

КОНЦЕПЦИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ ЛОКОМОТИВА

Рассмотрен вопрос и выявлена необходимость создания концепции энергосберегающей экипажной части локомотива. Предложены формулировка концепции и основные требования. В качестве примера реализации концепции рекомендовано использовать в экипажной части двухосные тележки с диаметром колеса 1250 мм.

Ключевые слова: локомотивная тяга, сцепление колеса с рельсом, противобоксовочные устройства, тяговый привод локомотива

EDN: NJBTQT



А.С. Космодамианский



В.И. Воробьев

Ранее в [1] авторами была опубликована уточненная и дополненная концепция энергосберегающего тягового привода локомотива. Как следует из [1], практическая реализация данной концепции требует изменения подхода к конструированию экипажной части по двум причинам:

- в конструкции экипажа необходимо предусмотреть возможность установки средств безынерционного управления коэффициентом сцепления;
- для повышения эффективности работы устройств управления коэффициентом сцепления целесообразно

снизить до минимума причины ухудшения сцепления колеса с рельсом, связанные с конструкцией экипажной части.

К настоящему времени авторами опубликован ряд работ (например [2–5] и др.), в которых рассматривается влияние конструкции экипажной части, тягового привода, усилителей сцепления и систем обнаружения боксования на тяговые свойства локомотива. Таким образом, возникает проблема, связанная с необходимостью расширить концепцию энергосберегающего тягового привода, учтя в ней факторы, относящиеся к

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 449 научных работ, в том числе 29 монографий, одного учебника и 28 учебных пособий. Имеет 130 патентов РФ.

Воробьев Владимир Иванович, кандидат технических наук, 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 14 монографий. Имеет 87 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 89 научных работ, в том числе 23 монографий и десяти учебников. Имеет 96 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 22 научных работ, в том числе одного учебного пособия. Имеет 17 патентов РФ.

конструкции тележек локомотива, рессорного подвешивания, опорно-возвращающих устройств, устройств передачи тяги, иными словами — перейти к концепции энергосберегающей экипажной части локомотива. Предлагаемая статья представляет собой попытку решения данной проблемы.

Анализ проблемы

Возможность реализации коэффициентов сцепления, существенно превышающих современные расчетные, была обнаружена еще в прошлом веке. Так, в [6] для электрической тяги указан коэффициент сцепления в зависимости от состояния рельсов от 0,15 до 0,3, при этом утверждается, что при применении песка он повышается до 0,5. Согласно «Electrical Railway Handbook» [7] на сухих рельсах с песком электровозы реализуют коэффициент сцепления, равный 0,35...0,4, при этом в североамериканской практике проектирования электровозов принимается расчетный коэффициент сцепления 0,33. С другой стороны, проф. В.Б. Медель в [8] указывал, что средние значения коэффициента сцепления по Сталинской железной дороге при скорости 31...34 км/ч составляли всего 0,22...0,24, что соответствовало расчетным значениям коэффициентов тяги перспективных тепловозов 80-х годов.

Также В.Б. Меделем в [8] были рассмотрены вопросы зависимости коэффициента сцепления от угла набегания колеса на рельс в кривых, от наличия динамического момента в тяговом приводе, сочленения колесных пар и перераспределения нагрузок на ось в режиме тяги. Таким образом, в нашей стране было положено начало комплексному подходу к обеспечению сцепления колес с рельсом, учитывающему как изменение состояния поверхности контакта, так и конструкцию экипажной части.

Однако в 30-х-50-х годах XX в., с одной стороны, существовали большие резервы повышения тяговых свойств локомотива в электрической и тепловозной тяге с одной стороны за счет увеличения числа секций локомотива, с другой стороны — сила тяги в расчетном режиме, приходящаяся на одну ось, была ограничена мощностью тяговых электродвигателей (ТЭД), вписываемых в габариты тележки при данном диаметре колеса. По этой причине, а также в связи с развитием специализации прикладных исследований, в дальнейшем исследования различных конструктивных факторов, влияющих на коэффициент сцепления, проводились в небольших объемах по отношению к исследованиям сцепных свойств серийных локомотивов и противобоксочных систем, а в ряде случаев явление увеличения или уменьшения сцепления по вновь обнаруженным причинам регистрировалось,

но не получало достаточного научного объяснения, позволяющего его прогнозировать для различных условий эксплуатации и использовать на практике.

В течение 50–80-х годов XX в. в нашей стране планировалось повышение осевой нагрузки грузовых локомотивов в полтора раза (с 200 до 300 кН), однако решение этого вопроса затормозилось из-за недостаточных темпов реконструкции пути и наличия к середине 80-х годов значительной протяженности участков с рельсами Р50 на деревянных шпалах. При этом увеличение числа секций грузового локомотива более трех также получило ограниченное развитие (было выпущено 25 тепловозов 4ТЭ10С), вследствие чего повысилась актуальность работы по повышению сцепных свойств.

Возможности повышения сцепных свойств локомотива за счет совершенствования конструкции тележки проводились в основном по следующим направлениям.

Улучшение статического распределения нагрузки по осям локомотива при реализации силы тяги.

В качестве используемых мер применялись пневматические догрузатели, одностороннее расположение ТЭД, низко опущенные шкворни, пневматические догрузатели и наклонные тяги для передачи продольных усилий с тележки на кузов. Исследованиями [9] установлено, что для распространенной трехосной тележки грузовых тепловозов неравномерность статической нагрузки по сравнению с серийным вариантом может быть уменьшена на 11% при использовании сбалансированного рессорного подвешивания и жестких опор кузова на тележку.

Снижение динамических моментов в приводе и динамической разгрузки колесной пары при колебаниях неподдресоренных масс.

Данную меру пытались реализовать за счет внедрения опорно-рамного привода и упругих зубчатых колес в опорно-осевом тяговом приводе. Так, согласно [10], ожидалось, что внедрение на электровозах опорно-рамного тягового привода позволит повысить сцепные свойства локомотива на 12–15%.

Применение группового тягового привода.

Тепловозы с гидropередачей и групповым приводом реализовывали расчетный коэффициент сцепления 0,29...0,32 (например, ТГМЗ, ТГМ4). Был предпринят ряд попыток создания группового привода для электровозов и тепловозов с электропередачей [11], из них три доведены до постройки опытных экземпляров (электровозы ВЛ40 и ВЛ83, маневровый тепловоз ТЭМ12). Направление в то время не получило развития из-за технологических трудностей создания группового привода большой мощности, а также вследствие предпо-

ложения, что создание асинхронного тягового привода позволит осуществить так называемое «электрическое спаривание» ТЭД.

В тот же период активно велся поиск методов увеличения коэффициента сцепления колеса с рельсом различными способами [12]. Данный поиск производился в отрыве от вопросов конструкции экипажной части локомотива, поскольку на железной дороге шел процесс реконструкции тяги и задачей промышленности было максимальное расширение производства локомотивов новых типов, тепловозов и электровозов, а дополнительные изменения конструкции экипажной части могли замедлить этот процесс. В итоге основным средством повышения коэффициента сцепления осталось применение песка, как наиболее простого и дешевого способа, практически не менявшегося со времен паровой тяги, несмотря на его недостатки (загрязнение балласта, увеличение износа колес и рельс и др.).

В частности, в этот период в нашей стране было обнаружено влияние электрического тока на коэффициент сцепления колес с рельсами [12], а также делались попытки воздействовать на контакт колеса с рельсом с помощью магнитного поля [13–15]. При этом коэффициент сцепления, реализованный экспериментально, достигал величин 0,45...0,5. Однако, ввиду отсутствия достаточного теоретического исследования данных явлений, при использовании магнитного поля не удалось получить устойчивый результат. Так, если в 1951 году паровоз СО17-2877 с электромагнитными усилителями сцепления реализовал коэффициент сцепления 0,42...0,44 и провел поезд увеличенного веса [13], то исследования тепловоза ТЭМ2УС-0001 не выявили существенного повышения сцепных свойств [15], при этом в обоих случаях было установлено, что увеличение нагрузки на ось вследствие магнитного притяжения незначительно. Что касается электрического тока, то попытки использовать для достижения эффекта тяговый ток (чтобы не вносить изменения в экипажную часть) оказались неэффективны, поскольку достаточная величина тягового тока достигалась только на электровозах постоянного тока, а изменение тягового тока не совпадает с потребностью в усилении сцепных свойств при ухудшении условий сцепления.

В начале нынешнего века оживление грузоперевозок снова привело к необходимости существенного повышения тягово-сцепных свойств локомотивов, при этом основным направлением стало внедрение поосного регулирования тяги и применение бесколлекторных ТЭД, что было вызвано в первую очередь использованием бесколлекторных ТЭД в локомотивах ведущих мировых фирм (GE, GM, Siemens, Alstom, Bombardier и других) и развитием партнерства рос-

сийских производителей с этими фирмами. Работа над улучшением сцепных свойств локомотива за счет свойств экипажной части фактически была приостановлена: созданная в АО «ВНИКТИ» тепловозная тележка с радиальной установкой колесных пар была применена только на тепловозе 2ТЭ25А, выпущенном ограниченной серией, и произошел отказ от применения тяговых приводов с упругим звеном (на тепловозах 2ТЭ25К с коллекторными ТЭД после перехода на моторно-осевые подшипники качения начали применять жесткое зубчатое колесо [11], а для электровозов с бесколлекторными ТЭД, созданными в сотрудничестве с фирмой Siemens, применен интегрированный тяговый привод без упругого звена). В итоге расчетный коэффициент силы тяги отечественных локомотивов с асинхронными ТЭД и поосным регулированием составил $\psi = 0,27...0,32$. Иными словами, современные локомотивы с асинхронным приводом показывают те же сцепные свойства, что и более ста лет назад, и именно это является в настоящее время основным препятствием к повышению их производительности.

С другой стороны, в данный период в нашей стране активно велись исследования влияния электрического тока и магнитного поля на коэффициент сцепления. Так, Делюсто Л.Г. в ходе исследований прокатки металла объяснил увеличение коэффициента сцепления при воздействии магнитного поля явлением магнитоупругости [16], при этом в лабораторных опытах был достигнут коэффициент трения пары «сталь по стали», равный 0,571. В ходе лабораторных и стендовых экспериментов, проведенных в БГТУ [17;18], было доказано, что при воздействии электрического тока коэффициент трения между колесом и рельсом может достигать 0,512, при этом наблюдаемое явление объяснялось эффектом электроупругости; при воздействии магнитного поля было доказано, что коэффициент трения может быть повышен на 22%.

В результате натурных испытаний на тепловозе 2ТЭ10У [19] при воздействии на поверхность контакта колеса с рельсом электрического тока при сухих и чистых рельсах был достигнут коэффициент сцепления 0,55, при влажных — около 0,43; при влажных с наличием масла — около 0,3 и, наконец, при замасленных — несколько выше 0,2. Проведение натурных испытаний магнитных усилителей сцепления было связано с дополнительными трудностями, поскольку экипажная часть эксплуатируемых локомотивов ограничивает возможность оборудования их на время эксперимента обмотками индуктора, в результате чего для опытов пришлось использовать индуктор в виде линейного сердечника, расположенного между рельсами [20], что ограничивало возможности повышения напряженности поля. При этом увеличение силы тяги для рельсов,

смоченных водой с мазутом, оказалось выше, чем для сухих рельсов и составило 8...10% [21].

Таким образом, в начале нынешнего века попытки повышения тягово-сцепных свойств локомотива привели к следующим важным выводам:

- применение бесколлекторных ТЭД и поосного регулирования силы тяги не позволяют реализовать более высокие сцепные свойства локомотивов, чем у локомотивов с групповым приводом, что ограничивает дальнейшее повышение производительности локомотивов;

- использование физических эффектов (электрического тока и магнитного поля) позволяет обеспечить дальнейшее повышение сцепных свойств локомотивов примерно в полтора раза и реализовать безынерционное регулирование коэффициента сцепления, однако внедрению этих способов препятствует существующая конструкция экипажной части локомотивов и принципы построения противобоксочных систем, задачей которых является снижение силы тяги при ухудшении сцепных свойств, а не регулирование самих сцепных свойств;

- проектирование узлов экипажной части локомотива лишь частично учитывает задачи обеспечения высоких тягово-сцепных свойств (в основном обязательным условием является достижение нормативных показателей использования сцепного веса), а в зарубежной практике выбор рациональной конструкции узлов может идти в ущерб сцепным свойствам (применение опорно-осевого привода без упругих звеньев в валопроводах).

В 2014 году на основании данных выводов авторами была предложена концепция энергосберегающего тягового привода [22], суть которой заключалась в следующем: механическая система тягового привода, система предупреждения боксования и юза и устройства усиления сцепления из независимых превращаются в единую интегрированную систему, элементы которой взаимосвязаны друг с другом и взаимообуславливают рациональный выбор решений друг друга.

Первоначально в [22] в качестве практического примера реализации данной концепции были предложены решения на базе моно моторного тягового привода двухосной тележки. Проведенные авторами в течение последующих 10 лет исследования возможности практической реализации данной концепции применительно к индивидуальным тяговым приводам привели к выводам, высказанным в [1], о необходимости создания, помимо концепции энергосберегающего тягового привода, также концепции экипажной части. Как показывает приведенный выше анализ, часть современных требований к экипажной части уже соответствует принципу энергосбережения.

В соответствии с методами технической инновационики [23], рассмотрим основные конструктивные факторы, которые могут быть использованы в качестве средства управления. Для этого авторами предложена модифицированная классификация способов улучшения сцепных свойств путем изменения конструкции экипажной части (рис. 1).

В отличие от классификации, ранее опубликованной в [24], где рассматривались все значимые факторы, в классификацию рис. 1 включены те из значимых факторов, на которые конструктор может влиять путем выбора того или иного решения в процессе работы над проектом, регулируя тем самым получаемые тягово-сцепные свойства. Это изменение нагрузки на ось, динамического момента в приводе, изменение скольжения (за счет кинематических факторов), изменение коэффициента сцепления между колесом и рельсом за счет изменения состояния поверхностей контакта и перераспределение крутящего момента между осями экипажа. Другое отличие от классификации [24] состоит в том, что в классификацию рис. 1 включены перспективные способы управления коэффициентом сцепления и требования к экипажной части, которые должны быть реализованы. Таким образом, предложенная классификация ориентирована на использование ее конструкторами при проектировании экипажа локомотива.

Из данной классификации следует, что в перспективных конструкциях локомотивов имеются следующие возможности повышения сцепных свойств:

1. Применение сбалансированного рессорного подвешивания в тележках грузовых и маневровых тепловозов. Для магистральных грузовых тепловозов сбалансированное подвешивание используется только для тележек опытного тепловоза 2ТЭ35А, в то время как несбалансированное подвешивание имеет трехосная бесчелюстная тележка, применяемая на подавляющем большинстве выпускаемых и эксплуатируемых грузовых и маневровых тепловозов, трехосная тележка маневрового тепловоза ЧМЭЗ и двухосная тележка нового маневрового тепловоза ТЭМ23. Также несбалансированное буксовое подвешивание предполагается применить на дизельных секциях создаваемого тепловоза 2ТЭ30А (3ТЭ30Г).

2. Снижение неподрессоренной массы. В настоящее время в качестве показателя неподрессоренной массы используется так называемая неподрессоренная нагрузка от колеса на рельс ([24], таблица А.7), которая, по определению, не учитывает инерцию вращающихся масс. Так, согласно [24], таблица А.7 для тепловоза 2ТЭ116К неподрессоренная нагрузка составляет 2230 кг на колесо или 4460 кг на ось, что примерно соответствует в [9] показателю «необдрессоренная

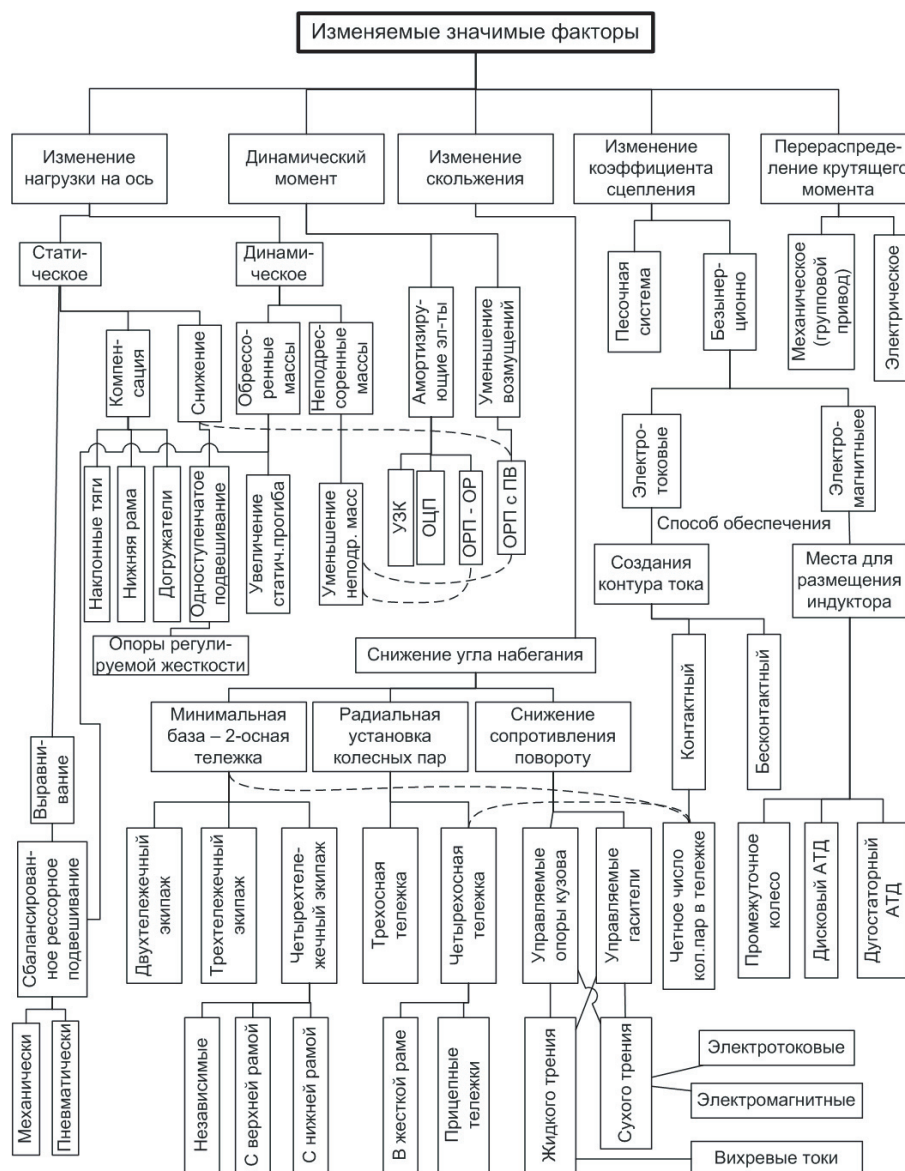


Рис. 1. Классификация способов улучшения сцепных свойств путем изменения конструкции экипажной части с учетом использования устройств безынерционного регулирования

масса» для тепловоза 2ТЭ116, равному 4250 кг на ось ([9], с. 6, табл. 1). Однако в ([9], С. 47) для опорно-осевого привода с жестким зубчатым колесом предлагается учитывать моменты инерции статора и ротора ТЭД, рассчитывая так называемую приведенную неподрессоренную массу по формуле

$$m_{np} = m_n + \frac{[I_c + I_p(1+i)^2]}{c^2}, \quad (1)$$

где m_n — неподрессоренная масса (без учета моментов инерции вращающихся частей); I_c — момент инерции

статора; I_p — момент инерции ротора; i — передаточное число тяговой передачи; c — длина от середины оси колесной пары до точки подвешивания ТЭД к раме тележки.

Согласно [9], приведенная неподрессоренная масса тепловоза 2ТЭ116 больше на 1300 кг, то есть, она равна 5550 кг. Соответственно, приведенная неподрессоренная масса (то есть участвующая в колебаниях при прохождении неровностей пути) грузовых электровозов как с коллекторными, так и с асинхронными ТЭД также существенно выше показателей, указанных в [24].

3. Снижение динамических моментов в тяговом приводе. Отказ от применения для грузовых тепловозов и электровозов тяговых приводов с упругим звеном в валопроводах (либо приводов с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и редуктора) фактически привел к возврату ситуации 60-х годов, когда динамические моменты при движении в расчетном режиме были сопоставимы с тяговыми (ранее этот вопрос уже был рассмотрен авторами, например, в [25]).

4. Уменьшение поперечного скольжения колесных пар путем снижения угла набегания колеса на рельс в кривых. Ухудшение тяговых условий из-за большой базы тележки в первую очередь актуально в условиях Восточного полигона, где кривые радиусом менее 650 м составляют 40 %, а менее 350 м — 56 % от общесетевых значений [26], для серийных тепловозов 2ТЭ25К (КМ) и для перспективного тепловоза 3ТЭ30Г, на которых применяются трехосные тележки.

Что же касается возможности применения усилителей сцепления, то основной проблемой их реализации на выпускаемых и перспективных тепловозах является организация независимых контуров тока для электро-токовых усилителей и размещение индукторов для электромагнитных усилителей.

Из проведенного анализа следует, что для эффективного применения энергосберегающего тягового привода необходимы изменения в его технической надсистеме, пересмотр подхода к проектированию экипажной части новых локомотивов, иными словами, принятие новой концепции проектирования, которую авторы предлагают назвать концепцией энергосберегающей экипажной части.

Предлагаемые решения

В соответствии с изложенным выше, авторы предлагают сформулировать концепцию энергосберегающей экипажной части локомотива следующим образом.

Энергосберегающая экипажная часть локомотива — экипажная часть локомотива, при конструировании которой рациональный выбор технических решений производится из условия обеспечения наибольшей эффективности применения энергосберегающего тягового привода, а именно:

- сведения к минимуму влияния факторов, ухудшающих сцепление колеса с рельсом во время движения локомотива в расчетном режиме тяги;
- создания условий для установки и функционирования устройств, обеспечивающих безынерционное регулирование коэффициента сцепления колеса с рельсом.

В свою очередь, сведение к минимуму влияния факторов, ухудшающих сцепление, может быть реализовано следующими мерами, дополнительными к

уже используемым в конструкции современных локомотивов.

Статическая определяемость буксовой ступени рессорного подвешивания.

Данное условие автоматически реализуется в случае, если экипажная часть состоит из двухосных тележек, имеющих двухступенчатое рессорное подвешивание или шарнирно опирающихся на промежуточную раму. Передача тягового усилия в данном случае может быть осуществлена с помощью низкорасположенного шкворня или наклонных тяг.

Что касается трех- четырехосных тележек, то, в связи с распространением в последнее время одноповодковых букс имеет смысл обеспечивать статическую определяемость буксовой ступени за счет пневмопружинного рессорного подвешивания, подобного примененному в опытном порядке на тепловозе 2ТЭ116 [9].

Снижение поперечной составляющей скольжения колеса по рельсу.

Данное условие реализуется либо в случае экипажной части, состоящей из двухосных тележек, имеющих минимальную базу, либо путем использования трех- и четырехосных тележек с радиальной установкой колесных пар (применение одноосных тележек в данной статье авторами не рассматривается в связи с меньшей изученностью данного типа экипажной части).

Другой мерой снижения поперечной составляющей скольжения может служить использование опор кузова на тележку и поперечных связей кузова с тележкой с регулируемыми упруго-диссипативными свойствами. Данный вопрос был подробно рассмотрен авторами в [4].

Снижение неподдрессоренной массы и динамических моментов в тяговом приводе.

Для локомотивов с диаметром колеса 1250 мм может быть достигнуто как за счет применения опорно-рамных тяговых приводов, так и опорно-осевого тягового привода агрегатной схемы, имеющего упругое звено [27].

Основным условием размещения электротокowych усилителей сцепления является удобство создания контуров тока, изолированных от остальных частей локомотива. Очевидно, что в ближайшую перспективу наиболее простым и надежным способом создания таких контуров является контактный, при этом, для исключения использования контактных роликов, контур тока должен создаваться между соседними колесными парами. Наилучшими вариантами экипажной части в этом случае является экипаж, состоящий либо из двухосных тележек, либо из четырехосных в жесткой раме и имеющих радиальную установку крайних колесных пар. При этом шестиосная секция может быть реали-

зована за счет использования трех двухосных тележек. Изоляция колесной пары от остальных узлов экипажа может быть достигнута как при опорно-рамном приводе, так и при опорно-осевом агрегатного типа, при использовании подвески ТЭД с резинометаллическими шарнирами.

Размещение электромагнитных усилителей сцепления требует дополнительного пространства, при этом для снижения веса конструкции целесообразно использовать в качестве сердечника индуктора самих элементы экипажной части локомотива. Очевидно, что секторное расположение индуктора на колесных центрах, как это было сделано на тепловозе ТЭМ2УС-0001, нерационально в связи с возникновением вихревых токов во вращающихся бандажах колесных центров, что будет особенно существенным для магистральных тепловозов и электровозов. Поскольку деталью колесной пары, имеющей минимальную окружную скорость, является ось, то, из соображения минимальных потерь, целесообразно обмотку индуктора располагать именно на оси. На рис. 2,а,б,в показаны наиболее реализуемые из возможных вариантов размещения обмотки в тяговом приводе.

Варианты (рис. 2,а и рис. 2,б) наиболее подходят для экипажной части с колесами диаметром 1250 мм.

На рис. 2,а изображен опорно-рамный тяговый привод с осевым редуктором, имеющим промежуточное зубчатое колесо, что позволяет увеличить расстояние между статором ТЭД и осью колесной пары и в полученном промежутке разместить катушку индуктора. Известно, что в опорно-осевом приводе с консольным расположением малого зубчатого колеса применение промежуточного зубчатого колеса вызвало значительные проблемы [11], поскольку опорный подшипник промежуточного зубчатого колеса требовалось разместить внутри ступицы зубчатого колеса. В варианте с осевым редуктором подшипниковые опоры промежуточного зубчатого колеса могут быть размещены на корпусе редуктора, а размеры промежуточного зубчатого колеса могут быть больше, чем малого колеса. Это позволяет обеспечить достаточную надежность и долговечность зубчатой передачи. При этом наличие компенсирующего механизма с торсионным валом обеспечивает амортизацию ударных нагрузок при проезде неровностей пути и снижает тем самым динамические моменты в приводе. Обмотка индуктора может быть подвешена к раме тележки, при этом ось имеет возможности вертикального перемещения при колебаниях буксовой ступени рессорного подвешивания, за счет выполнения обмотки индуктора овальной; таким образом, в данном варианте обмотка индуктора не увеличивает неподдресоренную массу экипажа, которая составит около 4,5 т на ось. Данный вариант не вызы-

вает технологических трудностей в изготовлении и не требует дополнительных исследований.

Использование в качестве тягового электродвигателя машины с осевым магнитным потоком позволяет уменьшить осевой габарит корпуса тягового электродвигателя с 940 до 530 мм [28]. Это позволяет при сохранении опорно-осевого подвешивания ТЭД разместить обмотки индуктора с обеих сторон статора ТЭД (рис. 2,б).

Достоинством варианта рис. 2,б является отсутствие промежуточных колес в тяговом передаточном механизме и, следовательно, более высокий КПД передачи, при этом увеличивается долговечность тяговой передачи за счет увеличения размеров малого зубчатого колеса (из-за уменьшения частоты вращения ТЭД с дисковым ротором при более высоком крутящем моменте), а также повышается долговечность передаточного механизма, который компенсирует только монтажные несоосности и снижаются динамические моменты, поскольку подвеска расположена дальше от оси ТЭД. С другой стороны, такой привод имеет более высокую неподдресоренную массу, а технология изготовления ТЭД с осевым магнитным потоком пока не отработана производством. На данную конструкцию, предложенную авторами, получен ряд патентов, например [29].

Для локомотивов с диаметром колеса 1050 мм дополнительное место для размещения обмотки индуктора на оси можно найти только за счет выполнения статора ТЭД незамкнутым, что возможно при использовании дугостаторных тяговых электродвигателей (рис. 2,в). Возможность использования дугостаторных асинхронных двигателей (ДАД) в качестве тяговых ранее была обоснована в [30]. Авторами предложен ряд конструкций подобного привода и получены патенты, например [31]. Основным недостатком данного варианта состоит в недостаточном опыте использования ДАД в качестве тяговых двигателей локомотива и недостаточном исследовании влияния магнитного поля, создаваемого обмоткой индуктора, на токи в короткозамкнутой обмотке ротора.

На основании изложенного можно сделать вывод, что концепция энергосберегающей экипажной части может быть реализована в виде различных вариантов конструкций. При этом основной сложностью в реализации является недостаточная изученность эффективности применения электротокowych и электромагнитных усилителей сцепления для разных типов локомотивов, что не позволяет в процессе проектирования априори сделать выбор между тем или иным типом усилителя сцепления. Наконец, пока нельзя исключать, что наиболее эффективным вариантом может оказаться одновременное оборудование локомотива электротокowymi и электромагнитными усилителями сцепления, для

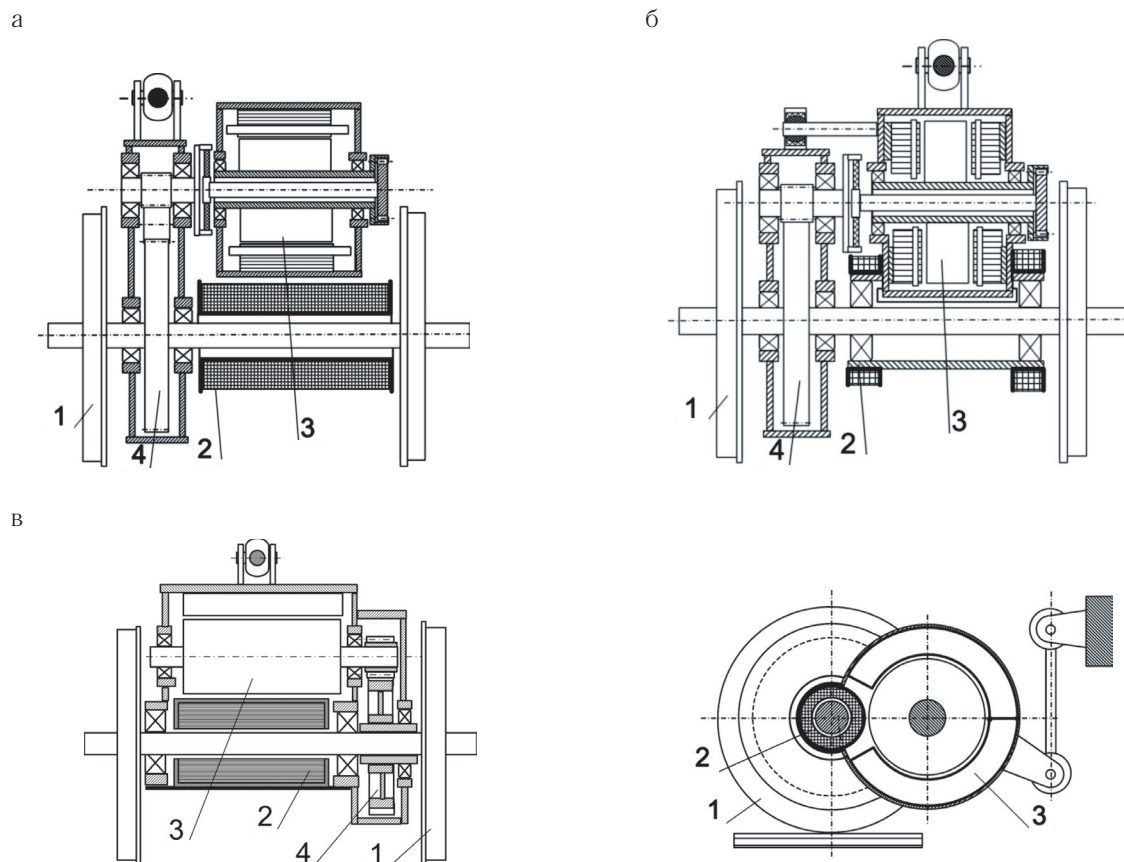


Рис. 2. Варианты размещения обмоток индуктора при индивидуальном приводе: а – опорно-рамный привод с осевым редуктором и промежуточным колесом; б – привод с тяговым электродвигателем с осевым магнитным потоком; в – привод с дугогасительным двигателем; 1 – колесная пара; 2 – обмотка индуктора; 3 – тяговый электродвигатель; 4 – редуктор (тяговая передача).

их совместного воздействия на поверхность контакта колеса и рельса, либо действия каждого из них в условиях, наиболее для них благоприятных. Можно сделать вывод, что энергосберегающая экипажная часть на ранних стадиях внедрения должна удовлетворять условиям размещения на ней как электротокowych, так и электромагнитных усилителей сцепления, либо и тех и других.

В связи с этим в качестве рациональной конструкции энергосберегающей экипажной части в начальный период внедрения авторы предлагают использовать двухосные тележки с диаметром колеса 1250 мм, на которых могут быть реализованы перечисленные выше условия. Кроме того, в отечественной практике имеется большой опыт создания таких тележек для магистральных электровозов. На рис. 3 в качестве примера приведен возможный вариант подобной экипажной части для тепловоза ЗТЭ30Г.

Поскольку дизельная секция тепловоза ЗТЭ30Г без танкерного модуля должна перемещаться самостоятельно в основном по депоовским путям, на ней можно оставить только небольшой запас дизельного топлива в баках, размещаемых внутри кузова. Двухосные тележки с базой 2900 мм, как у электровоза ЭП1, позволяют использовать опорно-рамный тяговый привод с осевым редуктором, что дает возможность реализовать как электротокowych, так и электромагнитный усилитель сцепления. При этом все восемь тележек тепловоза оказываются унифицированы. Небольшая колесная база позволяет уменьшить поперечное скольжение колесных пар при прохождении крутых кривых, буксовое рессорное подвешивание статически определимо, а упругие звенья передаточных механизмов снижают динамические моменты упругостей пути. Таким образом, предложенное решение удовлетворяет всем перечисленным выше требованиям к энергосберегающей экипажной части локомотива.

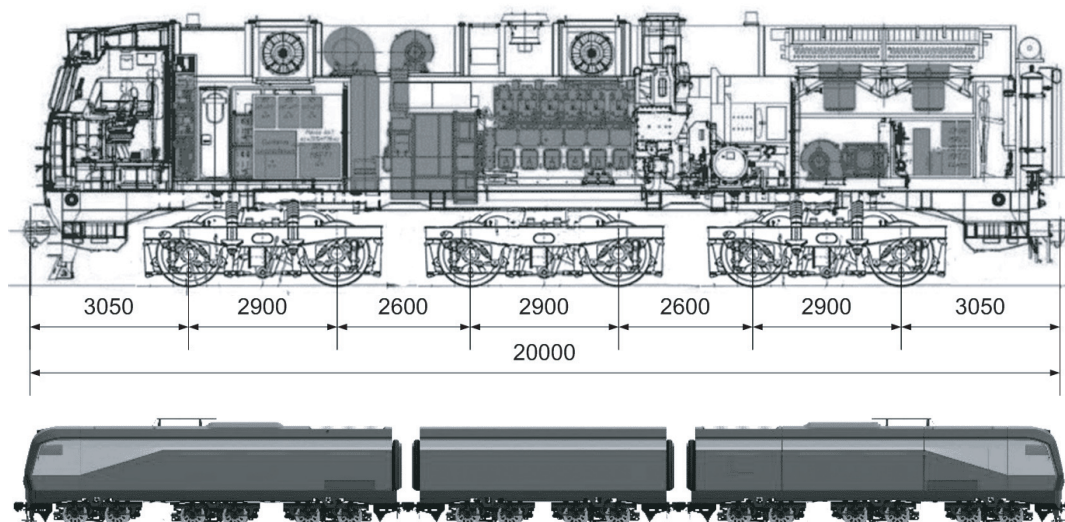


Рис. 3. Пример энергосберегающей экипажной части тепловоза 3ТЭ30Г
(при перенесении запасов топлива на бустерный танкерный модуль)

Выводы

1. Установлено, что развитие концепции энергосберегающего тягового привода привело к необходимости развития надсистемы тягового привода, то есть к необходимости создания концепции энергосберегающей экипажной части локомотива.

2. Предложена формулировка концепции энергосберегающей экипажной части локомотива, как такой экипажной части локомотива, при конструировании которой рациональный выбор технических решений производится из условия обеспечения наибольшей эффективности применения энергосберегающего тягового привода, а именно:

- сведения к минимуму влияния факторов, ухудшающих сцепление колеса с рельсом во время движения локомотива в расчетном режиме тяги;
- создания условий для установки и функционирования устройств, обеспечивающих безынерционное регулирование коэффициента сцепления колеса с рельсом.

3. В качестве основных требований к энергосберегающей экипажной части локомотива предложены:

- статическая определимость буксовой ступени ресорного подвешивания;

- снижение поперечной составляющей скольжения колеса по рельсу;

- снижение неподрессоренной массы и динамических моментов в тяговом приводе;

- удобство размещения электротоковых и электромагнитных усилителей сцепления.

4. Для снижения потерь от вихревых токов при использовании электромагнитных усилителей сцепления предложено размещать обмотку индуктора на оси колесной пары с использованием следующих возможных компоновочных решений:

- применения опорно-рамного тягового привода с осевым редуктором, имеющим промежуточное зубчатое колесо;
- применения агрегатного опорно-осевого тягового привода с тяговым двигателем, имеющим осевой магнитный поток;
- применения дугостаторного асинхронного двигателя с незамкнутым ротором.

5. В качестве примера реализации концепции энергосберегающей экипажной части предложено использовать в экипажной части двухосные тележки с диаметром колеса 1250 мм.

6. По теме статьи авторами получены два патента на полезные модели.



Литература

1. Развитие концепции энергосберегающего тягового привода локомотива / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, А. Е. Карпов. - Текст: непосредственный // Транспортное машиностроение. - 2024. - № 9. - С. 47-57.
2. Сравнение тяговых приводов с опорно-осевым и опорно-рамным подвешиванием двигателя / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. - Текст : непосредственный // Транспортное машиностроение. - 2024. - № 4. - С. 13-25.
3. Анализ возможностей повышения тяговых свойств новых грузовых и маневровых локомотивов / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. - Текст : непосредственный // Транспортное машиностроение. - 2024. - № 9. - С. 38-46.
4. 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.
5. Анализ способов обнаружения боксования локомотива / В. И. Воробьев, С. Н. Злобин, О. В. Измеров, С. О. Копылов, Е. П. Крыгина. - Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2022. - № 6 (356). - С.14 -22.
6. Кизер, Герберт. Электрические дорог/ Герберт Кизер, инж.; пер. с нем. Д. М. Вержбинского, инж.-техн. - Санкт-Петербург : А.С. Суворин, 1909. - 144, III с. - Текст : непосредственный.
7. Electric Railway Handbook. A reference book of practice data, formulas and tables for the use of operators, engineers and students / A.S. Richey // New York, McGraw-Hill book company, Inc. 1915. - 831 с.
8. Медель, В. Б. Электровозная тяга с тяжеловесными составами / В. Б. Медель. - Текст : непосредственный // Труды МЭМИИТ. Вып. 26. - Москва : Трансжелдориздат, 1936. - 32 с.
9. Евстратов А. С. Экипажные части тепловозов / А. С. Евстратов. - Москва : Машиностроение, 1987. - 136 с. - Текст : непосредственный.
10. Калихович, В. Н. Тяговые приводы локомотивов : (Устройство, обслуживание, ремонт) / В. Н. Калихович. - Москва : Транспорт, 1983. - 111 с. - Текст : непосредственный.
11. 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.
12. Рудяков, З. З. Резервы увеличения весовых норм поездов / З. З. Рудяков. - Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. - 1962. - № 2. - С. 28-31.
13. Янсон, О. М. К вопросу электромагнитного способа улучшения условий сцепления колес электровоза с рельсами / О. М. Янсон. - Текст : непосредственный // Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова. Т. XXXII. Вып. 1. - Ленинград, 1954. - С. 66-76.
14. Ананьев, К. А. Шахтный электровоз с электромагнитным тяговым органом / К. А. Ананьев, А. В. Рысьев. - Текст : непосредственный // Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В. Плеханова. Т. LIII. Вып.1. - Ленинград, 1966. - С. 62-65.
15. Ситников, Е. А. Исследования по повышению тяговых свойств маневровых тепловозов путем применения электромагнитного увеличения сцепления и более оптимальных схем соединения тяговых электродвигателей / Е. А. Ситников, И. Н. Родионов, В. П. Гриневич. - Текст : непосредственный // Заключительный отчет по теме «Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по повышению эксплуатационных качеств, надежности и долговечности тепловоза» № И-108-82. - Коломна : ВНИКТИ, 1982. - 83 с.
16. Делюсто, Л. Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях / Л. Г. Делюсто. - Москва : Машиностроение, 2005. - 272 с. - ISBN 5-217-03307-X. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/734> (дата обращения: 10.03.2025). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
17. Моделирование сцепления колеса с рельсом : монография / В. П. Тихомиров, В. И. Воробьев, Д. В. Воробьев, Г. В. Багров, М. И. Борзенков, И. А. Бутрин. - Орел : Изд-во ОрелГТУ, 2007. - 126 с. - Текст : непосредственный.

18. Ивахин, А. И. Стенд для исследования тяговых свойств в системе колесо-рельс железнодорожных транспортных средств / А. И. Ивахин, В. И. Травиничев, Д. И. Петраков. - Текст : непосредственный // Тяжелое машиностроение. - 2011. - № 4. - С. 2-5.
19. Петраков, Д. И. Оценка тяговых качеств тепловозов с электропередачей с учетом воздействия электрического тока на зоны контакта колес с рельсами : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петраков Дмитрий Иванович; Место защиты: Брян. гос. техн. ун-т (БИТМ). - Брянск, 2013. - 18 с. - Текст : непосредственный.
20. Корчагин, В. О. Улучшение тяговых качеств тепловозов воздействием постоянного магнитного поля на контакт трибосистемы колесо-рельс : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Корчагин Вадим Олегович; Место защиты: Рос. ун-т транспорта. - Москва, 2017. - 24 с. - Текст : непосредственный.
21. Улучшение тяговых качеств локомотивов с помощью магнитных усилений сцепления : монография / Д. Я. Антипин, В. И. Воробьев, Д. В. Воробьев [и др.] ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Брянский государственный технический университет. - Брянск : Изд-во БГТУ, 2018. - 231 с. - Текст : непосредственный.
22. Концепция развития энергосберегающих электромеханических систем / А. С. Космодамианский [и др.] ; под ред. А. С. Космодамианского ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Гос. ун-т учебно-научно-произв. комплекс». - Орел : Госуниверситет - УНПК, 2014. - 243 с.
23. Техническая инновационика как научное направление / В. И. Воробьев, М. И. Борзенков, С. Н. Злобин, О. В. Измеров, А. Е. Карпов. - Текст : непосредственный // Материалы международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем». - Орел: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2024. - № 4 (366). - С. 32-40.
24. Методика воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности. - утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706Р. - 53 с. - Текст : непосредственный.
25. Сравнение тяговых приводов с опорно-осевым и опорно-рамным подвешиванием двигателя / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. - Текст : непосредственный // Транспортное машиностроение. - 2024. - № 4. - С. 13-25.
26. Яновский, А. С. На заседании Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / А. С. Яновский. - Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. - 2021. - № 5. - С. 7-9.
27. 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.
28. Курбасов, А. С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов. - Москва : Транспорт, 1977. - 223 с. - Текст : непосредственный.
29. Патент № 202706 Российская Федерация, МПК В61С 15/08 (2006.01). Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами : 2020132322 : заявлено 01.10.2020 : опубликовано 03.03.2021, бюл. № 7 / Космодамианский А.С., Воробьев В. И., Измеров О.В., Маслов М.А., Корчагин В.О., Стрекалов Н.Н., Капустин М.Ю., Самотканов А.В., Шевченко Д.Н.; Космодамианский Андрей Сергеевич. - 8 с. : ил. - Текст : непосредственный.
30. Варианты реализации и динамические свойства асинхронного тягового привода локомотивов с дуго-статорными электродвигателями / А. И. Ивахин. - Текст : непосредственный // Тяжелое машиностроение. - 2012. - № 10. - С. 17-21.
31. Патент № 225101 Российская Федерация МПК В61С 15/08 (2006.01) В61С 9/48 (2006.01). Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами : 2024102710 : заявлено 04.02.2024 : опубликовано 12.04. 2024, бюл. № 11 / Антипин Д. Я., Воробьев В. И., Измеров О. В., Маслов М. А., Копылов С. О., Николаев Е. В., Пугачев А. А ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет» (РУ). - 14 с.: ил. - Текст : непосредственный.