

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИННОВАЦИОНИКА И ПОВЫШЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА

А. С. Космодамианский¹, В. И. Воробьев², О. В. Измеров³, А. Е. Карпов⁴

¹ доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ), г. Москва

² кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» БГТУ, г. Брянск

³ Соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог», БГТУ, г. Брянск

⁴ ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав», заведующий лабораторией «Системы управления транспортными средствами» РУТ (МИИТ), г. Москва

***Аннотация:** Рассмотрен вопрос поиска методики анализа конструкции локомотивов, позволяющей находить рациональные решения. В результате анализа узлов тягового привода зарубежных локомотивов с использованием методов технической инновационики выявлены недостатки, приводящие к ухудшению технологичности ремонта. Предложены новые конструкции тягового привода локомотивов и его узлов, обеспечивающие более высокую ремонтпригодность по сравнению с известными зарубежными аналогами. Предложено использовать методы технической инновационики для поиска мер снижения расходов на ремонт локомотивов.*

Авторами получено 5 патентов на полезные модели и подана заявка на получение патента.

***Ключевые слова:** теория конструирования, изобретательское творчество, инженерный эксперимент, кибернетика, прогнозирование, математическое моделирование, локомотивы, моторвагонный подвижной состав.*

Введение

Расширение использования агрегатного ремонта локомотивов и фирменного сервиса, с одной стороны, позволяет повысить качество ремонта в целом и сократить издержки на содержание и развитие основных фондов в виде производственных мощностей ремонтно-обслуживающих предприятий, находящихся в составе ОАО «РЖД». С другой стороны, это усиливает зависимость эксплуатационных служб железных дорог от производителей локомотивов и затрудняет импортозамещение, учитывая, что в эксплуатации

находится значительное количество локомотивов, созданных в сотрудничестве с зарубежными фирмами, в конструкции которых были использованы импортные узлы. Так, к настоящему времени было выпущено около 500 секций электровозов 2ЭС7 и 2ЭС10, в которых использован тяговый привод с использованием комплектующих изделий фирмы Siemens. Таким образом, изменение технологии и организации ремонта не снимает задачи повышения технологичности изготовления и ремонта тягового привода.

Обычно технические решения принято выбирать с учетом изучения современных тенденций конструирования в мировой практике. Такой подход применительно к локомотивостроению мог быть рационален в 50-70-х годах прошлого века, когда число предприятий - разработчиков насчитывалось десятками из-за национальной разобщенности рынков. К настоящему времени в мировом локомотивостроении сложилась ситуация, близкая к той, которая 10-20 лет назад возникла в микроэлектронике и производстве программного обеспечения, а именно: технические решения стали определяться политикой нескольких крупных компаний, заинтересованных в невозможности проникновения на рынок новых производителей за счет продвижения таких конструкций, которые технологически сложно воспроизвести конкурентам.

Таким образом, возникает проблема методов выбора вариантов конструкции узлов локомотива (в рассматриваемом случае – тягового привода) применительно к задаче повышения технологичности производства и ремонта его в отечественных условиях. Предлагаемая статья является попыткой решения указанной проблемы.

Анализ проблемы

Поскольку на отечественных ж.д. наиболее распространены грузовые магистральные локомотивы, а интенсивность их работы, рассмотрим примеры современных зарубежных конструкций тягового привода грузовых локомотивов с бесколлекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД).

К настоящему времени для абсолютного большинства грузовых локомотивов зарубежных фирм с бесколлекторными ТЭД применяется опорно-осевой привод (рис.1). Исключение составляет грузовой тепловоз ER20 CF производства фирмы Siemens, в котором применен опорно-рамный привод с осевым редуктором [1].

Рассмотрим выбор технических решений в данных тяговых приводах с точки зрения методов технической инновационики [2...4], то есть, реконструируем логику проектировщика, исходя из решаемых задач и технологических возможностей.

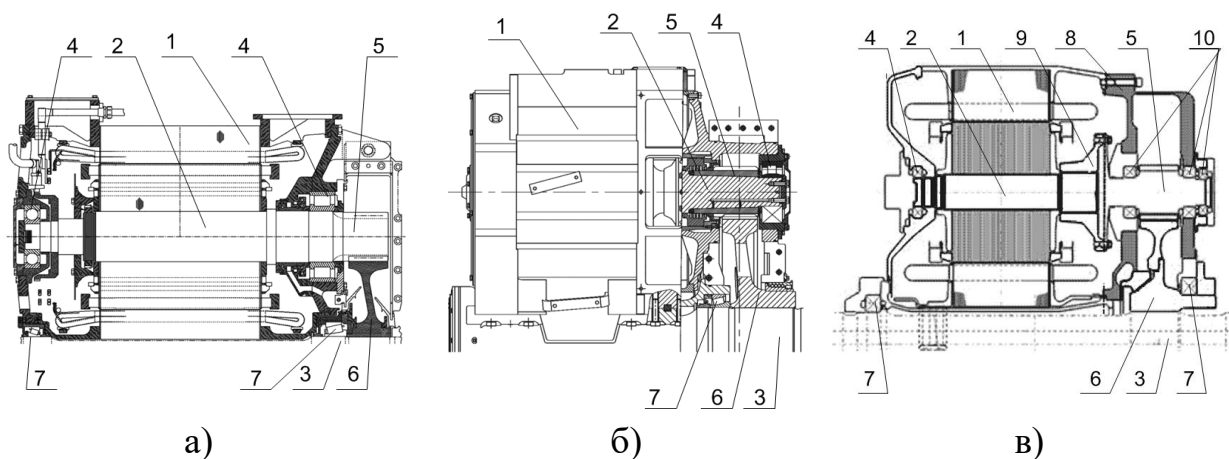


Рисунок 1 – Опорно-осевой привод зарубежных грузовых локомотивов с бесколлекторными тяговыми электродвигателями:

а) тепловоз ТЭЗЗa; б) электровоз БКГ-1; в) электровоз 2ЭВ-120;

1 – ТЭД; 2 – вал ТЭД; 3 – ось колесной пары; 4 – роторный подшипник; 5 – малое зубчатое колесо; 6 – большое зубчатое колесо; 7 – осевой подшипник; 8 – корпус редуктора; 9 – мембранная муфта; 10 – подшипники редуктора.

Общей причиной, послуживших для создания конструкций рис. 1а-в, была необходимость использовать те потенциальные преимущества, которые асинхронный ТЭД, то есть, снижение общей и неподрессоренной массы привода за счет повышения максимального числа оборотов ТЭД. В свою очередь, это требовало повышения передаточного числа тяговой передачи, при этом использование двухступенчатой передачи привело бы не только к усложнению последней, но и к существенному уменьшению осевого габарита ТЭД, а, следовательно, его крутящего момента, что усложняло решение задачи. Таким образом, во всех трех случаях пришлось решать задачу уменьшения диаметра малого зубчатого колеса. При традиционном размещении зубчатого колеса на валу с помощью посадки с гарантированным натягом прочность соединения с натягом получалась заведомо недостаточной, как и прочность хвостовика вала на изгиб.

На рис. 1а изображен привод тепловоза ТЭЗЗa (ES44ACi, разработка компании General Electric, США). Антагонизм свойств (нельзя уменьшать диаметр посадки из-за снижения прочности) в этой конструкции снят тем, что посадка с натягом вообще отсутствует, а зубья нарезаны на самом валу ТЭД. Такой вариант, во-первых, требует изготовления вала из высоколегированной стали, а, во-вторых, существенно снижает ремонтпригодность, поскольку замена изношенного вала-шестерни требует разборки всего двигателя с распрессовкой пакета стали ротора, насаженного на вал без промежуточной гильзы. Восстановление зубьев путем наплавки с последующей механической обработкой, причем в сборе с двигателем, когда канавки для выхода фрезы

находятся под обоймой роторного подшипника, также представляется технологически сложной задачей. Съёмным зубчатое колесо может быть сделано за счет выполнения вала полым и запрессовки хвостовика малого зубчатого колеса внутрь полого вала, как это сделано на электровозе DJ1 китайских производителей, но это возможно при увеличении диаметра малого зубчатого колеса.

В приводе на рис. 1б электровоза БКГ-1 разработки Датунского завода, КНР, совместно с компанией Alstom, Франция, на основе электровоза Alstom Prima 47000, проблема прочности посадки малого зубчатого колеса на вал решена путем увеличения длины ступицы. Чтобы снять антагонизм свойств (нельзя увеличить длину хвостовика из-за ограничения габаритов), роторный подшипник размещен на конце вала, а малое зубчатое колесо – между подшипником и пакетом стали ротора, что позволило существенно увеличить длину посадки и уменьшить толщину зубчатого колеса за счет снижения натяга. Для замены малого зубчатого колеса требуется разборка ТЭД, но без спрессовки пакета ротора с вала.

Приводы на рис. 1а и рис. 1б имеют общий недостаток: усилия от зубчатой передачи в основном приходятся на ближний роторный подшипник, что, в сочетании с увеличением частоты вращения вала ТЭД, создает препятствия для повышения его срока службы. Антагонизм свойств в данном случае состоит в том, что возможность увеличения размеров подшипника для повышения его несущей способности также ограничена по условиям нагрева при повышенной частоте вращения вала. Данный антагонизм свойств был снят в приводе интегрированной компоновки электровоза 2ЭВ-120, разработанном фирмой Bombardier, Канада (рис.1в), за счет того, что малое зубчатое колесо, выполненное в виде вал-шестерни, симметрично опирается на два подшипника, а вал ротора ТЭД опирается на подшипники малого зубчатого колеса через металлическую диафрагменную муфту, имеющую высокую жесткость в радиальном направлении, благодаря чему критическое число оборотов вала значительно выше предельного числа оборотов ТЭД. Аналогичная конструкция применена в тяговом приводе фирмы Siemens, Германия, установленном на электровозах 2ЭС7 и 2ЭС10.

Увеличение срока службы подшипников малого зубчатого колеса для интегрированного привода на рис. 1в достигнуто за счет существенного ухудшения технологичности его изготовления и ремонта, поскольку положение зубчатых колес относительно друг друга в этом случае зависит не только от точности изготовления корпуса редуктора, но и корпуса ТЭД, а также ступицы ведомой шестерни, на которую опирается осевой подшипник со стороны тяговой передачи, при этом базирование производится по поверхностям,

перпендикулярным друг другу, что требует более высокой точности обработки и монтажа.

При этом все три рассмотренные вида тягового привода не имеют упругого звена в валопроводах. Это ведет к росту динамических моментов в приводе и ухудшению сцепления колеса с рельсом, что было отмечено еще в [5,6].

Полагая для упрощения, что при прохождении неровностей пути не происходит скольжения колесной пары по рельсу, зависимость динамического момента на валу тягового электродвигателя ТЭД колес колесной пары от вертикальных ускорений оси колесной пары можно в первом приближении определить на основании [7] следующим образом:

$$M_d = \frac{I_p (i+1)}{c} \ddot{x}_{\text{кп}}; \quad (1)$$

где

$\ddot{x}_{\text{кп}}$ - вертикальные ускорения оси колесной пары в расчетном режиме тяги, м/сек;

c - расстояние между точкой подвеса к раме (точкой поворота КМБ при прохождении вертикальных неровностей) и осью колесной пары, м;

I_p – момент инерции ротора ТЭД, кг/м²;

i - передаточное число тяговой передачи.

Авторами были получены следующие приближенные значения динамического момента:

- для электровоза 2ЭС10 среднеквадратическое значение $M_d=4$ кНм, что составляет примерно 60% от тягового момента двигателя 1ТВ-2822 в расчетном режиме;

- для тепловоза ТЭЗ3а среднемаксимальное значение $M_d = 6,4$ кНм, что соответствует режиму тяги при коэффициенте сцепления $\psi = 0,28$.

Таким образом динамическая составляющая момента при жесткой тяговой передаче приводит как к сокращению срока службы элементов тягового привода, так и к сокращению службы бандажей либо цельнокатаных колес локомотива из-за увеличения скольжения их по рельсам (в [5] указано, что применение упругого зубчатого колеса (УЗК) на отечественных грузовых тепловозах позволило на 15% снизить темпы износа бандажей). В то же время применение упругого звена в виде УЗК в опорно-осевом тяговом приводе имело смысл в условиях, когда данный тип привода, во-первых, имел простую конструкцию, поскольку для замены эластичных элементов УЗК требовалось снимать кожух тяговой передачи, и, во-вторых, когда срок службы тяговой передачи был сопоставим со сроком службы УЗК. Переход на моторно-осевые подшипники (МОП) качения сделал размещение упругих элементов в зубчатом

колесе нерациональным [8], по крайней мере, до значительного увеличения срока службы УЗК.

Из изложенного следует вывод, что рассмотренные конструктивные решения содержат противоречие требований к ним. С точки зрения долговечности подшипников малого зубчатого колеса наиболее предпочтительна конструкция, изображенная на рис. 1в. При этом, для того, чтобы повысить технологичность данной конструкции, необходимо выполнить ТЭД и осевой редуктор отдельными, как это сделано в опорно-рамном приводе с осевым редуктором, однако в то же время ТЭД и осевой редуктор должны быть соединены друг с другом, поскольку размещение упруго-компенсирующего механизма в полом вала ТЭД невозможно из-за необходимости увеличить диаметр вала ротора и внутренний диаметр роторных подшипников, что, в свою очередь, ведет к их перегреву из-за высокой частоты вращения.

Предлагаемые решения

Рассмотрим физический смысл выявленных противоречий требований. Требование «ТЭД и осевой редуктор должны быть соединены друг с другом» означает, что между ними должна быть связь, которая препятствует их перемещению друг относительно друга. Требование «ТЭД и осевой редуктор не должны быть соединены друг с другом» означает, что между ними не должно быть связи. Таким образом, антагонизм свойств данного устройства заключается в том, что физическая связь между ТЭД и осевым редуктором одновременно должна быть и ее не должно быть. На основании этого, мы можем сформулировать функцию связи, как устройства, которое препятствует и не препятствует перемещению относительно друг друга данных узлов. Физически это реализуемо, если связь является гибкой или шарнирной и допускает перемещения ТЭД и осевого редуктора друг относительно друга, компенсируя неточности монтажа, но ТЭД не имеет возможности перемещаться относительно осевого редуктора при колебаниях рамы тележки на рессорах.

Некоторые из вариантов данной конструкции, предложенные авторами, представлены на рис. 2 а-д. В данных вариантах привода осевой редуктор представляет собой отдельный агрегат, что значительно упрощает его изготовление и ремонт по сравнению с приводом рис. 1в. Поскольку при колебаниях наддресорного строения осевой редуктор не перемещается относительно ТЭД, то упругая муфта, соединяющая валы ТЭД и осевого редуктора, компенсирует только небольшие смещения, вызванные неточностью монтажа, и может быть выполнена одинарной. При этом муфта располагается снаружи редуктора, что упрощает ее осмотр и ремонт без разборки редуктора.

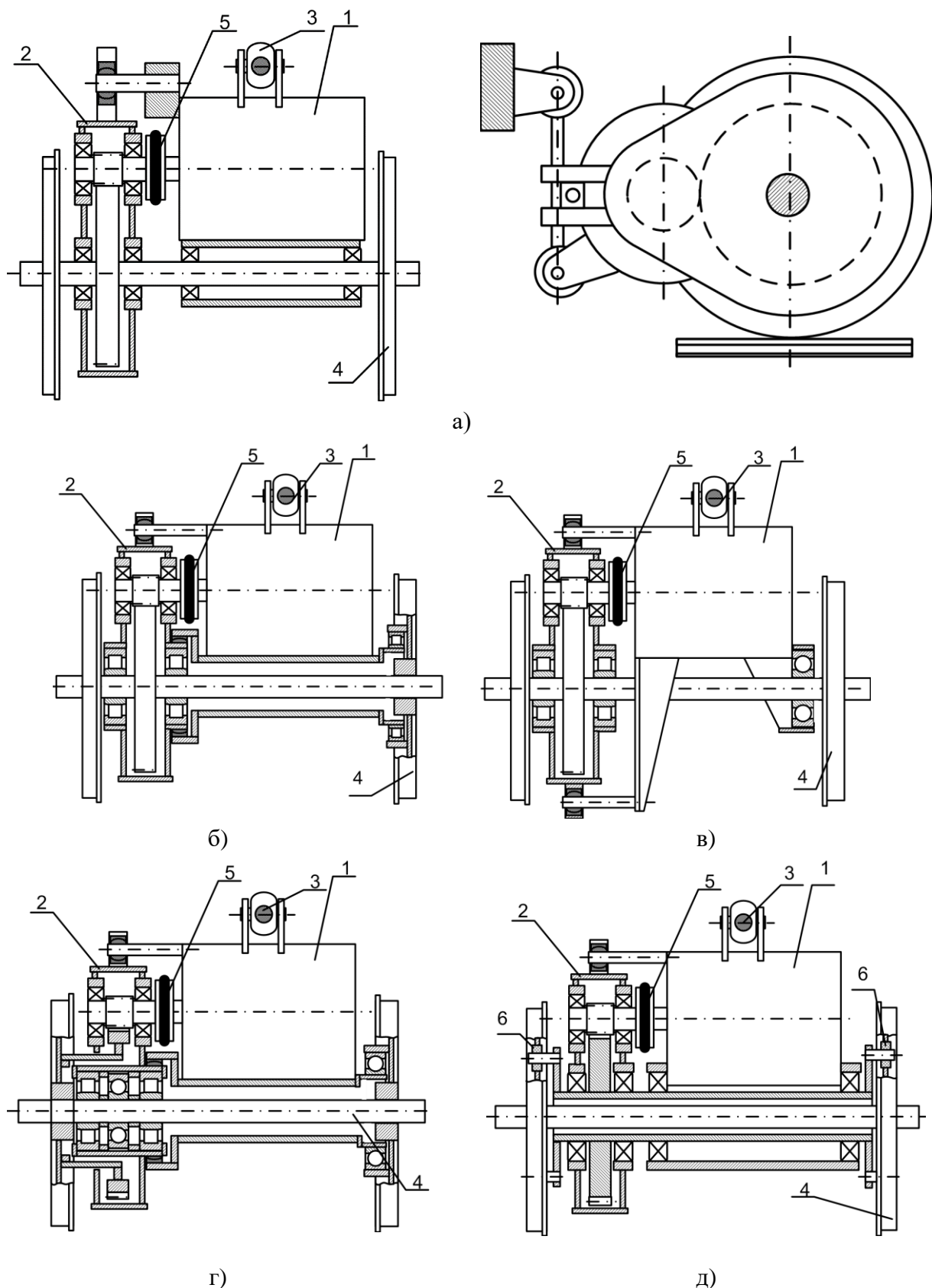


Рисунок 2 - Схемы вариантов агрегатного тягового привода с опиранием ТЭД на осевой редуктор:

- а – с отдельными опорами ТЭД и редуктора; б - с опорой ТЭД через неподвижную трубу; в – с опорой ТЭД через два шарнира; г – с креплением большого зубчатого венца на колесе; д – с упругим опиранием: 1 – ТЭД; 2 – осевой редуктор; 3 – подвеска; 4 – колесная пара; 5 – упругая муфта; 6 – упругие элементы.

Недостатком данной схемы привода, названной авторами агрегатной, является увеличение общего числа подшипников.

Само по себе увеличение числа подшипников не оказывает однозначного влияния на трудоемкость ремонта, кроме увеличения числа объектов, подлежащих диагностике. Распределение нагрузок на большее число подшипниковых узлов позволяет обойтись без использования сложных в регулировке конических подшипников.

В варианте привода рис.2б для возможности увеличения подшипникового узла и сокращения числа подшипников ТЭД расположен на неподвижной трубе, одним концом опирающуюся на подшипник на колесном центре, а другим, через сферическую опору, на корпус осевого редуктора.

В варианте привода рис. 2в для равномерного распределения нагрузки на осевые подшипники редуктора ТЭД опирается на корпус осевого редуктора через шарнирные соединения. В приводе рис. 2г. подшипники размещены на месте ступицы большого зубчатого колеса, что позволяет увеличить их габариты, а на рис. 2д показан пассажирский вариант привода с упругим опиранием на колесную пару.

На предложенные конструкции тяговых приводов авторами получены патенты на полезные модели [9-12].

Создание агрегатного привода в основном сводится к созданию упругой муфты, рассчитанной на работу при частоте вращения порядка 4000 мин^{-1} , поскольку остальные узлы привода к настоящему времени достаточно исследованы. Возможность размещения упруго-компенсирующей муфты в габаритах тягового привода ранее была доказана авторами в [13]. В качестве возможных примеров рассмотрим предложенные авторами конструкции резинометаллической и резинокордной муфт (рис. 3 а, б).

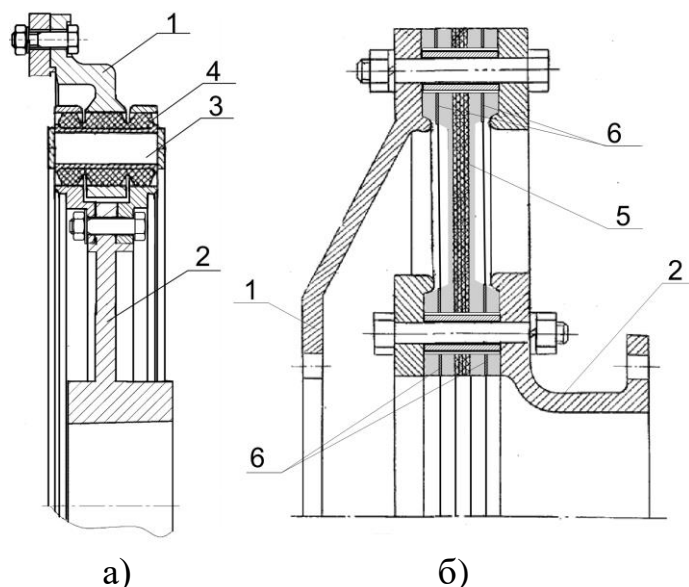


Рисунок 3 - Схемы вариантов муфт для агрегатного привода:

а - резинометаллической; б) резинокордной.

в – с креплением большого зубчатого венца на колесе; г – с упругим опиранием:

1, 2 – фланцы; 3 – втулка; 4 – резиновый элемент; 5 – резинокордная муфта; 6 – плоская арматура.

Основной задачей создания упруго-компенсирующей муфты является снижение поперечной жесткости муфты при сохранении несущей способности. Для этого в резинометаллической муфте (рис.3а) втулки выполнены двойными, работающими последовательно. В резинокордной муфте (рис. 3б) внутри кольцевых выступов размещена промежуточная металлическая арматура, что, при сохранении жесткости на сжатие и усилия прижатия резины к фланцам для обеспечения требуемой силы трения между резиной и фланцами, дает возможность увеличить суммарную толщину резинового слоя и возможность увеличить поперечное смещение валов. На предложенную конструкцию резинометаллической муфты получен патент на полезную модель [14], на конструкцию резинокордной – оформлена заявка на получение патента.

Из изложенного следует, что методы технической инновационики целесообразно использовать для поиска мер снижения расходов на ремонт локомотивов.

Выводы

1. Установлено, что анализ тенденций в мировом локомотивостроении не позволяет определить технические решения узлов локомотива, рациональные с точки зрения снижений затрат на ремонт, вследствие монополизации производства локомотивов. Выявлена необходимость поиска методики анализа конструкции локомотивов, позволяющей находить рациональные решения.

2. Использование для анализа узла тягового привода зарубежных локомотивов методов технической инновационики позволила выявить их недостатки, приводящие к ухудшению технологичности ремонта.

3. Авторами предложен ряд новых конструкций тягового привода локомотивов и его узлов, обеспечивающих более высокую ремонтпригодность по сравнению с известными зарубежными аналогами

4. На предложенные авторами технические решения получены 5 патентов на полезные модели и подана заявка на получение патента.

5. Предлагается использовать методы технической инновационики для поиска мер снижения расходов на ремонт локомотивов.

Список использованных источников

1. Грузовой тепловоз ER20 CF для Литвы // Железные дороги мира, 2009, №5. – с. 17-24.

2. Техническая инновационика. Проектирование конкурентоспособных машин: монография / [О.В. Измеров и др.]; под ред. чл.-кор. Академии электротехн. наук Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А.С. Космодамианского. - Орел: Госуниверситет - УНПК, 2013. - 415 с.
3. Техническая инновационика. Проблемы инженерного анализа технических систем: монография. / [О.В. Измеров и др.]. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013, - 261 с.
4. Техническая инновационика. Рациональный выбор технических решений при проектировании: монография / [О.В. Измеров и др.]; под ред. О.В. Измерова. – Орел: Госуниверситет - УНПК, 2013. – 340 с.
5. 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.
6. Развитие локомотивной тяги. / Н.А. Фуфрянский, А.С. Нестрахов, А.Н. Долганов, Н.Н. Каменев, Э.А. Пахомов; Под ред. Н.А. Фуфрянского и А.И. Бевзенко. – М.: Транспорт, 1982 – 303 с.
7. Конструкция и динамика тепловозов. / В.Н. Иванов, В.В. Иванов, Н.И. Панов, А.П. Третьяков. М., «Транспорт», 1974 – 336 с.
8. Михайлов Г.И. Повышение надежности и несущей способности зубчатых тяговых передач / Г.И. Михайлов. – Казань: Алгоритм+, 2023. – 560 с.
9. Патент на полезную модель № 164797, Российская Федерация, МПК В61С 9/48. Тяговый привод локомотива [Текст] / Воробьев В.И., Измеров О.В., Новиков В.Г., Вдовин А.В., Бондаренко Д.А., Новиков А.С., Воробьев Д.В. Оpubл. 20.09.2016, бюл. № 26.
10. Патент на полезную модель № 189364, Российская Федерация, СПК В61С 15/08 (2013.01). Тяговый привод локомотива. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Космодамианский А.С., Измеров О.В., Маслов М.А., Копылов С.О. Оpubл. 21.05.2019, бюл. №15.
11. Патент РФ на полезную модель № 206748. СПК В61С 9/38 (2021.08); В61С 9/48 (2021.08) Тяговый привод локомотива. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Маслов М.А., Шевченко Д.Н. Оpubл. 24.09.2021, бюл. № 27.
12. Патент РФ на полезную модель № 215944. СПК В61С 9/50. Тяговый привод локомотива / А.С. Космодамианский, О.В. Измеров, С.О. Копылов, В.И. Воробьев, В.О. Корчагин, А.А. Пугачев, М.Ю. Капустин, А.В. Сомотканов, Д.Н. Шевченко, Е.В. Николаев, А.Е. Карпов. Оpubл. 11.01.2023, бюл. №2.
13. Применение агрегатных тяговых приводов для локомотивов с повышенными тяговыми свойствами / Космодамианский А.С., Пугачев А.А., Воробьев В.И., Измеров О.В., Николаев Е.В. // «Транспорт Урала», № 2(77), Екатеринбург, УрГУПС, 2023, С.41-48.
14. Патент на полезную модель № 172577, Российская Федерация, МПК В61С 9/44, F16D 3/50. Компенсационная муфта тягового привода локомотива. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Новиков А.С., Шорохов С.Г., Тысева Н.Ю. Оpubл. 13.07.2017. Бюл. № 20.