

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.4.027

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-5>

Повышение динамических качеств локомотива за счет изменения положения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания



Сергей ШАНТАРЕНКО



Сергей САВИНКИН

*Сергей Георгиевич Шантаренко¹,
Сергей Владимирович Савинкин²*

*Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия.*

¹ WoS Researcher ID: B-1719-2016; Scopus Author ID:
57200089403; PIIHC Author ID: 477507.

² ORCID 0000-0002-4015-574X; PIIHC Author ID:
1098289.

✉ ² syava-sv@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования влияния положения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания локомотива на их статический прогиб и на параметры упругой поперечной связи тележки с кузовом, зависящей от углового перемещения концевых витков при вписывании локомотива в кривые разного направления, с целью повышения динамических качеств электровоза.

Методом математического моделирования с использованием программного комплекса автоматизированного проектирования были рассмотрены различные варианты установки кузовных пружин, приведен и обоснован оптималь-

ный вариант положения концевых витков пружин, при котором повышаются динамические качества локомотива за счет наименьшего сопротивления повороту тележки, симметричности возвращающих моментов и обеспечения благоприятного вписывания локомотива в кривые участки пути, что снижает интенсивность изнашивания гребней бандажей колес.

Установлено, что направление навивки кузовных пружин при оптимальном варианте положения концевых витков не оказывает существенного влияния на симметричность возвращающего момента при вписывании тележки в кривые разного направления.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, кузовное подвешивание, поперечная связь, кузовная пружина, концевой виток, статический прогиб, возвращающий момент, боковая сила, динамические качества локомотива, износ гребня.

Для цитирования: Шантаренко С. Г., Савинкин С. В. Повышение динамических качеств локомотива за счет изменения положения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-5>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Экипажная часть (экипаж) является частью конструкции локомотива, обеспечивающей его движение в рельсовой колее, и представляет собой повозку с колесными парами, в которой располагается необходимое энергетическое и вспомогательное оборудование. Экипажная часть является основой локомотива, непосредственно обеспечивающей его движение.

К экипажной части предъявляется ряд обязательных конструктивных требований и условий содержания при эксплуатации, к которым относятся:

- 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 от вредного воздействия вибраций и внешней среды.

Тележки воспринимают тяговые и тормозные усилия, боковые, горизонтальные и вертикальные силы при прохождении локомотивом неровностей пути и передают их через пружинные опоры на раму кузова. Поперечная связь рамы тележки с кузовом осуществляется за счет поперечной податливости кузовных пружин и жесткости пружин упоров-ограничителей, которые также обеспечивают возможность поворота тележки в кривых участках пути и гашения различных форм колебаний кузова [1].

Рессорное подвешивание должно обладать необходимой упругостью и способностью поглощать (гасить) возникающие при движении электровоза вертикальные и боковые колебания и равномерно распределять нагрузки между колесными парами и колесами [2].

От конструктивных особенностей рессорного подвешивания и его параметров, а также от того, как распределены колеблющиеся массы кузова и тележки, зависят так называемые динамические качества электровоза [2; 3].

Вертикальная жесткость первой ступени подвешивания (на колесо) определяется суммарной жесткостью пружин и жесткостью параллельно включенной с ними вертикальной поводковой группы. Наличие параллельно включенного упругого элемента (поводковой группы) со значительной жесткостью не позволяет создать первую ступень рессорного подвешивания достаточно мягкой. Так, уменьшение жесткости пружин вдвое

приводит к снижению суммарной жесткости лишь на 30 %. Чтобы обеспечить при этом необходимую прочность пружин, их габаритные размеры пришлось бы значительно увеличить, что невозможно. Для снижения динамического воздействия сил, действующих на локомотив со стороны пути, и повышения эффективности гашения вертикальных колебаний его экипажа рессорное подвешивание локомотива выполняется двухступенчатым. Вторая ступень подвешивания состоит из упругих боковых опор, через которые масса кузова передается на рамы тележек. Расположение боковых опор и жесткость второй ступени подвешивания определяются условиями рационального использования сцепного веса локомотива при реализации сил тяги [4], выбора оптимального демпфирующего момента, который гасит горизонтальные колебания локомотива, и рационального восприятия массы кузова рамой тележки.

Целью исследования, результаты которого приводятся в настоящей статье, являлось определение оптимального варианта установок концевых витков пружин типа «flexicoil» кузовного рессорного подвешивания с точки зрения повышения динамических качеств электровоза.

Работа выполнена на основе применения метода математического моделирования, в том числе с использованием универсальной математической программы MathCAD, программного комплекса Siemens NX10, основанного на методе конечных элементов (Finite Element Method), с применением блока линейного статического анализа (Linear Static Analysis).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка влияния положения концевых витков кузовных пружин на динамические качества локомотива

Одним из современных вариантов рессорного подвешивания тягового подвижного состава являются технические решения, использование которых связано с работой пружин на поперечные (сдвигающие) нагрузки [5]. Примером может служить применяемое на электровозах серии ЭЭС6 кузовное подвешивание, выполненное через четыре пружины типа «flexicoil» на каждой тележке (по две с каждой стороны). Связи кузова с рамой тележки предназначены для передачи всех видов усилий между рамой кузова и тележкой. Поворот те-



Таблица 1

Характеристика пружины «flexicoil» [выполнено авторами]

Обозначение	Название	Величина
Сталь	60С2ХА	
G	Модуль упругости при сдвиге	78 кН/мм ²
E	Модуль нормальной упругости	196 кН/мм ²
d	Диаметр прутка пружины	46 мм
D	Средний диаметр пружины	197 мм
n	Число рабочих витков	9
n ₁	Полное число витков	11
h ₀	Высота пружины в свободном состоянии	650 мм
F ₁	Расчетная вертикальная статическая нагрузка на пружину	66,2 кН
s ₁	Расчетный статический прогиб пружины под нагрузкой F ₁	105 мм
C	Продольная жесткость пружины	640 Н/мм
C ₀	Поперечная жесткость пружины	123 Н/мм
h ₁	Высота пружины под расчетной статической нагрузкой F ₁	549 мм
m	Масса пружины	79 кг

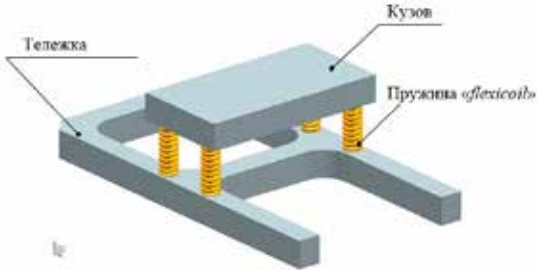


Рис. 1. 3D-модель конструкции кузовного рессорного подвешивания электровоза 2ЭС6 [выполнено авторами].

лежки относительно кузова в кривых участках пути вызывает поперечную деформацию концевых витков пружин, при этом на тележку действует возвращающий момент в соответствии с ГОСТ 34628-2019 [1] и руководством по эксплуатации 2ЭС6.00.000.00 РЭ5². Положение концевых витков пружин влияет на возвращающий момент от поперечной деформации пружин, действующий на тележку, на параметры упругой поперечной связи кузова с тележкой при вписывании локомотива в кривые участки пути, и может приводить к перекосу кузова относительно рамы тележки и неравномерному распределению вертикальных нагрузок по осям колесных пар [2; 6].

Современные программные комплексы автоматизированного проектирования за

счет возможности анализа множества вариантов взаимного расположения конструкций, узлов и деталей позволяют достичь оптимального конструктивного решения³ [7; 8]. При таком подходе удастся качественно и количественно оценить влияние конструктивных особенностей узлов, их взаимного расположения на работоспособность всей конструкции [9; 10].

Данный принцип был использован для поиска оптимального варианта установки пружин типа «flexicoil» в кузовном рессорном подвешивании электровозов серии 2ЭС6. В процессе проектирования было исследовано три варианта положения концевых витков кузовных пружин по отношению к боковинам рамы тележки, в том числе вариант, рекомендованный в руководстве по эксплуатации электровоза 2ЭС6, с концевыми витками, ориентированными наружу тележки.

В результате проведенного исследования была выполнена оценка влияния положения

¹ ГОСТ 34628-2019. Пружины и комплекты пружинные рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Методы расчета на прочность при действии продольных и комбинированных нагрузок. – М.: Изд-во стандартов, 2020. – 24 с. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293723/4293723988.pdf?ysclid=lnykd2ck61744121497>. Доступ 26.05.2023.

² Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Ч. 6. Механическая часть. – 2ЭС6.00.000.00 РЭ5. – Екатеринбург: Изд-во ООО «Уральские локомотивы», 2011. – 97 с.

³ Руководство пользователя Universal mechanism 9. Моделирование динамики железнодорожных экипажей // www.universalmechanism.com: официальный сайт, 2021. – 268 с. [Электронный ресурс]: <http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/08umloco.pdf>. Доступ 19.11.2022.

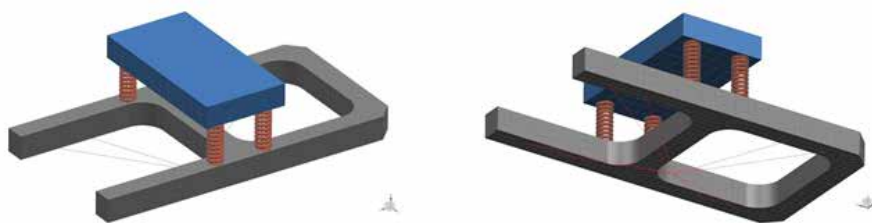


Рис. 2. КЭМ кузовного рессорного подвешивания электровоза 2ЭС6 [выполнено авторами].

концевых витков кузовных пружин на их статический прогиб, выявлена зависимость между их расположением и величиной углового перемещения концевого витка, что в свою очередь оказывает значительное влияние на результирующую величину поперечной деформации пружин и на параметры упругой поперечной связи тележки с кузовом при вписывании локомотива в кривые участки пути [11].

Особенность конструкции пружин типа «flexicoil» заключается в их поперечной жесткости, которая в пять раз меньше продольной. Такое конструктивное решение не препятствует повороту тележки в кривые, а возвращающий момент от поперечной деформации пружин при правильной ориентации концевых витков зависит от угла поворота тележки и равен $11,75 \text{ кН} \cdot \text{м/град}^2$. В таблице 1 приведены параметры кузовной пружины «flexicoil».

Исследования влияния положения концевых витков на параметры упругой поперечной связи кузовного подвешивания локомотива производились с помощью программного комплекса Siemens NX10 [7].

Расчетная 3D модель конструкции кузовного рессорного подвешивания электровоза серии 2ЭС6 приведена на рис. 1.

Тележка представлена габаритной моделью, а кузов электровоза – как объемный массовый элемент с характерными точками установки кузовных пружин. Пружины смоделированы в полном соответствии с конструкторской документацией.

Для выполнения расчета создано шесть конечно-элементных моделей (КЭМ) [12], одна из которых представлена на рис. 2.

Остальные модели отличаются только ориентацией концевых витков пружин относительно продольной оси тележки и направлением (в зависимости от направления кривой вписывания) силы Q_m , действующей на пружинный комплект и стремящейся повернуть тележку на угол φ .

Элементы конструкции смоделированы 3D элементами «CTETRA(10)» и «CHEXA(20)».

Установка тележки на буксовые пружины моделировалась 1D элементами RBE2, зависимость узлы которых соединены с местами установки опор буксовых пружин на тележку. Независимый узел расположен на оси вращения страховочного шкворня электровоза и закреплен по пяти степеням свободы (ограничены перемещения по трем осям XYZ и ограничены повороты относительно оси X и Y).

Имитатор кузова тележки ограничен по вертикальным граням по двум степеням свободы (ограничены перемещения по оси X и Y).

Места контакта кузовных пружин с тележкой и имитатором кузова смоделированы соединением типа «Face Gluing», представляющим собой жесткое соединение между элементами конструкции и исключающим поперечные перемещения концевых витков кузовных пружин в нижних направляющих чашах рамы тележки и в верхних стаканах рамы кузова.

Расчеты угла поворота тележки относительно кузова проведены с использованием программного комплекса Siemens NX10, основанного на методе конечных элементов (Finite Element Method), и применением блока нелинейного статического анализа (Nonlinear Static analysis).

При вписывании электровоза в кривую на комплект кузовных пружин «flexicoil» в поперечном направлении действуют силы от поворота Q_φ и от бокового сноса $Q_{св}$ тележки. Результирующей этих двух сил является сила Q_m , которая стремится повернуть тележку на угол φ (рис. 3). Реакцией на силу Q_m будет являться момент сопротивления повороту (возвращающий момент), стремящийся вернуть тележку в исходное положение.



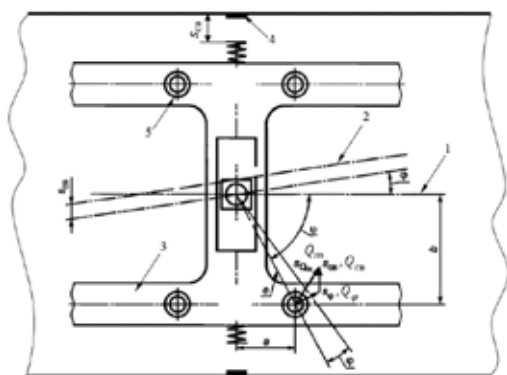


Рис. 3. Расчетная схема поперечных деформаций кузовных пружин при движении локомотива в кривой: 1 – продольная ось кузова; 2 – ось тележки при повороте и отnose; 3 – рама тележки; 4 – упорная плита кузова; 5 – кузовная пружина [выполнено авторами].

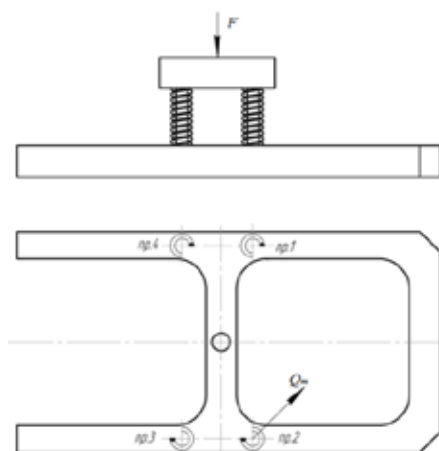


Рис. 4. Направления действия расчетных сил [выполнено авторами].

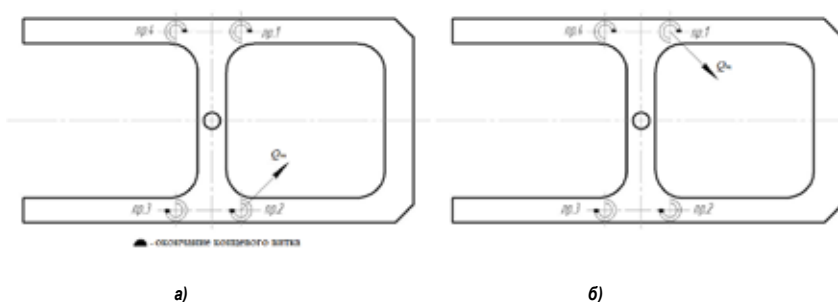


Рис. 5. Расчетная схема № 1: а) – движение локомотива в левой кривой; б) – движение локомотива в правой кривой [выполнена авторами].

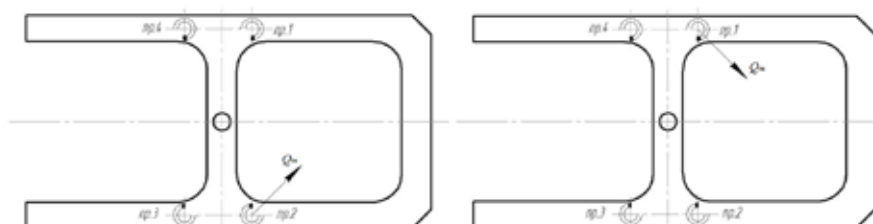


Рис. 6. Расчетная схема № 2 [выполнена авторами].

При расчете было принято, что вертикальная статическая сила от массы электровоза, приходящаяся на пружинный комплект одной тележки, $F = 270 \text{ кН}$, и поперечная сила, ориентированная к продольной оси тележки под углом 315° или 45° в зависимости от направления кривой, $Q_m = 30 \text{ кН}$ (рис. 4).

Определение оптимального варианта установки концевых витков пружин типа «Flexicoil» кузовного рессорного подвешивания

Для поиска оптимального положения концевых витков пружинного комплекта, при котором

возвращающий момент тележки будет симметричным, а влияние моментов кручения, возникающих в рабочих витках пружин при воздействии вертикальной статической нагрузки, на параметры поперечной упругой связи тележки с кузовом минимальным [13], исследованы три варианта положения, приняты шесть расчетных случаев в зависимости от направления кривой при вписывании локомотива. Расчетные случаи и схемы положения концевых витков пружин приведены на рис. 5–7.

Величины углов между продольной осью тележки и окончанием концевой витка пружины представлены в таблице 2.

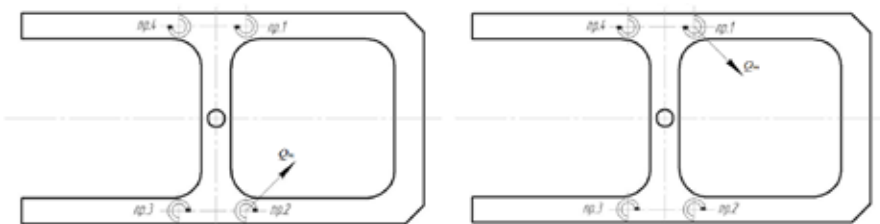


Рис. 7. Расчетная схема № 3 [выполнена авторами].

Таблица 2

Значение углов для расчетных схем [выполнено авторами]

Расчетная схема	Пружина 1	Пружина 2	Пружина 3	Пружина 4
1	0°	180°	180°	0°
2	90°	270°	270°	90°
3	180°	0°	0°	180°

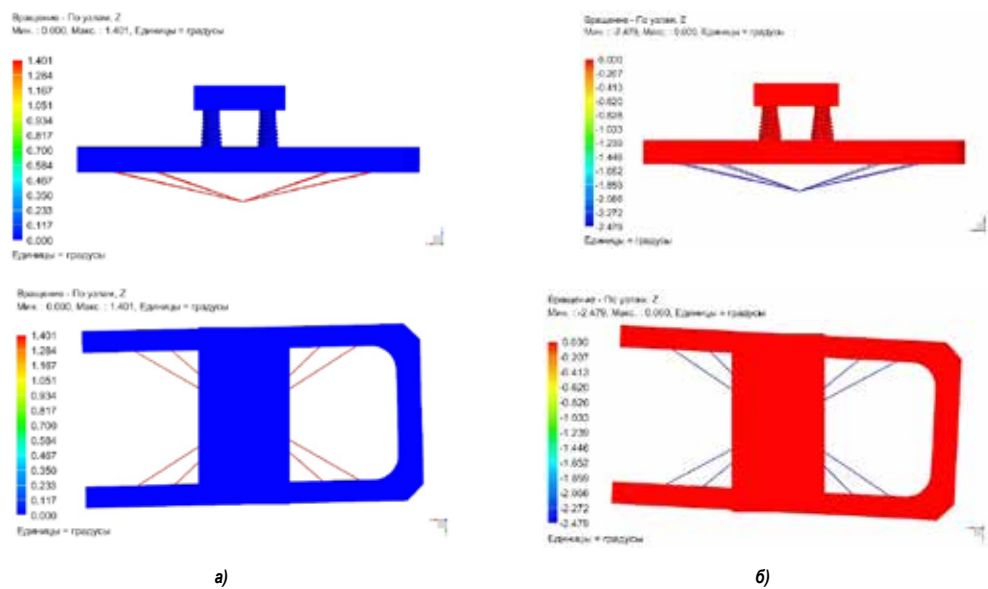


Рис. 8. Фрагмент расчета угла поворота тележки в программном комплексе Siemens NX10 (расчетная схема № 1): а) – движение локомотива в левой кривой; б) – движение локомотива в правой кривой.

Результаты расчета угла поворота тележки относительно кузова электровоза для всех расчетных схем и случаев приведены в таблице 3.

Знак «—» принят для поворота тележки по часовой стрелке – правая кривая вписывания локомотива.

На примере расчетной схемы № 1 (рис. 5) представлен фрагмент расчета угла поворота тележки в программном комплексе Siemens NX10, рис. 8.

Для оценки влияния положения концевых витков кузовных пружин на их статический прогиб, а также перемещений тележки (угол поворота) из-за неуравновешенных моментов

кручения, возникающих в рабочих витках пружин от воздействия вертикальной статической нагрузки, из КЭМ и расчетных схем

Таблица 3

Значения углов поворота тележки относительно кузова электровоза [выполнено авторами]

Расчетная схема	φ, °	Направление кривой
1	1,401	левая
	–2,479	правая
2	2,099	левая
	–1,971	правая
3	2,215	левая
	–1,121	правая



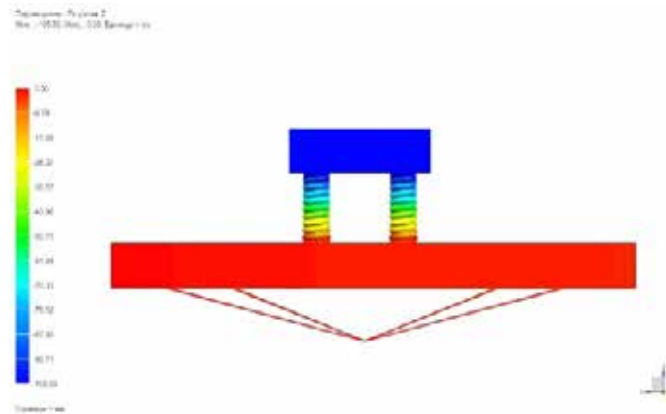


Рис. 9. Фрагмент расчета статического прогиба кузовного пружинного комплекта от действия вертикальной статической силы F в программном комплексе Siemens NX10 [выполнено авторами].

Таблица 4
Значения статического прогиба
комплекта кузовных пружин
и угла поворота тележки при действии
только силы F

Расчетная схема (только сила F)	Статический прогиб, мм	φ , °
1	105,50	–0,567
2	105,10	0,1
3	105,58	0,578

была исключена сила Q_m . Данное условие можно интерпретировать как движение локомотива по идеальному прямому участку пути [14] и использовать при сборке механической части в процессе ремонта с целью соблюдения регламентированных параметров упругой поперечной связи тележки с кузовом и сохранения их в эксплуатации [6].

Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Для иллюстрации один из фрагментов расчета статического прогиба в программном комплексе Siemens NX10 приведен на рис. 9.

Фрагменты расчетов углов поворота тележки аналогичны представленным на рис. 8.

С учетом требования к динамическим качествам локомотива и при коэффициенте вертикальной динамики второй ступени рессорного подвешивания, равном 0,25 (ГОСТ Р 55513–2013⁴), что соответствует реальным

⁴ГОСТ Р 55513–2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. – М.: Стандартинформ, 2013. – 46 с. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200104254?ysclid=lnykb5q9v354720493>. Доступ 26.05.2023.

условиям эксплуатации, продольная деформация пружин увеличивается на 26 мм, разность углов поворота тележки влево и вправо по направлению кривой относительно кузова электровоза с учетом действия силы Q_m увеличивается на 1,6°, а угол поворота тележки относительно кузова электровоза при действии только одной вертикальной силы F – на 0,24°, что оказывает существенное негативное влияние на характеристику поперечной упругой связи тележки с кузовом и способствует перекосу тележки в кривой.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных исследований определена оптимальная схема положения концевых витков кузовных пружин, при которой от воздействия вертикальной силы от массы кузова, приходящейся на одну тележку, угловое перемещение концевых витков будет минимальным (0,1°), а возвращающий момент от поперечной деформации пружин будет симметричен и одинаков по величине независимо от направления кривой рельсовой колеи (рис. 6).

Данная ориентация концевых витков кузовных пружин «flexicoil» способствует симметричности параметров поперечной упругой связи тележки с кузовом при вписывании локомотива в кривые разного направления, обеспечивая равномерное воздействие на гребни бандажей колесных пар, и при этом не влияет на статический прогиб пружин. Одинаковая навивка (правая) всех четырех пружин кузовного комплекта при установке в соответствии с расчетной схемой № 2

(рис. 6) не оказывает значительного влияния на сопротивляемость тележки вписыванию в кривые разного направления.

Только за счет рациональной установки концевых витков пружин кузовного подвешивания можно уменьшить боковую силу, действующую на гребень бандажа, тем самым создавая более благоприятные условия для вписывания тележки в кривые участки пути, что будет способствовать снижению интенсивности изнашивания гребней бандажей колесных пар [15–17].

Предложенный алгоритм подбора положения концевых витков кузовных пружин может быть использован для тягового подвижного состава всех серий, где применяются конструктивные решения в кузовном рессорном подвешивании, аналогичные используемым на электровозе 2ЭС6.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гарг В. К., Дуккипати Р. В. Динамика подвижного состава. Пер. с англ. К. Г. Бомштейна / Под ред. Н. А. Панькина. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с. ISBN 5-277-00226-X.

2. Шантаренко С. Г., Савинкин С. В., Свиридова Ю. А. Неравномерное распределение осевых нагрузок как фактор одностороннего износа гребней колесных пар электровозов серии 2ЭС6 // «Транспорт и логистика: развитие в условиях глобальных изменений потоков»: сб. научных трудов VII международной научно-практ. конференции. – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 410–414. ISBN 978-5-907295-82-7.

3. Савоськин А. Н., Бурчак Г. П., Бондаренко Д. А. Вероятностные методы в задачах динамики, прочности и безотказности рельсовых экипажей: Стереотипное издание. – М.: Изд-во Альянс, 2022. – 612 с. ISBN 978-5-00106-528-9.

4. Лисунов В. Н. Использование сил взаимодействия движущего колеса с рельсом в режимах тяги и электрического торможения: монография / В. Н. Лисунов. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 160 с. ISBN 5-94941-016-5.

5. Буйносов А. П., Фетисова Н. Г. Варианты использования и расчет цилиндрических винтовых пружин в рессорном подвешивании современных локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 5. – С. 62–64. EDN: WRPXNJ.

6. Шантаренко С. Г., Савинкин С. В. Влияние расположения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания локомотива на параметры упругой поперечной связи кузова с тележкой // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. –

2023. – № 2. – С. 45–50. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_5.

7. Гончаров П. С., Артамонов И. А., Халитов Т. Ф., Денисихин С. В., Сотник Д. Е. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. – М.: ДМК Пресс, 201. – 504 с. ISBN 978-5-94074-841-0.

8. Андрищенко А. А., Шутова М. Н. Влияние расположения опорного витка пружины буксового рессорного подвешивания на прочность корпуса буксы электровоза 2ЭС5К // Вестник всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2008. – № 1 (55). – С. 168–174. EDN: JWLASJ.

9. Шантаренко С. Г., Савинкин С. В., Свиридова Ю. А. Конструкционные особенности узлов механической части и отказы локомотивов новых серий // «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов»: материалы XII всероссийской научной-техн. конференции с международным участием. – Омск, 2022. – С. 96–106. ISBN 978-5-94941-311-1.

10. Парнюк С. М. Надежность технических средств и подходы к техническому регулированию // Локомотив. – 2022. – № 7 (787). – С. 13–18. EDN: TCSDHB.

11. Савинкин С. В., Шантаренко С. Г. Влияние поперечной жесткости кузовного подвешивания электровоза 2ЭС6 на износ гребней колесных пар // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы XVI научной конференции, посвященной Дню российской науки / отв. ред. И. И. Галиев. – Омск: Изд-во ОмГТУПС, 2022. – С. 401–407. EDN: ZPZQSF.

12. Ашуркова С. Н., Антипин Д. Я. Выбор рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона с подкрепляющими элементами перфорированного сечения // Транспорт Урала. – 2019. – № 2 (61). – С. 23–27. EDN: HKPNJX.

13. Мартыанов А. А., Мартыанов А. П., Яхин С. М. Практический расчет упругих элементов с большим шагом витков на прочность и жесткость при деформации сжатия // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2010. – Т. 5. – № 4 (18). – С. 117–119. EDN: NBJOUN.

14. Галиев И. И., Минжасаров М. Х., Липунов Д. В. Формирование математической модели вертикальных колебаний электровозов 2ЭС6 с учетом динамики колесно-моторных блоков // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 96–108. EDN: DXXRHE.

15. Буйносов А. П. Методы повышения ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава: Монография. – М.: УМЦ по образованию на ж. д. транспорте, 2010. – 224 с. ISBN 978-5-9994-0038-3.

16. Кузнецов В. Ф., Шантаренко С. Г., Савинкин С. В. Износ материала гребня бандажа колеса локомотива // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 82–88. EDN: EFFXCC.

17. Доронин С. В., Доронина И. И. Управление движением локомотивных тележек в кривых // Известия Транссиба. – 2016. – № 1 (25). – С. 25–30. EDN: VYXGPZ.

Информация об авторах:

Шантаренко Сергей Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, ShantarenkoSG@omgups.ru.

Савинкин Сергей Владимирович – аспирант кафедры технологий транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, syava-sv@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 05.08.2023, одобрена после рецензирования 13.11.2023, принята к публикации 17.11.2023.

