

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОКОМОТИВОВ НОВЫХ СЕРИЙ

С. Г. Шантаренко,

д.т.н., профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и
ремонта подвижного состава» ОмГУПС

С. В. Савинкин,

к.т.н., машинист эксплуатационного локомотивного депо Омск,

О. П. Супчинский,

к.т.н., доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и
ремонта подвижного состава» ОмГУПС

***Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы эффективности процессов управления жизненным циклом железнодорожного подвижного состава на стадии эксплуатации. Представлены результаты научных исследований динамических свойств экипажной части электровозов 2ЭСб и разработки новых научно обоснованных решений в конструкции и технологических процессах ремонта локомотива, позволяющих повысить его эксплуатационную надежность за счет снижения интенсивности изнашивания и увеличения ресурса бандажей колесных пар на протяжении жизненного цикла.*

***Ключевые слова:** управление жизненным циклом, кузовное подвешивание, поперечная связь, кузовная пружина, концевой виток, упор-ограничитель, возвращающий момент, боковая сила, износ гребня, эксплуатационная надежность.*

Жизненный цикл технической системы (ЖЦ) – это стадии процесса, охватывающие различные ее состояния начиная с момента появления и заканчивая полным выводом из эксплуатации, которые можно представить как идея, разработка, производство, эксплуатация, ликвидация [1].

Для железнодорожного подвижного состава ЖЦ определяется как «совокупность взаимосвязанных, последовательно осуществляемых процессов установления требований к потребительским свойствам и техническим параметрам железнодорожного подвижного состава, а также процессов его создания, применения и утилизации» [2].

Сложные технические системы проходят ЖЦ за десятки лет, управление которым является стратегическим направлением науки и технологической политики в промышленности и смежных секторах, позволяющим обеспечить сокращение затрат на разработку и производство наукоемкой продукции на 20...30 %; затрат, связанных с браком и устранением дефектов продукции, на 15...20 %; затрат в период эксплуатации продукции на 20...25 %; времени вывода на рынок новых образцов продукции на 60...70 % [3].

В начале двухтысячных годов под поддержкой жизненного цикла технического объекта (ЖЦТО) понимали в основном проектные и конструкторские работы, поскольку инструментальные средства были сосредоточены на автоматизированном проектировании и управлении данными. С ростом технической сложности изделий большую актуальность приобрело цифровое представление изделия на стадии эксплуатации (при выполнении ремонтов, технического обслуживания, закупки комплектующих). Таким образом, возникла необходимость планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) для обеспечения заданного уровня надежности изделия. Высокая конкуренция на рынке потребовала от предприятий сокращать время проектирования и подготовки производства изделий, а также затраты на эксплуатацию изделий, которые могли значительно превышать стоимость приобретения. Стало очевидно, что разнообразные потребности в данных об изделии в цифровом формате могут быть обеспечены в полной мере только на основе системного подхода к информационной поддержке ЖЦ изделия [4].

В настоящее время можно утверждать, что поддержка (управление) ЖЦТО — это концепция, построенная на основе системных решений, обеспечивающих коллективную разработку, распространение и использование технических данных об изделии, а также управление ими, начиная с создания изделия и заканчивая его утилизацией. Поддержка жизненного цикла изделия обеспечивает интеграцию информации, персонала, бизнес-процессов, проектных, конструкторских, производственных и управленческих систем на всех стадиях жизненного цикла и объединяет в комплексную систему передовые подходы и опорные технологии, включая управление данными об изделии (PDM), коллективные разработки, визуализацию, цифровое производство, выбор стратегических поставщиков, управление соответствиями, их проверку и пр. [4].

Иными словами, управление жизненным циклом изделия - особая деятельность на стадиях разработки, производства, эксплуатации, ремонта и утилизации изделия, осуществляемая субъектами управления путем воздействия на конструкцию изделий, производственную среду, систему технической эксплуатации и собственно физические экземпляры изделий с целью повышения эффекта от создания и применения изделия, при максимально возможном снижении стоимости его ЖЦ [5].

Такое управление в общем случае включает в себя:

- установление значений контрольных параметров в predetermined контрольных точках в процессах жизненного цикла;
- сбор и анализ информации и измерение значений контрольных параметров;
- реализацию управляющих воздействий.

Управление осуществляется циклически на основе обратных связей, образуемых за счет сбора информации и оценки значений контрольных параметров.

В реальной жизни управление ЖЦ тесно интегрировано в деятельность по разработке, производству и эксплуатации изделия и его выделение в отдельный подвид осуществляется условно, исключительно для удобства анализа и формирования необходимого методического, нормативного и технического инструментария [5].

Для железнодорожного подвижного состава эффективность процессов управления жизненным циклом на стадии эксплуатации достигается координацией решений, основанных на определении технического состояния объекта и знаниях о его обслуживании [6]. Подобная координация обеспечивает:

- полнофункциональное планирование и выполнение плановых текущих ремонтов и технического обслуживания на основе показателей эксплуатационной надежности и нормативных требований по техническому состоянию с учетом уровня технологической готовности ремонтных и сервисных предприятий;
- управление запасными частями и материалами с учетом выполняемых операций и обработки заказов на обслуживание;
- прослеживаемость финансов и активов;
- обучение и сертификация;
- мониторинг и прогнозирование технического состояния объектов жизненного цикла.

В период эксплуатации как самой продолжительной стадии жизненного цикла железнодорожного подвижного состава основными направлениями поддержки ЖЦ являются совершенствование и оптимизация технологических процессов эксплуатации и ремонта, конструктивных решений основных деталей, узлов и сборочных единиц, определяющих эксплуатационную надежность.

В последние годы в Омском государственном университете путей сообщения успешно развивается научное направление «Управление жизненным циклом и повышение эффективности использования локомотивов и вагонов новых серий», в рамках которого выполняемые учеными университета научные исследования по совершенствованию конструктивных решений, технологических процессов эксплуатации и ремонта локомотивов новых серий позволяют получать результаты по повышению эффективности процессов управления их жизненным циклом.

Оптимизация технологических процессов ремонта локомотивов. Экипажная часть (экипаж) является основной частью конструкции локомотива, обеспечивающей его движение в рельсовой колее, и представляет собой повозку с колёсными парами, в которой располагается необходимое энергетическое и вспомогательное оборудование. К экипажной части предъявляется ряд

обязательных конструктивных требований и условий содержания при эксплуатации, таких как:

- способность двигаться на прямых и криволинейных участках пути, не вызывая перегрузок в элементах конструкции;
- сохранять прочность узлов и деталей в течение всего срока службы;
- защищать оборудование локомотива от вредного воздействия вибраций и внешней среды.

Кузовная ступень рессорного подвешивания (вертикальные упругие соединения) обеспечивает виброзащиту кузова, а улучшение плавности хода и снижение воздействия на путь – квазиупругие устройства поперечной связи – так называемые возвращающие устройства. Связи кузова с рамой тележки предназначены для передачи всех видов усилий между рамой кузова и тележкой. Кузовное подвешивание 2ЭС6 состоит из пружин типа «flexicoil» (рис. 1), гидравлических гасителей колебаний, упоров-ограничителей горизонтальных и вертикальных перемещений, а также наклонных тяг [7].

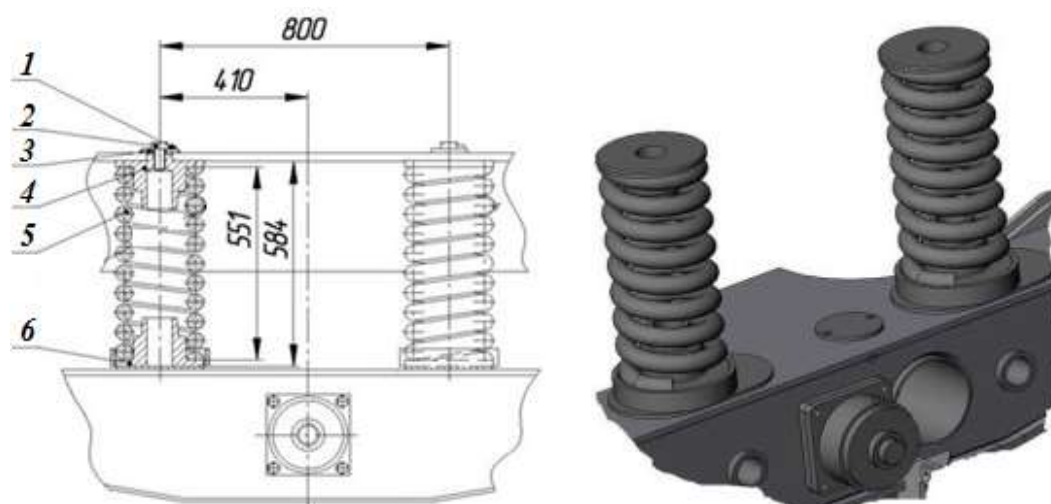


Рисунок 1 – Пружины «flexicoil» кузовного подвешивания электровоза 2ЭС6

1 – стопорная планка; 2 – стяжной болт; 3 – «бонка»; 4 – верхний стакан; 5 – пружина; 6 – направляющая чаша

Поворот тележки относительно кузова в кривых участках пути вызывает поперечную деформацию концевых витков пружин до 91 мм в кривых участках радиусом до 80 – 100 м, при этом на тележку действует возвращающий момент от поперечной деформации пружин 11,75 кН·м/град, который в крутых кривых достигает 47 кН·м (поворот тележки до 4°).

Палец упора-ограничителя 2 с пружиной 5 закреплены на боковине рамы в стакане 1 посередине тележки (рис. 2) и после регулируемого зазора 20 мм упирается в упорную плиту, закрепленную на обносном швеллере рамы кузова.

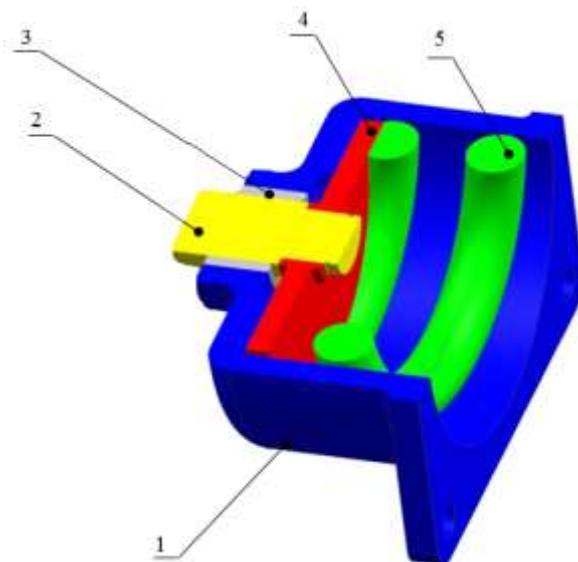


Рисунок 2 – Упор-ограничитель горизонтальных перемещений тележки
 1 – стакан; 2 – палец; 3 – втулка; 4 – основание; 5 – пружина

Упоры-ограничители горизонтальных перемещений тележки, горизонтальные гидравлические гасители колебаний выполняют функцию стабилизации горизонтальных колебаний виляния и отбоя тележки.

В конструкторской документации электровоза 2ЭС6 регламентировано положение кузовных пружин с ориентированными наружу тележки концевыми витками. Возможны два варианта такой установки кузовных пружин (рис. 3).

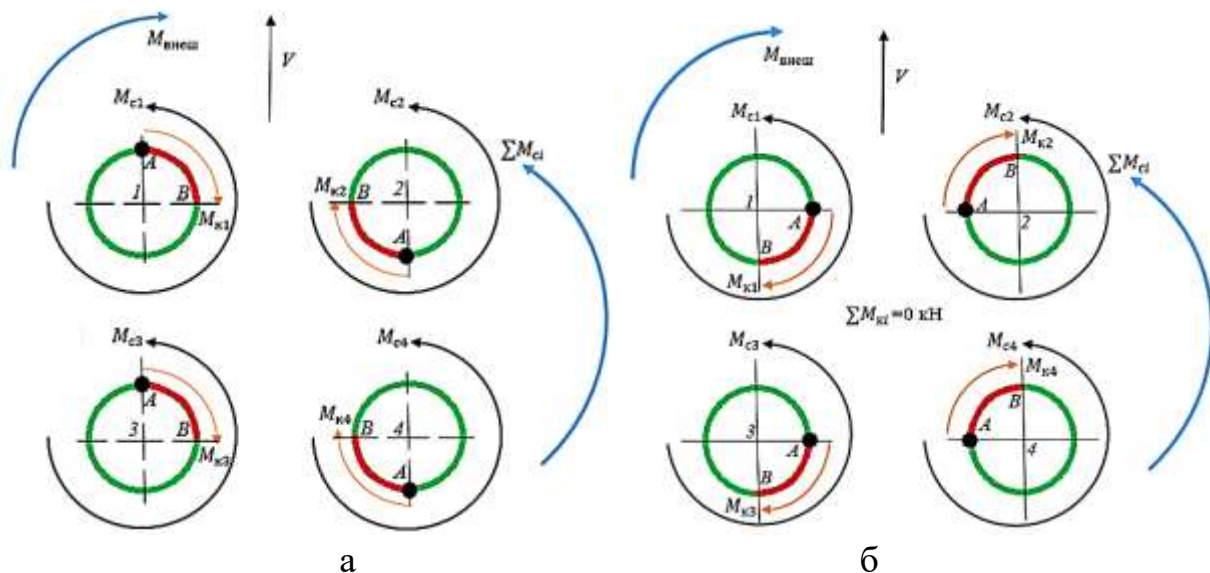


Рисунок 3 – Варианты установки кузовных пружин с ориентированными наружу тележки концевыми витками

Вариант на рисунке 3б отличается от варианта на рисунке 3а поворотом кузовных пружин на 90° по часовой стрелке относительно вертикальной оси.

Длина опорной поверхности концевой витка (дуга ВА – линия зеленого цвета) равна $3/4$ длины рабочего витка [8] (точка В – окончание рабочего витка; точка А – окончание концевой витка).

Момент кручения M_{ki} в дуге AB возникает от воздействия вертикальной силы и направлен по часовой стрелке (правая навивка пружины) [9].

При вписывании тележки в кривую на гребень бандажа колесной пары воздействует боковая сила, создающая момент поворота $M_{внеш}$. За счёт поперечного перемещения концевых витков в пружинном комплекте на тележку действует с

у

м Для исключения воздействия внутренних моментов кручения пружин M_{ki} , положение точки A подобрано таким образом, чтобы векторы \vec{M}_{ki} в дуге AB были направлены противоположно друг другу относительно боковин рам тележки, а их величины оставались одинаковыми независимо от направления кривой вписывания. Этого можно достичь только в одном случае, когда положение концевых витков соответствует схеме, приведенной на рисунке 3б. В любом другом положении концевых витков пружин это условие не выполняется, что способствует перекосу тележки в кривой и увеличению напряжений в пятне контакта гребня колеса с рельсом.

о При вписывании электровоза в кривую на пружинный комплект кузовных пружин «flexicoil» в поперечном направлении действуют усилие от поворота Q_ϕ и усилие от бокового сноса Q_{cb} тележки.

р Результирующей этих двух сил является сила Q_m которая стремится повернуть тележку на угол ϕ (рис. 4).

щ

а

ю

щ

и

й

м

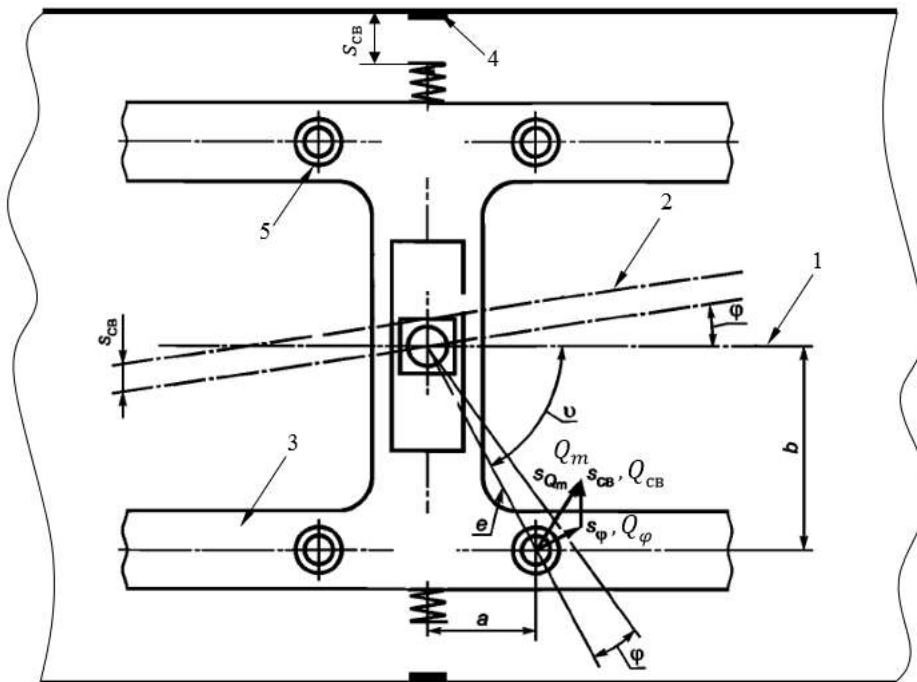
о

м

е

н

т



$$\sum M_{ci} = 1,75$$

$M_{внеш}$

Рисунок 4 – Схема поперечных деформаций кузовных пружин при движении локомотива в кривой

1 – продольная ось кузова, 2 – ось тележки при повороте и отnose, 3 – рама тележки, 4 – упорная плита кузова, 5 – кузовная пружина

ту поворота

Для поиска оптимального положения концевых витков пружинного комплекта, при котором возвращающий момент тележки был бы симметричным, а влияние действия моментов кручения возникающих в рабочих витках пружин при воздействии вертикальной силы на параметры поперечной упругой связи тележки с кузовом минимальным, исследованы четыре расчётных случая: для двух направлений кривой рельсовой колеи (радиуса 600 м) и двух вариантов положения концевых витков кузовных пружин «*flexicoil*» (рис. 3а и 3б).

Расчёты показали, что при установке концевых витков кузовных пружин согласно схеме на рисунке 3б угол поворота тележки в кривых разного направления будет практически одинаков и составлять $2,451^\circ$ при радиусе кривой 600 м, а на прямом участке пути тележка будет повернута влево на угол $-0,137^\circ$.

При положении концевых витков по схеме, приведенной на рисунке 3а, угол поворота тележки в кривой радиусом 600 м при правом направлении будет составлять $3,011^\circ$, а при левом направлении $-1,440^\circ$. На прямом участке пути тележка будет повернута вправо на угол $0,814^\circ$.

Результаты программного моделирования подтвердили отсутствие влияния ориентации концевых витков на статический прогиб пружин, а одинаковая навивка (правая) всех четырех пружин пружинного комплекта при их оптимальной установке (по схеме на рисунке 3б) не оказывает существенного влияния на сопротивляемость вписыванию тележки в кривые разного направления. В этом случае угловое перемещение концевых витков будет минимальным, а возвращающий момент от поперечной деформации пружин симметричен и одинаков по величине не зависимо от направления кривой.

Нами была выполнена оценка влияния сопротивления повороту тележки со стороны кузова на динамические качества локомотива (рамная и боковая сила) посредством расчета боковой сила F_6 , действующей на колесную пару в кривой и являющейся основополагающим фактором износа гребня бандажа [10].

Для варианта б (рис. 3) суммарный момент комплекта кузовных пружин $\sum M_{ki}$ равен нулю. Такое положение концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания снижает сопротивление повороту тележки при вписывании локомотива в кривую, что способствует уменьшению на 6 % (при сравнении с другим вариантом положения концевых витков) рамной силы и боковой силы F_6 , которая, согласно расчету, будет равна 63 кН. При установке пружин по схеме на рис. 3а $F_6 = 67$ кН.

Таким образом, установка пружин кузовного рессорного подвешивания с положением концевых витков по схеме на рис. 3б является оптимальным вариантом с точки зрения повышения динамических качеств электровоза 2ЭС6, что позволяет увеличить ресурс бандажа на 29 % (с 380 тыс. км до 490 тыс. км пробега).

до смены бандажа) и снизить интенсивность его изнашивания с 0,495 мм/10 тыс. км до 0,359 мм/10 тыс. км (на 38 %).

Внесение соответствующих изменений по установке кузовных пружин (оптимальное положение концевых витков) в технологические процессы ремонта позволит повышать эксплуатационную надежность и снижать стоимость жизненного цикла электровоза 2ЭС6.

Совершенствование конструктивных решений элементов экипажной части локомотива. Конструкция локомотива оказывает существенное влияние на показатели надежности, предусмотренные при формировании технических требований и технического задания при разработке новых видов тягового подвижного состава, включая его приспособленность к техническому обслуживанию и ремонту. Свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности путем технического обслуживания и ремонта, называется ремонтпригодностью (ГОСТ-Р 27.102-2021), которая является одним из инструментов управления жизненным циклом локомотива.

На ремонтпригодность большое влияние оказывают конструктивные факторы. Необходимо обеспечить простоту разборки и монтажа механизмов и агрегатов, в первую очередь обслуживаемых при ТО всех видов и текущих ремонтах, с широким применением агрегатирования и блочного исполнения отдельных узлов, не требующих высокой квалификации обслуживающего персонала при их замене [6].

Экспериментальным путем доказано, что амплитуда поперечных перемещений тележки при движении электровоза 2ЭС6 по прямым участкам пути достигает 20,5 мм, а в кривых радиусом 650 м – 27,4 мм [11]. Нормативный зазор между упором-ограничителем и упорной плитой рамы кузова составляет 20 мм, что обеспечивает ограничение горизонтальных перемещений тележки в прямом участке пути, не препятствует повороту тележки в пологих кривых, формирует регламентированную характеристику упругой поперечной связи в кузовном рессорном подвешивании при вписывании локомотива в кривые малого радиуса (менее 350 м) [7].

В соответствии с нормами допусков и износов деталей механической части локомотива [12] зазор между пальцем упора-ограничителя и упорной плитой рамы кузова при пробеге локомотива 600 тыс. км должен составлять 19 – 21 мм (допустимая интенсивность изнашивания – 1 мм на 600 тыс. км пробега) (рис. 5).



Рисунок 5 – Новый упор-ограничитель после ремонта в объеме ТР-600

Для экспериментального определения интенсивности изнашивания пальца упора-ограничителя горизонтальных перемещений тележки, влияния качества сборки механической части на его эксплуатационный ресурс выполнены замеры зазора между пальцем и упорной плитой рамы кузова на контрольной группе локомотивов серии 2ЭС6, эксплуатируемых на полигонах Западно-Сибирской, Свердловской и Южно-Уральской железных дорог.

Анализ результатов показал, что при сборке механической части допускаются отклонения зазора от нормативного значения: минимальный зазор составлял 11 мм, максимальный – 27 мм.

Интенсивность изнашивания пальца упора-ограничителя

$$\sigma = \frac{\Delta L}{\Delta S} \cdot 10^4,$$

где ΔL – разница длины пальца упора между замерами нарастающим итогом от ТР-600, мм;

ΔS – линейный пробег локомотива между замерами нарастающим итогом от последнего ТР-600, км.

Эксперимент показал, что в среднем износ пальца до браковочных параметров происходит при пробеге локомотива 79500 км. К пробегу 300 тыс. км износ достигает 3,8 мм. Максимальный износ 8 мм был зафиксирован при пробеге 258007 км, что составляет 1 мм за 32250 км (интенсивность изнашивания 0,31 мм/10 тыс. км). В тех случаях, когда при начальных условиях (ТР-600) зазор был менее 20 мм, интенсивность изнашивания пальца упора увеличивалась.

Таким образом работоспособность упора-ограничителя в реальных условиях эксплуатации локомотива серии 2ЭС6 не отвечает требованиям технических условий.

Технологическим процессом ремонта замена упора-ограничителя с выкаткой тележки выполняется на текущем ремонте в объеме ТР – 600.

Для повышения работоспособности узла предложена усовершенствованная конструкция упора-ограничителя, представленная на рис. 6 [13].

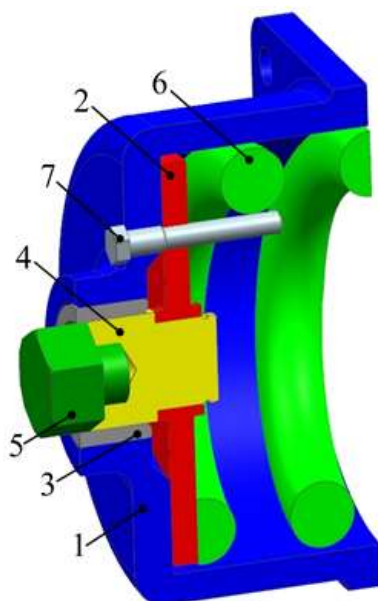


Рисунок 6 – Упор-ограничитель горизонтальных перемещений тележки измененной конструкции

1 – стакан; 2 – основание; 3 – втулка; 4 – палец; 5 – съемный наконечник; 6 – пружина упора; 7 – фиксирующий винт

Фиксирующий винт используется для исключения проворота пальца при замене изношенного съемного наконечника пальца, установленного на резьбовом соединении. Возможна установка регулировочных шайб под наконечник пальца.

Усовершенствованная конструкция, которая позволяет регулировать зазор или заменять изношенную часть (съемный наконечник) пальца при проведении очередного текущего ремонта (ТР-30, ТР-300) при достижении пробега локомотивом 60 тыс. км без выкатки тележки из-под электровоза, обеспечивает поддержание нормативного зазора между пальцем и упорной плитой рамы кузова на протяжении всего жизненного цикла.

Применение предложенных научно обоснованных решений в конструкции и технологических процессах ремонта электровозов 2ЭС6 позволяет повышать его эксплуатационную надежность за счет снижения интенсивности изнашивания и увеличения ресурса бандажей колесных пар.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жизненный цикл технических систем [Текст] : учеб.-метод. пособие / О. В. Грицкевич, А. В. Шабурова. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – 113 с. ISBN 978-5-907052-83-3.
2. ГОСТ Р 52944–2008. Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения.// Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 августа 2008 г. № 152-ст.

3. Яблочников Е. И., Фомина Ю. Н., Саломатина А. А. Компьютерные технологии в жизненном цикле изделия. Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО, 2010, 180 с.
4. Кузин Е. И., Кузин В. Е. Управление жизненным циклом сложных технических систем: история развития, современное состояние и внедрение на машиностроительном предприятии. Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, вып. 1. С. 12–35. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/meng/1457.html>.
5. Ссудов, Е. В. О концепции управления жизненным циклом изделий Е. В. Ссудов, С. С. Кондрашина Электронный журнал «Технологии PLM и ИЛП». – Выпуск 6. – 2015. – С. 3–11.– [Электронный ресурс].
6. Гапанович, В. А. Ремонтпригодность – один из инструментов управления жизненным циклом железнодорожного подвижного состава. В. А. Гапанович, Ю. И. Попов, А. К. Тотиев//Техника железных дорог. – № 1 (69). – 2025. – С. 70–75.
7. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 «Синара» с коллекторными тяговыми электродвигателями : руководство по эксплуатации. В 9 частях. Часть 6. Механическое оборудование и системы вентиляции. – Верхняя Пышма: ОАО «УЗЖМ», 2008. – 97 с.
8. ГОСТ 34628–2019. Пружины и комплекты пружинные рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Методы расчёта на прочность при действии продольных и комбинированных нагрузок. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 24 с.
9. Шантаренко, С. Г. Влияние расположения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания локомотива на параметры упругой поперечной связи кузова с тележкой / С. Г. Шантаренко, С. В. Савинкин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 29–39.
10. Евенко, В. В. Критериальные уравнения движения локомотивов в кривых участках пути / В. В. Евенко // Вестник ВНИИЖТа - 1976. - № 4. – С. 26 – 31.
11. Савоськин, А. Н. Вероятностные методы в задачах динамики, прочности и безотказности рельсовых экипажей : Стереотипное издание / А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак, Д.А. Бондаренко. – Москва : Альянс, 2022. – 612 с. – ISBN 978-5-00106-528-9.
12. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 «Синара» с коллекторными тяговыми электродвигателями : руководство по эксплуатации. В 9 частях. Часть 9. Техническое обслуживание. Текущий ремонт. Приложение Т. / ООО «Уральские локомотивы». – Екатеринбург, 2016. – 437-439 с.
13. Савинкин, С. В. Повышение работоспособности упора-ограничителя горизонтальных перемещений тележки электровозов серии 2ЭС6 / С. В. Савинкин. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (58). – С. 128–134.