

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.027.4: 656.2

doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-33-48

АНАЛИЗ РАЦИОНАЛЬНОСТИ ВЫБОРА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ТЕПЛОВОЗА 2ТЭ35А ДЛЯ ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА

Андрей Сергеевич Космодамианский^{1✉}, Александр Анатольевич Пугачев², Владимир Иванович Воробьев³, Олег Васильевич Измеров⁴, Артем Евгеньевич Карпов⁵

^{1,5} Российский университет транспорта, Москва, Россия

^{2,3,4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ askosm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7835-3039>

² alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

³ vladimvorobiev@yandex.ru

⁴ izmerov@yandex.ru

⁵ akarpov576@gmail.com

Аннотация

Рассмотрена задача поиска рациональных технических решений магистрального автономного локомотива 2ТЭ35А для Восточного полигона ОАО РЖД. Установлено, что в целом конструктивные решения тепловоза рациональны с точки зрения ускорения создания тепловоза и освоения его производством. Выявлен ряд конструктивных недостатков тепловоза к которым, в частности, относятся применение быстроходного дизеля с максимальной частотой вращения выше 1800 мин⁻¹, конструкция тележки с верхней промежуточной рамой, увеличивающая вес тележки, большое число пар трения в конструкции тележки, а также ухудшение сцепных свойств и рост неподдрессированной массы в

случае использования жесткого зубчатого колеса в тяговой передаче. По основным тяговым показателям тепловоз 2ТЭ35А не превосходит перспективных отечественных тепловозов, разработанных около 40 лет назад. Для дальнейшего повышения тягово-сцепных свойств с целью обеспечения возможности работать с составами массой 9000 т предложена конструкция магнитного усилителя сцепления, для компоновки которого в габаритах тележки с колесами диаметром 1080 мм использован дугостаторный асинхронный двигатель.

Ключевые слова: тепловоз, локомотив, тележка, привод, электродвигатель, динамика, сцепление, рельсы, надежность, конструирование.

Ссылка для цитирования:

Космодамианский А.С. Анализ рациональности выбора технических решений тепловоза 2ТЭ35А для восточного полигона / А.С. Космодамианский, А.А. Пугачев, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, А.Е. Карпов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 2. – С. 33-48. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-33-48.

Original article

Open Access Article

RATIONAL ANALYSIS OF CHOOSING TECHNICAL SOLUTIONS OF 2ТЭ35А DIESEL LOCOMOTIVE FOR EASTERN POLYGON

Andrey Sergeevich Kosmodamiansky^{1✉}, Aleksandr Anatolyevich Pugachev², Vladimir Ivanovich Vorobyov³, Oleg Vasilyevich Izmerov⁴, Artem Evgenyevich Karpov⁵

^{1,5} Russian University of Transport, Moscow, Russia

^{2,3,4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ askosm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7835-3039>

² alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

³ vladimvorobiev@yandex.ru

⁴ izmerov@yandex.ru

⁵ akarpov576@gmail.com

Abstract

The problem of finding rational technical solutions for 2ТЭ35А mainline autonomous locomotive for Eastern Polygon of Russian Railways is considered. It is found out that, in general, designs of a diesel locomotive are rational in terms of accelerating the construction of a diesel locomotive and putting it into production. A number of design disadvantages of the locomotive have been identified, which, in particular, include the use of a high-speed diesel engine with a maximum rotational speed above 1800 min^{-1} , the design of the bogie with an upper intermediate frame, which increases bogie weight, a large number of friction pairs in the bogie structure, as well as deterioration of coupling properties and an increase in unsprung

mass in the case of using a rigid gear wheel in a traction transmission. According to the main traction indicators, 2ТЭ35А diesel locomotive does not exceed the promising domestic diesel locomotives developed about 40 years ago. A magnetic clutch booster is proposed for further enhance traction properties in order to ensure the ability to work with trains weighing 9,000 tons. For the design of the clutch booster bogie dimensions with wheel diameter of 1080 mm include an arc-shaped asynchronous motor.

Keywords: diesel locomotive, locomotive, bogie, drive, electric motor, dynamics, coupling, rails, reliability, construction.

Reference for citing:

Kosmodamiansky AS, Pugachev AA, Vorobyov VI, Izmerov OV, Karpov AE. Rational analysis of choosing technical solutions for 2ТЭ35А diesel locomotive for Eastern Polygon. Transport Engineering. 2025;2:33-48. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-33-48.

Формулировка проблемы

В настоящее время АО «Люденовский тепловозостроительный завод», входящий в состав АО «Синара-Транспортные Машины», разработан восьмиосный тепловоз 2ТЭ35А, предназначенный для эксплуатации на Восточном полигоне, согласно разработанным ОАО «РЖД» в 2018 году техническим требованиям на магистральный автономный грузовой локомотив для Восточного полигона [1].

Развитие Восточного полигона требует повышения веса составов до 7100 т, а в перспективе – до 8000-9000 т. Следует отметить, что планы подобного повышения веса составов существовали еще в конце 70-х годов прошлого века, в результате чего был утвержден типоразмерный ряд локомотивов с силой тяги продолжительного режима до 530 кН на секцию (данных показателей предполагалось достичь при повышении нагрузки на ось до 294 кН и восьмиосного экипажа). Создание нового поколения тепловозов с повышенной нагрузкой на ось, проводившееся в течение 80-х годов, выявило ряд трудностей, в частности, при создании экипажной части, потребовавшей большого объема исследований, что задержало освоению новых локомотивов производством до начала кризиса 90-х годов и привело в конечном итоге к прекращению работ над тяговым подвижным составом, который сегодня

позволил бы повысить веса поездов до требуемого уровня. На основании личного опыта авторов статьи, принимавших участия в создании данных тепловозов, можно выявить три основных группы проблем, создавших трудности:

– повышение нагрузки на ось вызвало необходимость увеличения диаметра колес с 1050 до 1250 мм, увеличения массы колесной пары, ТЭД, базы и моментов инерции тележки, что в совокупности с выставленным РЖД требованием обеспечить возможности эксплуатации тепловозов на пути с рельсами Р50 (первоначально предполагалась эксплуатация на пути с рельсами Р65), это потребовало дополнительных исследований по снижению воздействия локомотивов на путь;

– к началу 80-х годов прошлого века были недостаточно изучены динамические явления в тяговом приводе с опорно-рамной подвеской ТЭД и осевым редуктором, хотя в целом рациональность выбора такого типа привода для грузового тепловоза с повышенной нагрузкой на ось в ходе исследований подтвердилась;

– неподготовленностью технологической базы предприятий, производящих локомотив и комплектующие изделия, что усугубилось снижением технологической дисциплины с середины 80-х годов.

Создание тепловозов 2ТЭ35А также сталкивается с определенными трудностями

ми, что проявляется в изменениях намеченных сроков поставки. Так, в 2021 году в публикациях в СМИ сообщалось, что два первых локомотива новой серии поступят на подконтрольную эксплуатацию в 2022 году, чего не произошло. В конце ноября 2023 года, согласно информации, в выступлении заместителя генерального директора предприятия «Синара – Транспортные Машины» А. Зубихина, в 2024 году 7 локомотивов будут работать на Байкало-Амурской магистрали и Тихоокеанской железной дороге. 26 сентября 2024 года в газете «Гудок» № 143 (27964) появилось сообщение, что тепловоз «в этом году должен выйти на испытания».

Следует также добавить, что в зарубежной практике стихийно накопленный опыт создания грузовых восьмиосных тепловозов крайне ограничен. Это, прежде всего, созданные в США в 60-е годы про-

шлого века и ранее двухдизельные тепловозы, разработка новых моделей которых прекратилась после кризиса железных дорог 70-х годов, имевшие высокую нагрузку на ось (около 300 кН), что снижало требования к весу.

Из сказанного можно сделать вывод о наличии проблемы анализа рациональности технических решений перспективных локомотивов для Восточного полигона, в данном случае для тепловоза 2ТЭ35А, для определения предполагаемых трудностей, которые могут возникнуть в процессе создания локомотива и его эксплуатации, на основе методологии технической инноватики [2] как это ранее было сделано авторами в [3] применительно к ранним вариантам проектов подобных локомотивов. Статья является попыткой решения данной проблемы.

Объект исследования

Тепловоз 2ТЭ35А (рис. 1) представляет собой двухсекционный тепловоз с

компоновкой, традиционно используемой для отечественных тепловозов.

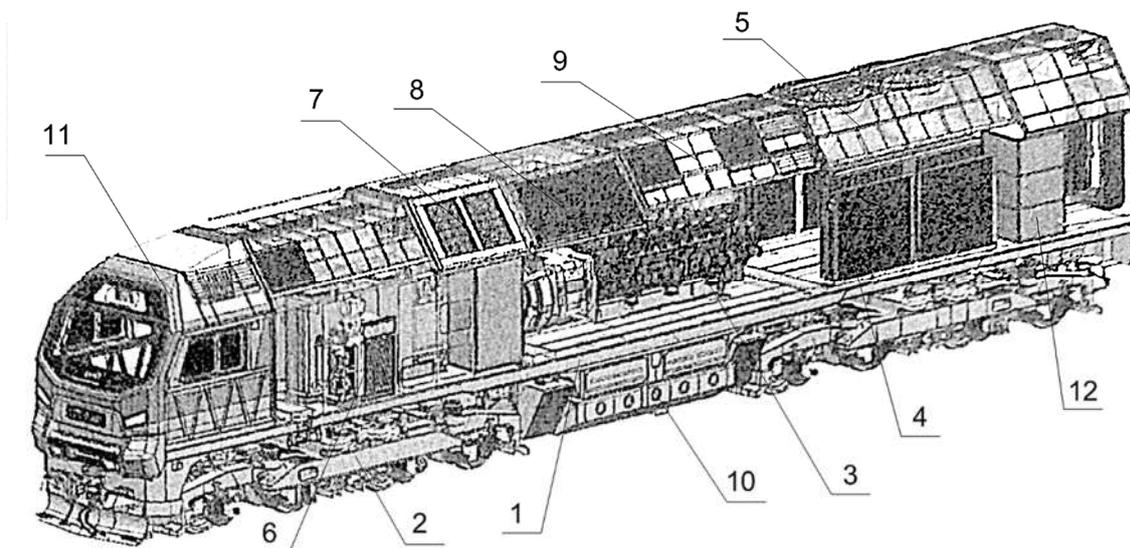


Рис. 1. Тепловоз 2ТЭ35А (по материалам презентаций): 1 – главная рама; 2 – тележка; 3 – дизель-генератор; 4 – холодильник; 5 – вентиляторы холодильника; 6 – электрооборудование; 7 – электродинамический тормоз; 8 – фильтр очистки воздуха; 9 – глушитель; 10 – топливный бак; 11 – кабина; 12 – санузел
 Fig. 1. Autonomous diesel locomotive 2TE35A (based on presentations): 1 – main frame; 2 – bogie; 3 – diesel generator; 4 – refrigerator; 5 – fans of the refrigerator; 6 – electrical equipment; 7 – electrodynamic brake; 8 – air cleaning filter; 9 – silencer; 10 – fuel tank; 11 – cockpit; 12 – lavatory

Дизель-генератор, как наиболее тяжелый агрегат, расположен в середине локомотива вместе с топливным баком и аккумуляторным отсеком, находящимися между тележками, что облегчает развеску

тепловоза и снижает моменты инерции кузова в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Со стороны кабины расположено преобразовательное оборудование, электроаппараты и тормозной компрессор,

с противоположной стороны – охлаждающее устройство с вентиляторами. Опыта крупносерийного выпуска магистральных тепловозов с электропередачей завод не имеет, ранее на базе маневрового ТЭМ7 совместно были построено 17 тепловозов (2 - ТЭРА1 с *General Motors*, США, и 15 – ТЭ8, с *General Electric*, США).

В целом данное компоновочное решение минимизирует униформацию [4],

снижая тем самым вероятность ошибки проектирования без явного ухудшения параметров конструкции, что можно считать рациональным. При этом к общим недостаткам тепловоза можно отнести сложность построения на его базе семейства тепловозов и электровозов в связи с применением колес диаметром 1080 мм. Перейдем к рассмотрению технических показателей и отдельных агрегатов тепловоза.

Анализ уровня технических показателей тепловоза

Наиболее близкими по техническим показателям к тепловозу 2ТЭ35А из числа ранее построенных и испытанных отечественных локомотивов являются восьмиосные тепловозы ТЭ136, 2ТЭ136 и 2ТЭ126, построенные во второй половине 80-х годов прошлого века. Данные тепловозы имеют передачу переменного тока, что затрудняет их сравнение с 2ТЭ35А. Однако в то же самое время был построен макетный образец ше-

стиосного тепловоза 2ТЭ137, с тем же тяговым приводом, но с передачей переменного - переменного тока, асинхронными тяговыми двигателями (АТД) и конструктивной скоростью 120 км/ч. Это позволяет сопоставить показатели опытных образцов отечественных тепловозов, построенных около 40 лет назад, с 2ТЭ35А, путем пересчета тягового усилия тепловоза 2ТЭ137 в продолжительном режиме с шести на восемь осей на секцию (табл. 1).

Таблица 1

Параметры тепловозов

Table 1

Locomotive parameters

Параметр	Опытные тепловозы 80-х годов	2ТЭ35А (тех. проект)	Относительная разница, %
Служебная масса, т	2*200	2*200	0
Мощность по дизелю, кВт	2*4410	2*3650	-21
Сила тяги кН	2*524	2*525	0
Скорость продолжительного режима $V_{пр}$, км/ч	22	18,6	-22
Запас топлива, кг	2*10000	2*8000	-25
Запас песка, кг	2*2000	2*1200	-67
Длина по осям автосцепок, м	2*24,75	2*24	+3,1
Минимальный радиус проходимых кривых, м	125	125	0
Конструкционная скорость, км/ч	120	120	0

Как видно из табл. 1, тепловоз 2ТЭ35А имеет примерно на 20 % меньшую мощность и скорость продолжительного режима по сравнению с показателями, достигнутыми почти 40 лет назад, при этом запас топлива оказывается на четверть меньше, а запас песка – более чем в полтора раза меньше. Скорость продолжитель-

ного режима 18,6 км/час является близкой к минимально допустимой по требованиям 18 км/ч [1], при этом она может быть реализована только при стабильном сцеплении колеса с рельсом, когда она не сможет снизиться по причине значительного проскальзывания, либо вследствие того, что система управления электропередачей

уменьшает ток АТД на оси при увеличении скольжения, что, естественно, снижает общую мощность на тягу. На это указывают и результаты эксплуатации тепловоза ТЭ25А в двух- и трехсекционном исполнении, также имевшего скорость расчетного режима 18,5 км/ч, для которого «на руководящих подъемах необходимо не допускать снижения скорости ниже критической [5].

Поскольку соотношение запаса топлива к мощности у 2ТЭ35А примерно то же самое, что и у перспективных тепловозов 80-х годов, можно сделать вывод, что пробег тепловоза без экипировки будет

Силовая установка

На тепловозе 2ТЭ35А применена дизель-генераторная установка с дизелем 16ДМ-185Т размерности 18,5/21,5, имеющим мощность 3650 кВт, максимальную частоту вращения 1854 мин⁻¹ и удельный расход топлива не более 204 г/кВт ч, выпускаемый предприятием «Уральский дизель-моторный завод», также входящий в состав АО «Синара–Транспортные Машины». Применение высокооборотного дизеля позволило снизить сухую массу дизель-генераторной установки до 24600 кг, что на 16 % меньше массы дизель-генератора 18-9ДГ тепловоза 2ТЭ25КМ мощностью 2650 кВт.

Использование высокооборотного дизеля в данном случае обусловлено не технико-экономическими соображениями, а тем обстоятельством, что производство среднеоборотных дизелей, обычно применяемых на магистральных тепловозах, находится на предприятии АО «Коломен-

Тележка

Отметим, что при создании тележки 2ТЭ35А конструкторами были учтены замечания, ранее высказанные авторами данной статьи в [3], в результате чего рамные конструкции, буксовые узлы и ряд других узлов были перепроектированы с учетом увеличения статических и динамических нагрузок (рис. 2а, б.). Конструкция тележки тепловоза ТЭМ7 достаточно освещена в технической литературе, в свя-

примерно тем же, т.е. 800...1000 км в зависимости от веса состава и профиля участка, в то время как для РЖД целесообразно увеличить безэкипировочный пробег до 6000 км.

Таким образом, несмотря на заведомо более высокий уровень технологии изготовления и современные комплектующие, тепловоз 2ТЭ35А по своим тяговым показателям остается на уровне перспективных тепловозов 40-летней давности. Основные преимущества относятся к сфере экономических показателей (увеличение срока службы, снижение расхода топлива, расходов на ремонт и т.п.).

ский завод», которое входит в состав АО «Трансмашхолдинг», являющийся конкурентом АО «Синара–Транспортные Машины». Так, АО «Коломенский завод» предлагает среднеоборотный (1000 мин⁻¹) дизель – генератор 12ЛДГ500, который имеет массу 34150 кг при более высокой мощности (4412 кВт) и меньшем удельном расходе топлива (183 г/кВт ч) [6]. Если для маневрово-вывозного тепловоза применение высокооборотного дизеля в составе двухдизельной установки может быть рациональным вследствие того, что при маневровой работе дизель работает на мощности меньше половинной, а также благодаря возможности применения дизеля, массово выпускаемого для грузовых автомобилей (что снижает стоимость и упрощает сервис), то в данном случае нет оснований считать данное решение технически рациональным.

зи с чем рассмотрим только основные отличия.

Двухповодковые буксы заменены на одноповодковые, аналогичные по конструкции применяемым на электровозах, при этом в буксовом подвешивании применены гидrogасители, что уменьшает колебания галопирования тележки. Пружинная траверсная подвеска, имеющая значительное количество изнашиваемых частей, заменена на маятниковую, по конструкции

аналогичную применяемой на электровозах, при этом оси подвесок размещены точно по середине тележки, как это, например, было предложено авторами в [7]. Такая конструкция исключает возникновение момента, перекашивающего тележку и вызывающего дополнительное перераспределение нагрузок по осям.

Принципиальным недостатком тележки данной конструктивной схемы является верхнее расположение промежуточной рамы, которая должна воспринимать вертикальные нагрузки от кузова и, в

связи с этим, имеет значительную массу. В результате масса тележки тепловоза 2ТЭ35А составляет 40000 кг, т.е. всего на 5 % ниже, чем тележка тепловоза 2ТЭ136 в случае использования АТД, аналогичных по параметрам двигателю СТА-1200У1 (42000 кг), несмотря на меньший диаметр колес (1080 мм против 1250 мм) и меньшую базу двухосных тележек (2100 мм против 2250 мм). При этом в боковине промежуточной рамы пришлось сделать нишу для ступеньки лестницы в кабину, что ослабляет боковину.

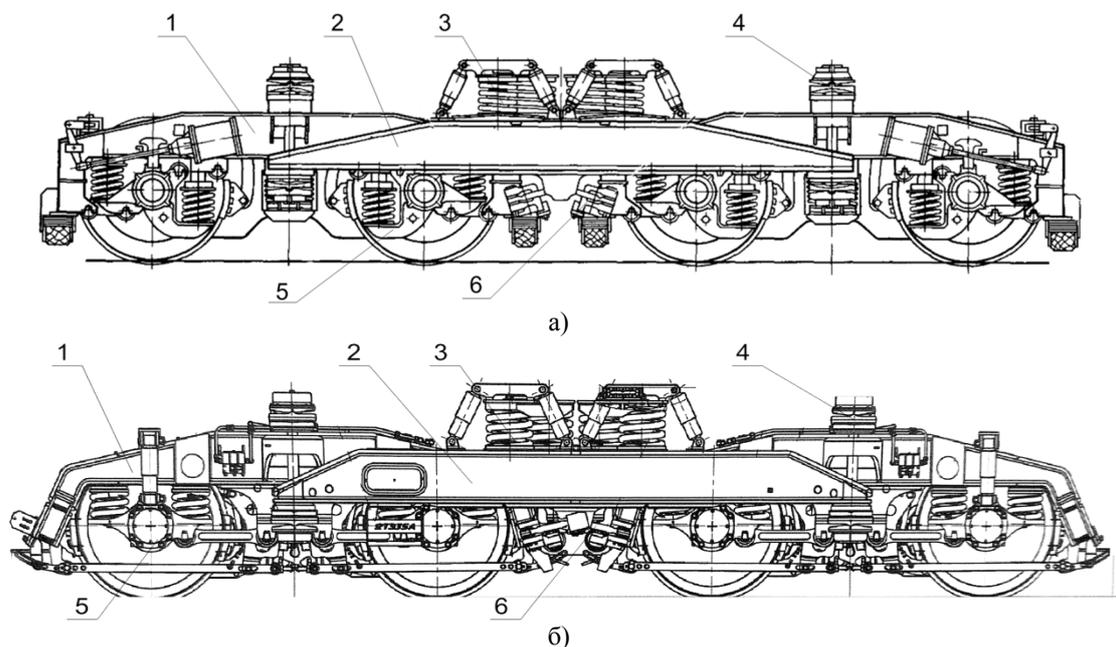


Рис. 2. Восьмиосные тележки: а – тепловоза ТЭМ7; б – тепловоза 2ТЭ35А:

1 – двухосная тележка; 2 – промежуточная рама; 3 – центральная ступень рессорного подвешивания; 4 – маятниковая подвеска; 5 – буксовая ступень рессорного подвешивания; 6 – наклонная тяга

Fig. 2. Eight-axle bogies: a – autonomous diesel locomotive TEM7; b – autonomous diesel locomotive 2TE35A

1 – axle bogie; 2 – intermediate frame; 3 – central stage of spring suspension; 4 – pendulum suspension;

5 – axle box stage of spring suspension; 6 – inclined push-pull rod

Более рациональным решением в данном случае является применение низко расположенной промежуточной рамы (чему препятствуют узлы подвески АТД), либо применение двух независимых двухосных тележек. Следует отметить, что применение коротких наклонных тяг для передачи силы тяги с двухосных тележек на промежуточную раму препятствует сокращению расстояния между средними осями тележек, которое у 2ТЭ35А равно 2100 мм вместо 1900 мм у ТЭ136, несмотря на меньший диаметр колес.

Еще одним недостатком новой тележки стало снижение общего прогиба рессорного подвешивания со 170 до 130 мм. Следует отметить, что в 70-х годах прошлого века в технических требованиях МПС на перспективные тепловозы с нагрузкой на ось 27...30 тс и конструкционной скоростью 120 км/ч указывалось требование обеспечить суммарный статический прогиб двухступенчатого рессорного подвешивания не менее 150 мм [8]. В [8] также для магистральных тепловозов не рекомендуется при двухступенчатом рессорном подвешивании делать статиче-

ский прогиб менее 140 мм (рекомендуемое в [8] значение – 150...200 мм). С другой стороны, сбалансированное рессорное подвешивание обеспечивает лучшие динамические качества тепловоза, чем несбалансированное, что отчасти компенсирует указанный недостаток.

Как уже ранее отмечалось авторами в [3], данная тележка содержит ряд узлов с парами трения; в первую очередь это механизм, передающий силу тяги от двухосных тележек промежуточной рамы и подвеска в виде маятников.

Опорно-осевой тяговый привод тепловоза 2ТЭ35А по своей конструктивной схеме аналогичен приводу тепловоза 2ТЭ25А. Отличие прежде всего состоит в

конструкции подвески ТЭД, которая на тепловозе 2ТЭ25А представляла собой тягу с двумя сферическими резинометаллическими шарнирами (РМШ) по концам, оси которых направлены поперек пути, а и расстояние между осями шарниров равно 480 мм, а на тепловозе 2ТЭ35А – тягу со сферическим подшипником скольжения, ось которого направлена вдоль пути и четырех плоских упругих амортизаторов (рис. 3), при этом расстояние между осью шарнира и серединой пакета амортизаторов, который также выполняет функции компенсации угловых перекосов АТД существенно меньше, чем в подвеске 2ТЭ25А.

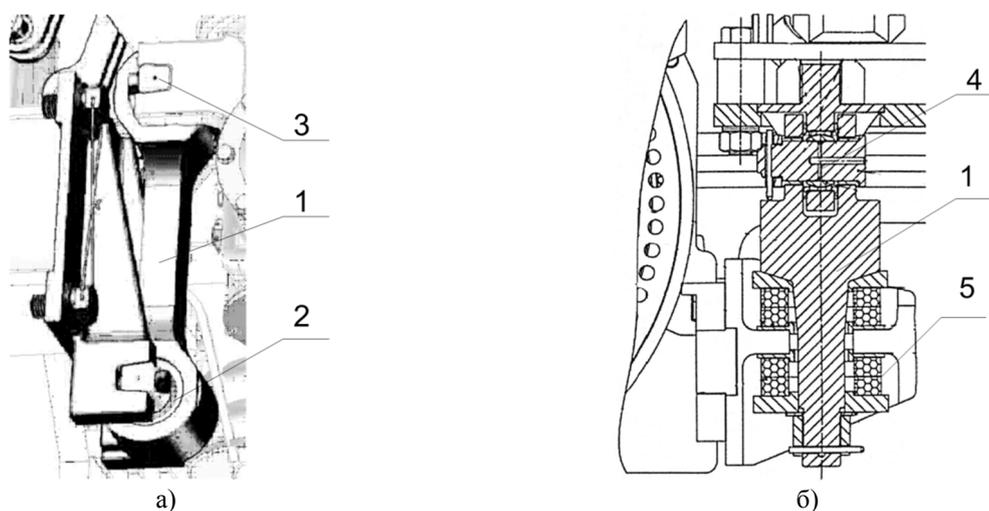


Рис. 3. Подвеска тягового двигателя:

а – тепловоза 2ТЭ25А, б – тепловоза 2ТЭ35А:

- 1 – поводок; 2 – сферический резинометаллический шарнир; 3 – клиновое крепление;
4 – сферический шарнир скольжения; 5 – плоские амортизаторы

Fig. 3. Traction electric motor suspension:

a - autonomous diesel locomotive 2TE25A, b - autonomous diesel locomotive 2TE35A:

1 – leash; 2 – spherical rubber-metal joint; 3 – wedge fastening;

4 – spherical sliding joint; 5 – flat shock absorbers

Конструкция подвески 2ТЭ25А была выбрана из следующих соображений:

- трехосная тележка позволяла выбрать точку подвеса рядом с поперечной балкой и увеличить длину подвески;

- применение радиальной установки колесных пар (РУКП) увеличивает боковые перемещения ТЭД относительно рамы тележки и требует увеличения длины подвески;

- на ТЭ25А первоначально предполагалось применение тяговой передачи с

упругим зубчатым колесом (УЗК), при котором жесткость подвески не имела значения.

На выбор решений подвески 2ТЭ35А повлияли следующие обстоятельства:

- размещение подвески под поперечной балкой ограничивает возможное расстояние между осями шарниров примерно до 350 мм или меньше;

- в двухосной тележке без РУКП меньше поперечное перемещение корпуса АТД относительно рамы тележки;

– при проектировании заранее учитывалась возможность применения жесткого зубчатого колеса, требующего упругой связи АТД с кузовом.

Недостатками подвески тепловоза 2ТЭ35А являются необходимость смазки сферического шарнира и более высокая трудоемкость демонтажа при выкатывании колесной пары.

Как уже ранее отмечали авторы в [3], возможность повышения надежности и долговечности колесно-моторного блока при диаметре колеса 1050 мм ограничена из-за меньшего объема межосевого пространства, чем при диаметре колеса 1250 мм. В целом конструкцию тележки тепловоза 2ТЭ35А можно считать решением, рациональным с точки зрения минимизации возможных ошибок при создании экипажной части и сокращения времени

внедрения. Однако это достигнуто за счет некоторого ухудшения технических и технико-экономических показателей тележки по сравнению с максимально достижимыми.

Альтернативой данной конструкции является разработанная во ВНИКТИ четырехосная тележка с радиальной установкой крайних колесных пар (РУКП, рис. 4) [9]. По данным ВНИКТИ [9], поперечные усилия в кривых для тележки с РУКП находятся примерно на том же уровне, что и тележки тепловоза ТЭМ7; рессорное подвешивание тележки сбалансированное, а сила тяги передается на кузов с помощью наклонной тяги, что позволяет на практике достичь коэффициента использования сцепного веса выше 0,9 без применения пневматических догружателей.

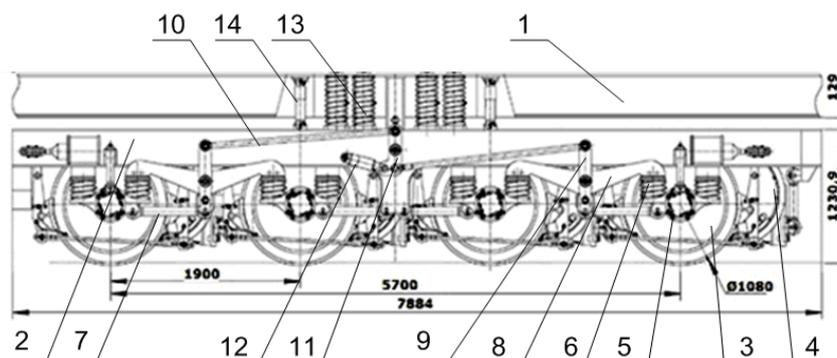


Рис. 4. Четырехосная тележка с РУКП:

- 1 – главная рама; 2 – рама тележки; 3 – колесная пара; 4 – ТЭД; 5 – букса;
 6 – буксовая ступень рессорного подвешивания; 7 – буксовый поводок; 8 – балансир;
 9, 11 – рычаги; 10 – тяга; 12, 14 – гасители; 13 – вторая ступень рессорного подвешивания
- Fig. 4. Four-axle bogie with radial installation of wheelsets:*
 1 – main frame; 2 – bogie frame; 3 – wheelset; 4 – traction electric motor; 5 – axle box;
 6 – axle box stage of spring suspension; 7 – axle box leash; 8 – balance bar; 9, 11 – levers; 10 – thrust;
 12, 14 – dampers; 13 – second stage of spring suspension

Сцепные свойства

В расчетном режиме тяги коэффициент тяги для 2ТЭ35А $\psi = 0,27$, что ниже, чем у 2ТЭ25А (в [10] отмечается, что опыт использования на БАМе тепловозов 2ТЭ25А не подтвердил возможности реализации коэффициента тяги 0,29). Таким образом, можно ожидать стабильной реализации силы тяги тепловоза в расчетном режиме. Однако в перспективе, для вождения составов 9000 т потребуются реализации силы тяги около 550 кН, и, соответственно, значения $\psi=0,28$, что отечествен-

ные АТД в принципе могут обеспечить. Рассмотрим, какие резервы для этого имеет данная конструкция, в зависимости от действующих факторов.

Поперечная составляющая скольжения колеса по рельсу. Восьмиосная тележка 2ТЭ35А обеспечивает меньшие углы набегания направляющего колеса на рельс, чем трехосная тележка распространенных тепловозов 2ТЭ25КМ, что важно в условиях Восточного полигона, где 40 % от общесетевых значений составляют кривые радиу-

сом менее 650 м, и 56 % – кривые менее 350 м [11]. Таким образом, данная конструкция максимально возможно реализует снижение поперечной составляющей скольжения.

Диаметр колеса. Согласно данным ВНИИЖТ [12], основанным на результатах исследования К. Крафта [13], изменение диаметра колеса с 1050 до 1250 мм увеличивает коэффициент сцепления на 4 %. Правда, при этом следует заметить, что результаты К. Крафта для отечественного подвижного состава не проверялись.

Статическое распределение нагрузок по осям. Для компенсации перераспределения вертикальных нагрузок по осям тележек последние оборудованы механизмом передачи силы тяги в виде наклонных тяг и пневматическими догрузателями, как это ранее было реализовано на тепловозе ТЭМ7. Данные конструктивные меры должны обеспечить коэффициент использования сцепного веса не менее 0,9, что близко к предельно возможным значениям.

Динамическое распределение нагрузок по осям для обрессоренных масс. Сбалансированная система рессорного подвешивания обеспечивает выравнивание нагрузок подрессоренных масс при скорости движения в расчетном продолжительном режиме тяги, что можно отнести к факторам, улучшающим сцепные свойства.

Неподрессоренная масса. От величины неподрессоренной массы зависят два фактора, влияющих на реализуемый коэффициент сцепления: разгрузка оси при колебаниях неподрессоренной массы на упругом основании пути и динамическая составляющая крутящего момента, возникающая при указанных колебаниях.

В настоящее время общей тенденцией для опорно-осевого привода тепловозов является применение жестких зубчатых

$$F_{\min} = m_o g + m_{\text{дин}} (g - \ddot{x}_2) = F_{\text{ос}} - m_{\text{дин}} \ddot{x}_o; \quad (2)$$

где m_o – обрессоренная масса, приходящаяся на одну ось, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; \ddot{x}_o – максимальное ускорение при отрицательном полупериоде колебаний неподрессоренных масс после удара; $F_{\text{ос}} = 245 \text{ кН}$ – статическая нагрузка на ось.

колес тяговой передачи, что обусловлено применением моторно-осевых подшипников качения и улучшением технологии изготовления зубчатых колес, что ведет к увеличению динамической неподрессоренной массы, определенной с учетом инерции вращающихся масс. В случае, если данные о моментах инерции статора и ротора двигателя отсутствуют, двигатель подвешен к раме тележки с помощью упругой связи, а передаточное отношение тяговой передачи характерно для грузовых или маневровых тепловозов (т.е. обеспечивает величину приведенного момента инерции ротора, составляющую значительную часть суммарной динамической неподрессоренной массы), можно в первом приближении считать, что динамическая неподрессоренная масса, приходящаяся на одну ось

$$m_{\text{дин}} = m_{\text{стат}} + \frac{m_{\text{д}}}{2}, \quad (1)$$

где $m_{\text{стат}} = 3900 \text{ кг}$ – статическая неподрессоренная масса аналога локомотива (2ТЭ25А), приходящаяся на одну ось; $m_{\text{д}} = 2350 \text{ кг}$ – масса двигателя исследуемого локомотива (двигателя ТД-430).

При указанных параметрах $m_{\text{дин}} = 4100 \text{ кг}$, что близко к величине неподрессоренной массы тепловоза 2ТЭ121 (для которого $m_{\text{дин}} = m_{\text{стат}}$ из-за опорно-рамного подвешивания тягового электродвигателя). В результате испытаний тепловоза 2ТЭ121 было установлено, что максимальные вертикальные ускорения неподрессоренных масс над осью колесной пары при скорости 18-20 км/ч могут достигать примерно 50 м/с^2 (рис. 5).

Минимальное усилие нагрузки колесной пары на рельс при колебаниях неподрессоренных масс во время проезда стыка составит:

В первом приближении можно принять, что $\ddot{x}_o = 0,75 \ddot{x}$, где \ddot{x} – максимальное ускорение неподрессоренных масс при проезде стыка. При указанных значениях получаем $F_{\min} = 91 \text{ кН}$, минимальная динамическая нагрузка на ось составляет лишь 40 % статической.

Однако при этом следует отметить, что, во-первых, речь идет о максимально возможной разгрузке колесной пары при движении. Во-вторых, разгрузка достигает такого значения кратковременно, в течение сотых долей секунды (исходя из частоты собственных колебаний 25...35 Гц для неподрессоренных масс порядка 4 т), и увеличению скорости вращения колеса препятствует инерция вращающихся масс.

На данный момент вопрос о реальном влиянии величины неподрессоренной массы на коэффициент сцепления в эксплуатации как отечественными, так и зарубежными исследователями изучен крайне слабо, главным образом, из-за отсутствия приборов, позволяющих измерять мгновенные величины скорости скольжения колеса по рельсу.

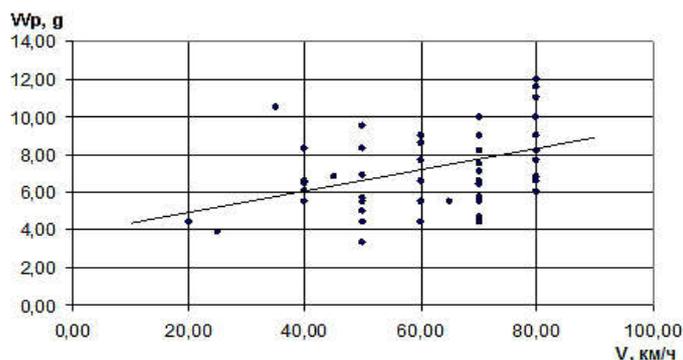


Рис. 5. Экстремальные значения вертикальных ускорений осевого редуктора тепловоза 2ТЭ121 на участке Воркута-Сосногорск
 Fig. 5. Extreme values of vertical accelerations of axial reduction gear box of autonomous diesel locomotive 2TE121 on the Vorkuta-Sosnogorsk section

Задачу прогнозирования динамической составляющей крутящего момента в тяговой передаче при отсутствии упругого звена на данный момент нельзя считать решенной в связи с трудностями оценки двух факторов: ударных процессов в зубчатой передаче и значительного упругого скольжения колеса по рельсу при высоких значениях момента. Вопрос о влиянии динамического момента в валопроводах тягового привода на коэффициент сцепления при отсутствии в них амортизирующих звеньев также недостаточно исследован в отечественной и мировой практике, чтобы можно было говорить о каких-либо точных оценках. В связи с этим ограничимся констатацией известных фактов. Так, в [14] со ссылкой на работы М.Р. Барского и японских исследователей утверждается, что при скорости движения 25 км/ч коэффициент сцепления локомотива с опорно-осевым приводом был на 12 % ниже, чем у локомотива с опорно-рамными приводом ([14], с. 64). Следует отметить, что в данном случае снижение коэффициента сцепления у локомотива с опорно-осевым при-

водом могло также происходить из-за статического перераспределения нагрузок по осям. Также, согласно [15], в результате исследований тепловоза 2ТЭ10Л с жесткой зубчатой передачей было установлено, что при проезде участков пути, имеющих волнообразный износ, коэффициент сцепления снижается на 20 % и более. При этом в [16] отмечается, что причиной волнообразного износа рельсов может как раз быть динамический момент, возникающий в тяговом приводе с опорно-осевой подвеской двигателя при отсутствии упругих звеньев в передаче.

Из изложенного выше можно сделать вывод, что снижение коэффициента сцепления под влиянием неподрессоренных масс существенно зависит от состояния пути, в частности, от образования волнообразного износа. Таким образом, в отношении тягово-сцепных свойств локомотива мы имеем значительный уровень униформации, которая заключается в недостаточности теоретических и эмпирических данных для прогнозирования влияния неподрессоренных масс на коэффициент

сцепления. Есть основания предполагать, что, в случае применения жестких зубчатых колес в тяговой передаче, при определенных условиях, в первую очередь при наличии волнообразного износа рельсов,

Предлагаемые решения

Как следует из изложенного выше, проведенный авторами анализ рациональности технических решений тепловоза 2ТЭ25А не выявил необходимости внесения немедленных изменений в конструкцию, что задержало бы выпуск опытного образца и его инструментальные исследования. В связи с этим рассмотрим возможные технические улучшения в случаях выявления проблем в эксплуатации, а также дальнейшего развития требований к тепловозу.

Прежде всего, основной проблемой может стать снижение коэффициента сцепления из-за влияния динамической неподрессоренной массы, особенно в случае необходимости повышения расчетной скорости движения в продолжительном режиме и ухудшения состояния пути. Самым простым способом решения данной проблемы, не требующим внесения существенных изменений в конструкцию экипажной части, является применение упругого зубчатого колеса (УЗК). УЗК позволя-

ет в опорно-осевом приводе уменьшить динамическую неподрессоренную массу до уровня статической и снизить динамический момент примерно в разы. Согласно [17], основным недостатком УЗК является износ деталей, прежде всего в месте контакта арматуры упругих элементов с зубчатым венцом и/или боковыми фланцами. По мнению авторов, имеет смысл продолжить разработки в области УЗК для повышения срока службы их деталей и уточнения жесткостной характеристики, оптимальной применительно к условиям Восточного полигона.

Рассмотрим вероятность повышения требований к скорости тепловозов в продолжительном режиме. В таблице 2 приведены данные о расчетной скорости движения в продолжительном режиме $V_{пр}$ тепловозов, относившихся в годы создания к мощным магистральным автономным локомотивам грузовой службы, за последние 100 лет.

Рассмотрим вероятность повышения требований к скорости тепловозов в продолжительном режиме. В таблице 2 приведены данные о расчетной скорости движения в продолжительном режиме $V_{пр}$ тепловозов, относившихся в годы создания к мощным магистральным автономным локомотивам грузовой службы, за последние 100 лет.

Таблица 2

Расчетные скорости движения в продолжительном режиме $V_{пр}$ тепловозов

Table 2

Estimated speeds of movement in continuous operation of V_{pr} diesel locomotives

Серия	Ээл	ТЭ2	ТЭ3	2ТЭ10Л	2ТЭ116	2ТЭ121	2ТЭ136
Год создания	1932	1950	1955	1960	1971	1978	1984
$V_{пр}$, км/ч	18	17	20,5	24	24	27	24,6
Серия	ТЭРА1	2ТЭ70	2ТЭ25К	2ТЭ116У	ТЭ8	2ТЭ25К ^{2М}	2ТЭ35А
Год создания	1998	2004	2005	2007	2012	2017	2024
$V_{пр}$, км/ч	18,7	26	24	22,7	15	27,6	18,6

Требуемая величина $V_{пр}$ определяется путем поиска компромисса в основном между двумя факторами: необходимостью увеличить степень использования мощности силовой установки в эксплуатации, что снижает расход энергии на тягу и требует уменьшить $V_{пр}$, и необходимостью повышать объем перевозок при ограниченных возможностях увеличивать вес состава, что

требует повышения $V_{пр}$. Как видно из таблицы 2, после начала массового внедрения тепловозной тяги и до второго десятилетия нашего века $V_{пр}$ в основном колебалась в пределах 20...25 км/ч, при этом в периоды роста грузонапряженности линий $V_{пр}$ увеличивали до 26...28 км/ч. Что же касается тепловозов ТЭРА1 и ТЭ8, то первый был создан в период временного падения объ-

ема перевозок, а второй – для тяги тяжеловесных поездов при освоении крупных месторождений. С другой стороны, в 2007 и 2013 годах было построено два газотурбовоза с $V_{пр}$, равными 38 и 30 км/ч.

Из сказанного следует, что для вождения составов массой 7000...9000т на дорогах Восточного полигона назрела потребность в двух разных типах тепловозов. Первый тип тепловоза рассчитан на условия участков дорог с относительной низкой грузонапряженностью и тяжелым профилем пути, не позволяющим развивать скорости выше 80 км/ч. Для таких тепловозов рациональное значение $V_{пр}=15...20$ км/ч, что позволит снизить расход топлива на измеритель благодаря повышению использования мощности силовой установки. Второй тип тепловоза рассчитан на грузонапряженные участки, что требует увеличения $V_{пр}$ до 25...30 км/ч, потребность в таком тепловозе подтверждается не только типажам перспективных локомотивов, принятыми ранее 1990 года, но и практикой заказа тепловозов серий 2ТЭ70 и 2ТЭ25К^{2М}. Для снижения расходов на топливо для второго типа тепловозов имеет смысл применять альтернативные виды топлива (например, природный газ).

Таким образом, можно ожидать возникновения потребности в повышении $V_{пр}$ до 25...30 км/ч, и, соответственно, повышении мощности тепловоза на 25...30 %. Двигатели ряда ДМ-185 могут иметь мощность до 4900 кВт, при этом число цилиндров может быть доведено до 20, а частота вращения – до 1900 мин⁻¹. При этом остается открытым вопрос, могут ли такие параметры быть реализованы при интенсивной эксплуатации тепловоза в магистральном движении. Примем допущение, что достижение требуемой мощности тем или иным путем возможно (с помощью двигателей ДМ-185, создания иных двигателей, кооперации с ТМХ и т.п.) и рассмотрим, как в этом случае обеспечить стабильную реализацию силы тяги независимо от неблагоприятных условий эксплуатации.

Как видно из ранее проведенного анализа, для тепловоза 2ТЭ35А практически исчерпаны возможности улучшения

сцепных свойств за счет совершенствования конструкции экипажной части. Также пока нет оснований рассчитывать на возможность повышения осевой нагрузки для локомотивов до 300...320 кН, т.е. до нагрузок, принятых для тепловозов Североамериканских ж.д. Более того, возникает вопрос, есть ли смысл идти путем дальнейшего повышения осевых нагрузок, если в зависимости от действия случайных факторов, коэффициент сцепления колес с рельсами может меняться в 2 и более раз, что заставляет принимать для практических расчетов тяги значения, близкие к минимальным.

Ранее авторами в качестве меры уменьшения разброса коэффициента сцепления и повышения за счет этого расчетных коэффициентов тяги локомотива использовать концепцию энергосберегающего тягового привода, основанного на использовании безинерционных методов управления коэффициентом сцепления – электротокосом и электромагнитном [18]. Потенциально, конструкция экипажной части тепловоза 2ТЭ35А удобна для реализации электротокосовых устройств повышения коэффициента сцепления, поскольку она использует двухосные тележки, позволяющие реализовать замкнутые контуры управляющего тока между колесными парами тележки. Однако для практической реализации электротокосового метода необходима изоляция колесных пар от рам тележек, для чего необходимо изменение конструкции буксового рессорного подвешивания, моторно-осевых подшипников и тяговой передачи. В связи с этим имеет смысл рассмотреть и электромагнитные усилители коэффициента сцепления, которые при диаметре колеса 1080 мм возможно реализовать при использовании дугостаторных асинхронных двигателей (ДАД), что ранее было рассмотрено авторами в [18].

На рис. 6 приведен пример предложенного авторами статьи варианта тягового привода с ДАД, интегрированного с магнитным усилителем сцепления. Особенностью ДАД является возможность сделать статор незамкнутым; благодаря этому появляется возможность разместить

катушку индуктора на оси колесной пары. Для уменьшения шунтирования магнитного потока тяговой передачей венец ведомого зубчатого колеса расположен на немагнитной втулке, которая, в свою очередь, опирается на ось колесной пары через роликовые опоры и связана с диском колесного центра с помощью резино-

таллических амортизаторов. Последнее позволяет снизить динамические нагрузки, возникающее в тяговой передаче при проезде неровностей пути, что, в свою очередь, способствует повышению коэффициента сцепления колес с рельсами и снижает динамическую неподрессоренную массу до величины статической.

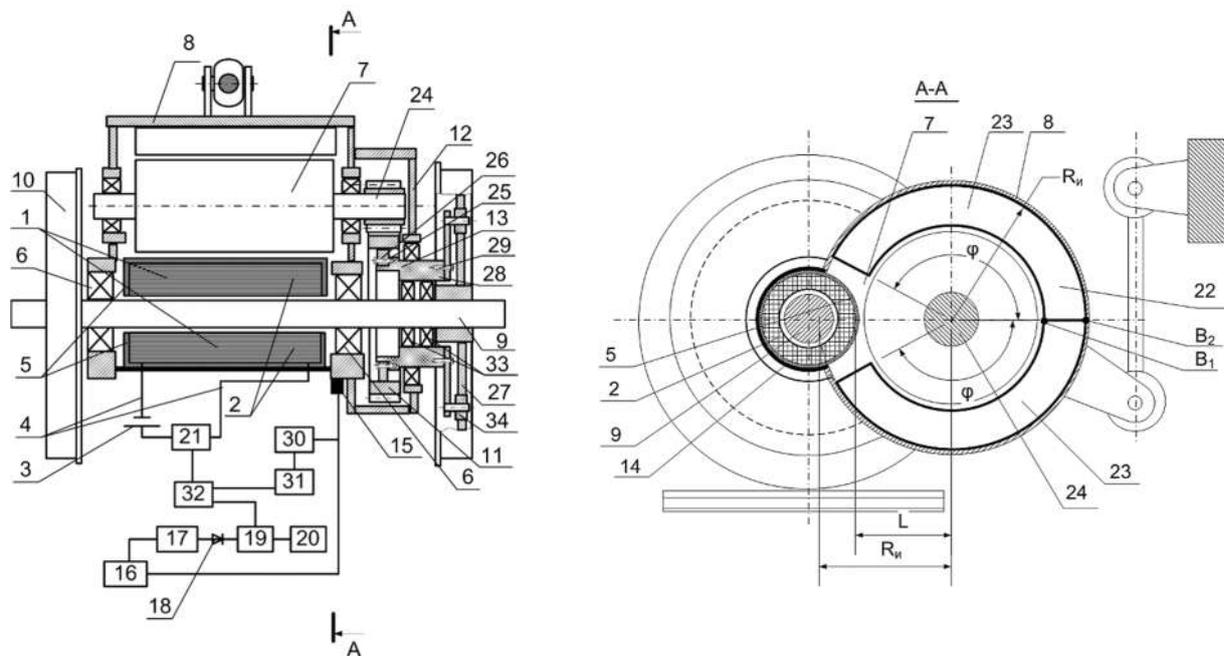


Рис. 6. Тяговый привод с применением дугостаторного асинхронного двигателя:

- 1 – намагничивающая обмотка; 2 – катушка; 3 – источник питания; 4 – провода; 5 – каркас; 6 – моторно-осевые подшипники; 7 – тяговый электродвигатель; 8 – корпус; 9 – ось; 10 – колесная пара; 11 – зубчатое колесо; 12 – кожух редуктора; 13 – немагнитная втулка; 14 – кожух катушки; 15 – датчик продольных ускорений; 16 – блок измерения сигналов; 17 – полосовой фильтр; 18 – выпрямитель; 19 – блок сравнения; 20 – блок установки; 21 – ключ; 22 – статор; 23 – индукторы; 24 – вал; 25 – фланец; 26,29 – болты; 27 – колесо; 28 – ступица; 30 – измерительный блок; 31 – статистический анализатор сигналов; 32 – логический элемент «ИЛИ»; 33 – роликовые опоры; 34 – амортизатор

Fig. 6. Traction drive using arc induction motor:

- 1 – magnetizing winding; 2 – coil; 3 – power supply; 4 – wires; 5 – frame; 6 – motor-axial bearings; 7 – traction motor; 8 – motor frame; 9 – axle; 10 – wheelset; 11 – gear wheel; 12 – reduction gear box frame; 13 – non-magnetic bushing; 14 – coil casing; 15 – longitudinal acceleration sensor; 16 – signal measuring unit; 17 – band-pass filter; 18 – rectifier; 19 – comparison unit; 20 – installation unit; 21 – wrench; 22 – stator; 23 – inductors; 24 – shaft; 25 – flange; 26,29 – bolts; 27 – wheel; 28 – hub; 30 – measuring unit; 31 – statistical signal analyzer; 32 – logical element "OR"; 33 – roller supports; 34 – damper

Раннее обнаружение начала боксования в предлагаемом устройстве для увеличения коэффициента сцепления производится на основании информации о продольных колебаниях неподрессоренных масс, получаемой с помощью датчика ускорений, закрепленного на корпусе моторно-осевого подшипника. Во-первых, при начале проскальзывания колеса по рельсу изменяются статистические характеристики продольных ускорений, и это

изменение выявляется с помощью цифрового статистического анализатора. Во-вторых, если в силу сочетания случайных факторов статистические характеристики не изменились, то дальнейшее увеличение скольжения колеса по рельсу приводит к возникновению автоколебаний колесной пары, которые выделяются из сигнала датчика с помощью полосового фильтра. Срабатывание системы управления ведет к подаче тока в намагничивающую обмотку,

магнитный поток, проходящий через поверхность контакта колеса и рельса, приводит к увеличению коэффициента трения, что ведет к восстановлению сцепления ко-

Выводы и рекомендации

1. Выявлена проблема анализа рациональности технических решений перспективных локомотивов для Восточного полигона, в частности, перспективного тепловоза 2ТЭ35А АО «Людиновский тепловозостроительный завод».

2. В результате проведенного анализа рациональности технических решений установлено, что тепловоз 2ТЭ35А по основным техническим показателям не превосходит отечественные перспективные тепловозы, созданные около 40 лет назад, и его основные преимущества достигнуты за счет экономических показателей (увеличение долговечности, снижение расходов на топливо, ремонт и обслуживание). Компоновка тепловоза выбрана из условия снижения униформации и ускорения создания тепловоза, вследствие чего в целом может быть отнесена к рациональной.

3. Установлено, что применение быстроходного дизеля 16ДМ-185Т с максимальной частотой вращения 1854 мин⁻¹ не дает улучшения технических показателей тепловоза и является вынужденным решением, ввиду отсутствия кооперации между АО «Синара–Транспортные Машины» и АО «Трансмашхолдинг» в сфере локомотивостроения.

4. Установлено, что решение применить модернизированную тележку с верхней промежуточной рамы на базе ранее созданной для тепловоза ТЭМ7 вместо четырехосной тележки в жесткой раме с ра-

леса с рельсом. На предлагаемое устройство авторами подана заявка на получение патента.

диальной установкой колесных пар является рациональным с точки зрения униформации и максимального ускорения создания тепловоза. К недостаткам выбранной конструкции тележки относятся верхнее расположение промежуточной рамы, увеличивающее вес тележки, уменьшение общего статического прогиба рессорного подвешивания в результате модернизации, а также наличие большого числа узлов с парами скольжения, подверженными износу (механизмы передачи силы тяги, маятниковое подвешивание, подвеска тяговых электродвигателей).

5. Установлено, что основным фактором, ухудшающим сцепные свойства тепловоза 2ТЭ235А, является применение жестких зубчатых колес в тяговой передаче, увеличивающих динамическую неподрессоренную массу и динамические моменты в валопроводах тягового привода.

6. Для создания возможностей дальнейшего повышения силы тяги тепловоза с целью обеспечить возможность вождения составов массой порядка 9000 т, авторами предложено использовать магнитные усилители сцепления с дугостаторными асинхронными тяговыми электродвигателями и упругой связью ротора двигателя с колесной парой.

7. На предложенные авторами технические решения подана заявка на получение патента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Магистральные грузовые автономные локомотивы для Восточного полигона. Техн. требования. Утв. заместителем генерального директора - главным инженером ОАО «РЖД» С.А. Кобзевым 29 декабря 2018 года №1455.
2. Техническая инноватика как научное направление / В.И. Воробьев, М.И. Борзенков, С.Н. Злобин, О.В. Измеров, А.Е. Карпов // Материалы международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических си-

стем» Орел: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, № 4 (366), 2024. - С. 32-40.

3. Воробьев В.И., Пугачев А.А., Измеров О.В., Николаев Е.В. Поиск рациональных технических решений тепловоза для Восточного полигона. Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 10 (107). С. 53-63.
4. Инновационное проектирование машин: монография / [О. В. Измеров и др.] под редакцией

член-корр. академии электротехнических наук Российской Федерации, д-ра техн. наук А.С. Космодамианского. – Орел, ОрелГТУ, 2010. – 413 с.

5. Григорьева В. В сервисном депо «Тында-Северная» стартовала комплексная модернизация тепловозов 2ТЭ25А [Электронный ресурс]: статья / В.Григорьева. // Интернет-портал Gazeta-bam.ru <https://gazeta-bam.ru/news/media/2016/3/5/v-servisnom-depo-tynda-severnaya-startovala-kompleksnaya-modernizatsiya-teplovozov-2te25a/?ysclid=m1hsstlwq715305569>
6. Коломенский завод представил дизель нового поколения: статья // М.: Локомотив, №5 (689), 2014, - С. 11.
7. Патент на полезную модель № 185449, Российская Федерация, СПК В61С 9/38 (2006.01). Устройство для крепления тягового электродвигателя локомотива к раме тележки. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Копылов С.О., Измеров О.В., Шорохов С.Г., Маслов М.А., Ашуркова С.Н., Опубл. 05.12.2018. Бюл. № 34.
8. Тепловозы [Текст] : Конструкция, теория и расчет / Под ред. д-ра техн. наук Н. И. Панова. - Москва : Машиностроение, 1976. - 543 с.
9. Лунин А. А., Спилов А. В. О направлениях развития подвижного состава. Презентация АО ВНИКТИ 30.08.2019. [Электронный ресурс]: https://www.railwayexpo.ru/images/docs/2019/presentation/ДЕНЬ_3_30_августа/ЗАЛ_2/10-00_6-й_международный_форум/Сессия_1/1.7_A_Лунин_A_Спилов_RU.pdf. Доступ 27.12.2023.

REFERENCES

1. Mainline autonomous freight locomotives for Eastern Polygon. Specification. 2018 Dec 29.
2. Vorobyov VI, Borzenkov MI, Zlobin SN, Izmerov OV, Karpov AE. Technical innovation as a scientific school. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, 2024: Dynamics, Reliability and Durability of Mechanical and Biomechanical Systems; Orel: Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology. 2024;4(366):32-40.
3. Vorobyov VI, Pugachev AA, Izmerov OV, Nikolaev EV. Search for rational technical solutions of diesel locomotives for the Eastern range. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2021;10(107):53-63.
4. Izmerov OV. Innovative machine design: monograph. Orel: Orel State Technical University; 2010.
5. Grigorieva V. Comprehensive modernization of 2ТЭ25А diesel locomotives has started at Tynda-Severnaya service depot [Internet]. Internet Portal Gazeta-bam.ru. Available from: <https://gazeta-bam.ru/news/media/2016/3/5/v-servisnom-depo-tynda-severnaya-startovala-kompleksnaya-modernizatsiya-teplovozov-2te25a/?ysclid=m1hsstlwq715305569>
6. Kolomna Plant introduced a new generation of diesel engine. Moscow: Locomotive. 2014;5(689):11.
7. Vorobyov VI, Antipin DYa, Kopylov SO, Izmerov OV, Shorokhov SG, Maslov MA, Ashurkova SN. RF Utility Model Patent No. 185449. SEC B61C 9/38 (2006.01). Device for attaching a locomotive traction electric motor to the bogie frame. 2018 Dec 05.
8. Panova NI, editor. Diesel locomotives: design, theory and calculation. Moscow: Mashinostroenie; 1976.
9. Lunin AA, Spirov AV. On the directions of rolling stock development. Presentation of JSC VNIKTI [Internet]: 2019 Aug 30 [cited 2023 Dec 12]. Available from: https://www.railwayexpo.ru/images/docs/2019/presentation/ДЕНЬ_August_3_30/HALL_2/10-00_6-th_International_Forum/Session_1/1.7_A_Lunin_A_Spirov_EN.pdf.
10. Zak VV. Promising diesel locomotive for Eastern Polygon. Locomotive. 2018;9:33-35.
11. Yanovsky AS. At a meeting of the Joint Scientific Council of Russian Railways. Railway Track and Facilities. 2021;5:7-9.
10. Перспективный тепловоз для восточного полигона / В. В. Зак [и др.] // Локомотив : производственно-технический и научно-популярный журнал. - 2018. - N 9. - С. 33-35.
11. На заседании Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / А.С. Яновский // Путь и путевое хозяйство, № 5, 2021 – С. 7-9.
12. Развитие локомотивной тяги. / Н.А. Фурфрянский, А.С. Нестрахов, А.Н. Долганов, Н.Н. Каменев, Э.А. Пахомов; Под ред. Н.А. Фурфрянского и А.И. Бевзенко. – М.: Транспорт, 1982 – 303 с.
13. Kraft K. Die Haftreibung // Elektrische Bahnen. 1968. Heft 6. S. 142 - 150; Heft 7. S. 161 -170; Heft 8. S. 190 - 198; Heft 9. S. 214 - 219.
14. Бирюков И.В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И.В. Бирюков, А.И. Беляев А.И, Е.К. Рыбников - М., Транспорт, 1986 – 256 с.
15. Развитие локомотивной тяги. / Н.А. Фурфрянский, А.С. Нестрахов, А.Н. Долганов, Н.Н. Каменев, Э.А. Пахомов; Под ред. Н.А. Фурфрянского и А.И. Бевзенко. – М.: Транспорт, 1982 – 303 с.
16. Иванов В.Н. Конструкция и динамика тепловозов. / В.Н. Иванов, М.: Транспорт, 1974.-336 с.
17. Михайлов Г.И. Повышение надежности и несущей способности зубчатых тяговых передач: монография / Г.И. Михайлов. – Казань: Алгоритм+, 2023. – 560 с.
18. Пугачев А. А., Воробьев В. И., Измеров О. В., Карпов А. Е. Развитие концепции энергосберегающего тягового привода локомотива // Транспортное машиностроение. 2024. №. 9. С. 47-57.

12. Fufriansky NA, Nestrakhov AS, Dolganov AN, Kamenev NN, Pakhomov EA. Development of locomotive traction. Moscow: Transport; 1982.
13. Kraft K. Die Haftreibung. Elektrische Bahnen. 1968;6:142 - 150;7:161-170;8:190-198;9:214-219.
14. Biryukov IV, Belyaev AI, Rybnikov EK. Traction transmission of electric rolling stock of railways. Moscow: Transport; 1986.
15. Fufriansky NA, Nestrakhov AS, Dolganov AN, Kamenev NN, Pakhomov EA. Development of locomotive traction. Moscow: Transport; 1982.

16. Ivanov VN. Design and dynamics of diesel locomotives. Moscow: Transport; 1974.
17. Mikhailov GI. Improving the reliability and bearing capacity of gear traction gears: monograph. Kazan: Algorithm+; 2023.
18. Pugachev AA, Vorobyov VI, Izmerov OV, Karpov AE. Development of the concept of energy-saving traction drive of the locomotive. Transport Engineering. 2024;9:47-57.

Информация об авторах:

Космодамианский Андрей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (МИИТ).

Пугачев Александр Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета.

Kosmodamiansky Andrey Sergeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Traction Rolling Stock at the Russian University of Transport (MIIT).

Pugachev Alexander Anatolyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Turbine Construction, Electrical and Thermal Power Engineering, Bryansk State Technical University.

Воробьев Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета.

Измеров Олег Васильевич – соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета.

Карпов Артем Евгеньевич – ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (МИИТ).

Vorobyov Vladimir Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University.

Izmerov Oleg Vasilyevich – Competitor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University.

Karpov Artem Evgenyevich – Assistant Lecturer of the Department of Traction Rolling Stock at the Russian University of Transport (MIIT).

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена после рецензирования 29.01.2025; принята к публикации 30.01.2025. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 09.01.2025; approved after review on 29.01.2025; accepted for publication on 30.01.2025. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.