесткость упругого венца большого зубчатого колеса тяговой передачи в несколько раз. Скорость движения пассажирского тепловоза на руководящем подъеме находится в пределах 40...50 км/ч, что означает увеличение кинетической энергии при ударе во время прохождения рельсового стыка в 3...4 раза. Отсюда следует, что жесткостная характеристика УЗК должна быть ближе к линейной, как, например, это было сделано в УЗК грузового тепловоза 2ТЭ25А, где в отверстия венца и тарелок были запрессованы с небольшим натягом 1,5 мм 16 упругих элементов, радиальная жесткость которых выбрана по условию передачи пускового крутящего момента с нераскрытием зазора по упругим элементам и обеспечением их длительной работы.

Другим вариантом, обеспечивающим приемлемую жесткостную характеристику при использовании тепловоза как для грузового, так и для пассажирского движения, является разработанная ВНИИЖТ конструкция УЗК с овально-призматическим упругим элементом [14]. Однако при использовании таких УЗК, как и при использовании РМЭ с наружными обоймами, основной проблемой становится износ отверстий под РМЭ [14;19]. Согласно [19], «Ресурс УСЗК по допустимому износу составляет около 3 млн км, однако на заводах УСЗК меняют уже при пробеге 1,5–1,7 млн км из-за предельного износа отверстий в венце и боковых фланцах...». В связи с этим были проведены эксплуатационные испытания

РМЭ с цилиндрическими элементами в стаканах из полиуретана ПФЛ-100, капрона и алюминия; после пробега 420 тыс.км было обнаружено, что наружные поверхности стаканов из полиуретана имели следы намина, стаканы из капрона имели кольцевую выработку 0,4...0,7 мм, а из алюминия — небольшой износ 0,1...0,2 мм в зоне отверстий фланцев [14;19]. В [19] было предложено изготавливать арматуру РМЭ из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Применение для арматуры РМЭ полимерных материалов позволяет исключить износ отверстий в венце и фланцах УЗК.

Авторами предложен вариант конструкции УЗК, не требующий применения наружной арматуры РМЭ (рис. 8).

Возможность поворота и центровки венца 2 относительно ступицы 1 обеспечивается за счет того, что все наружные выступы 8 по высоте выполнены равноудаленными от центра ступицы 1, со сферическими поверхностями на концах, контактирующими со впадинами между внутренними выступами 7 в диске венца 2. Венец 2 выполнен разъемным из двух половин, соединенных болтами 9, зубья каждой из половин выполнены косыми с одинаковым и противоположным по направлению углом наклона, а поверхности впадин венца выполнены сферическими с радиусом, равным радиусу сферической поверхности выступов ступицы. При демонтаже венца 2 во время ремонта и обслуживания болты 9 откручиваются, что обеспечивает разъем половин венца 2 и свободное отсоединение их от ступицы 1. На конструкцию УЗК получен патент на изобретение [20].

В дальнейшей перспективе целесообразно создание конструкций опорно-осевого тягового привода, в котором упругие элементы вынесены за пределы тяговой передачи. Одной из таких конструкций является агрегатный тяговый привод, рассмотренный авторами в [21]. Однако такой привод требует уменьшения осевого габарита ТЭД за счет увеличения радиального габарита, что сложнее реализовать при диаметре колес 1050 мм. В этом случае возможной альтернативой УЗК является вынос упругих элементов за пределы тяговой передачи и размещение их на диске колеса. Это снимает ограничения на размеры упругих элементов и упрощает их замену при ремонте. В качестве примера на рис. 9 изображен вариант тягового привода, предложенный авторами.

При работе тягового привода в сборе крутящий момент с вала 4 передается на малое зубчатое колесо 3 и далее на большое зубчатое колесо 10 и колесо 11 колесной пары. При необходимости осмотра МОП 6 со стороны большого зубчатого колеса 10 снимаются половины корпуса редуктора 1, затем разъединяется

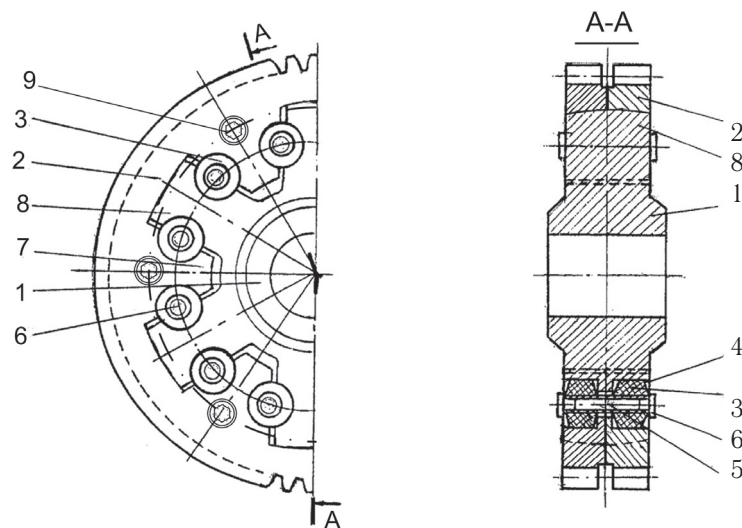


Рис. 8. УЗК для шевронной зубчатой передачи: 1 – ступица; 2 – венец с диском; 3 – упругие элементы; 4 – гнезда; 5 – втулки; 6 – стопорные винты; 7 – внутренние выступы; 8 – наружные выступы; 9 – болты

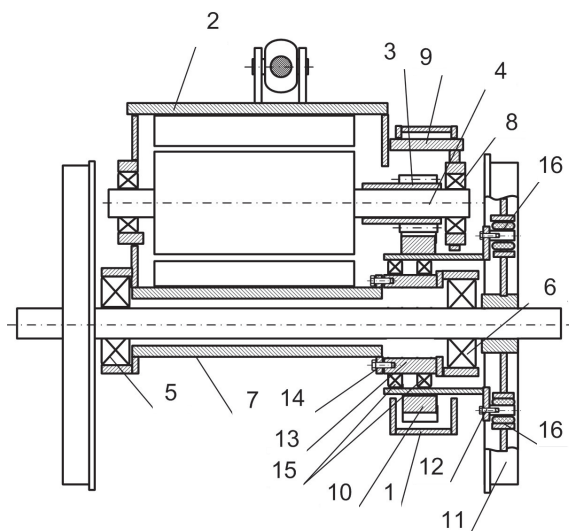


Рис. 9. Опорно-осевой привод с упругими элементами, расположенными на диске колеса: 1 – редуктор; 2 – ТЭД; 3 – малое зубчатое колесо; 4 – вал ТЭД; 5, 6 – МОП качения; 7 – корпус; 8 – роторный подшипник; 9 – защитный корпус; 10 – большое зубчатое колесо; 11 – колесо колесной пары; 12, 14 – болты; 13 – стакан; 15 – подшипники; 16 – амортизаторы

болтовое соединение 14, соединяющее стакан 13 и корпус 7, разъединяется не показанное на рис. 8 болтовое соединение ТЭД 2 и корпуса 7, после чего разъединяется соединение ступицы большого зубчатого колеса 10 с колесом 11 колесной пары и большое зубчатое колесо 10 отодвигается от колеса 11 колесной пары, обеспечивая доступность МОП 6 для осмотра.

При движении локомотива во время прохождения вертикальных неровностей пути в зубчатой передаче

возникают динамические моменты, которые амортизируются за счет деформации амортизаторов 16. Амортизация динамических моментов приводит к снижению кратковременных максимальных усилий, развиваемых на ободу колесной пары, благодаря чему уменьшается проскальзывание колесной пары относительно рельсов и улучшается сцепление колес с рельсами. При этом деформация амортизаторов 16 не влияет на расстояние между малым зубчатым

колесом 3 и большим зубчатым колесом 10, поскольку большое зубчатое колесо 10 опирается на стакан 13 корпуса 7 МОП 5 и 6.

На предложенный вариант тягового привода авто-рами получен патент [22].

Выводы и рекомендации

1. В связи с анонсированными планами выпуска опытного образца тепловоза ТЭ26 для линий с небольшой грузонапряженностью уже в конце 2024 года, проведен анализ недостатков проекта и поиск возможностей их устранения наиболее простыми способами. Установлено, что к основным недостаткам тепловоза ТЭ26 относятся:

- низкий коэффициент использования сцепного веса унифицированной бесчелюстной тележки в расчетном режиме тяги ($\eta=0,88$) при требовании к перспективным локомотивам обеспечить величину данного показателя не ниже $\eta=0,92$;
- необходимость модернизации траверсного подвешивания тяговых электродвигателей для исключения изнашиваемых пар скольжения с учетом возможного использования привода с жестким зубчатым колесом;
- отсутствие унифицированного ряда тепловозов на базе данной модели, включающей в себя пассажирский тепловоз, способный заменить выпускаемый ТЭП70БС.

2. Доказано, что для унифицированной трехосной бесчелюстной тележки можно достичь величины коэффициента использования сцепного веса η , более высокой, чем 0,92, за счет применения сбалансированного рессорного подвешивания и увеличения жесткости в вертикальном направлении опор кузова на тележку. Также установлена дополнительная возможность повышения сцепных свойств за счет применения упругого зубчатого колеса в тяговой передаче, однако для количественной оценки реального эффекта этого мероприятия в эксплуатации требуются дальнейшие исследования.

3. Предложено для реализации сбалансированного рессорного подвешивания при внесении

минимальных конструктивных изменений в тележку использовать пневмопружинное рессорное подвешивание. Для повышения жесткости резинометаллических опор кузова в вертикальном направлении предложено вместе выполнять их, вместо набора однослойных резинометаллических элементов, в виде многослойного резинометаллического элемента, что позволит увеличить число слоев и уменьшить толщину каждого слоя при том же самом числе листов арматуры. Для модернизации траверсного подвешивания предложена резинометаллическая подвеска с плоскими и сферическими резинометаллическими элементами.

4. Доказано, что тепловоз ТЭ26 в штатном исполнении может заменить тепловоз ТЭП70БС в исполнении с передаточным числом редуктора $u=4,12$, а с использованием тягового привода, примененного на тепловозе ТЭП150 — тепловоз ТЭП70БС в штатном исполнении с $u=3,12$. В последнем случае целесообразна доработка передаточного механизма для увеличения осевых габаритов для размещения ТЭД, исходя из возможной эксплуатации тепловоза только на колее шириной 1520 мм.

5. Предложено для повышения конкурентоспособности пассажирской модификации ТЭ26 использовать передачу переменного-переменного тока, что позволит создать тепловоз, который одновременно может быть использован и как пассажирский и как грузопассажирский, полностью заменив обе модификации тепловоза ТЭП70БС. Доказана возможность создания такого тепловоза не только с опорно-рамным, но и с опорно-осевым подвешиванием при условии наличия упругого звена в тяговой передаче, поскольку в этом случае величина неподрессоренной массы, приходящейся на одну ось, не превышает аналогичных показателей для пассажирских электровозов, что позволит создать универсальный тепловоз, пригодный для грузового и пассажирского движения. Предложены конструкции упругого зубчатого колеса и опорно-осевого привода с упругими элементами на колесе. 

Литература

1. Проблемы создания тепловозов для линий с небольшой интенсивностью движения / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, С. О. Копылов, Е. В. Николаев. - Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2023. - № 2. - С. 22-31.
2. Евстратов, А. С. Экипажные части тепловозов / А. С. Евстратов. - Москва : Машиностроение, 1987. - 136 с. - Текст : непосредственный.
3. Возможности унификации грузовых и пассажирских тепловозов широкой колес / Д. Я. Антипин, М. И. Борзенков, В. И. Воробьев, О. В. Дорофеев, С. Н. Злобин, О. В. Измеров, С. О. Копылов. - Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. - 2019. - № 4 (67). - С. 40-49.
4. Возможности создания универсальных тепловозов для грузовой и пассажирской службы / В. И. Воробьев, С. Н. Злобин, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. - Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. - 2023. - № 3-2(82). - С. 11-18.
5. Анализ и разработка конструктивных решений экипажной части для повышения тяговых свойств локомотивов / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. - Текст : непосредственный // Транспортное машиностроение. - 2023. - № 6 (18). - С. 52-62.
6. Михальченко, Г. С. Оценка износа колес грузового тепловоза с радиальной установкой колесных пар / Г. С. Михальченко, А. С. Юршин. - Текст : непосредственный // Вестник БГТУ. - 2007. - № 2(14). - С. 39-43.
7. Тепловозы : Конструкция, теория и расчет / Под ред. д-ра техн. наук Н. И. Панова. - Москва : Машиностроение, 1976. - 543 с. - Текст : непосредственный.
8. Характеристики и основные конструктивные решения тележек тепловоза 2ТЭ121 / С. П. Филонов, А. Т. Литвинов, Л. К. Добрынин, Ю. В. Колесин. - Текст : непосредственный // В сборнике «Результаты испытаний тепловоза 2ТЭ121» ; под редакцией Л. К. Добрынина. Труды ВНИТИ, вып. 62. Коломна, 1985. - С. 49-60.
9. Конструкция и динамика тепловозов / В. Н. Иванов, В. В. Иванов, Н. И. Панов, А. П. Третьяков. - Москва : Транспорт, 1974. - 336 с. - Текст : непосредственный.
10. Пневматическое рессорное подвешивание тепловозов: монография; под общей редакцией С. М. Куценко. - Харьков : Вища школа, 1978. - 97 с. - Текст : непосредственный.
11. Повышение надежности экипажной части тепловозов / А. И. Беляев, Б. Б. Бунин, С. М. Голубятников [и др.]. - Москва : Транспорт, 1984. - 248 с. - Текст : непосредственный.
12. Пузанов, В. А. Динамические качества рессорного подвешивания тепловоза 2ТЭ121 / В. А. Пузанов, Е. Л. Цейтлин. - Текст : непосредственный // В сборнике «Результаты испытаний тепловоза 2ТЭ121» ; под редакцией Л. К. Добрынина. Труды ВНИТИ, вып. 62. Коломна, 1985. - С. 117-118.
13. Развитие локомотивной тяги / Н. А. Фуфрянский, А. С. Нестрахов, А. Н. Долганов, Н. Н. Каменев, Э. А. Пахомов; под редакцией Н. А. Фуфрянского и А. И. Бевзенко. - Москва : Транспорт, 1982. - 303 с. - Текст : непосредственный.
14. Михайлов, Г. И. Повышение надежности и несущей способности тяговых зубчатых передач. Опыт поиска новых технических решений : монография / Г. И. Михайлов. - Казань : Алгоритм+, 2023. - 560 с. - Текст : непосредственный.
15. Бирюков, И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. - Москва : Транспорт, 1986. - 256 с. - Текст : непосредственный.
16. Патент № 213277 Российская Федерация, МПК В61С 9/38(2006.01). Узел подвешивания тягового электродвигателя : № 2021118614: заявлено 25.06.2021 : опубликовано 30.09.2021 / Космодамианский А. С., Измеров О. В., Воробьев В. И., Корчагин В. О., Пугачев А. А., Капустин М. Ю., Самотканов А. В., Шевченко Д. Н., Николаев Е. В., Карпов А. Е. ; Космодамианский Андрей Сергеевич. Бюл. № 25. - Текст : непосредственный.
17. Патент № 157519 Российская Федерация, МПК F16D 3/78(2006.01) : № 2015119063/11. Оболочка резинокордная для высокоэластичной муфты : заявлено 20.05.2015 : опубликовано 10.12.2015/ Воробьев В. И., Измеров О. В., Дорофеев О. В., Злобин С. Н. ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс» (ФГБОУ ВПО «Госуниверситет — УНПК»). Бюл. № 34. - 5 с. : ил. - Текст : непосредственный.

18. Патент № 173560 Российская Федерация, МПК B61C 9/00, F16D 3/78. Компенсационная муфта тягового привода локомотива : № 2017105539 : заявлено 20.02.2017 : опубликовано 30.08.2017 / Воробьев В. И., Антипин Д. Я., Измеров О. В., Новиков А. С., Космодамианский А. С., Шорохов С. Г., Мануева М. В. ; Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет». - Бюл. № 25. - 8 с : ил. - Текст : непосредственный.

19. Кононов, В. Е. Полимерные материалы для повышения ресурса зубчатых колес тягового привода / В. Е. Кононов, Н. Ю. Василевская. - Текст : непосредственный // Локомотив. - 2019. - № 1 (745). - С. 43-45.

20. Патент № 2619880 Российская Федерация, МПК F16H 55/14 (2006.01). Колесо зубчатое упругое : № 2016117482 : заявлено 04.05.2016 : опубликовано 19.05.2017 / Воробьев В. И., Стриженко А. Г., Тихомиров В. П., Измеров О. В. ; Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет». Бюл. № 14. - 9 с. : ил. - Текст : непосредственный.

21. Применение агрегатных тяговых приводов для локомотивов с повышенными тяговыми свойствами / А. С. Космодамианский, А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. - Текст : непосредственный // Транспорт Урала. - 2023. - № 2(77). - С. 41-48.

22. Патент № 224556 Российская Федерация, МПК B61C 9/48 (2006.01). Тяговый привод локомотива : № 2023134344 : заявлено 28.03.2024 : опубликовано 28.03.2024 / Злобин С. Н., Воробьев В. И., Измеров О. В., Копылов С. О., Николаев Е. В. : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени М. С. Тургенева» (ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева»). Бюл. № 10. - Текст : непосредственный.