

Исследование механических воздействий на силовые шины выпрямительно-инверторного преобразователя-4000-2М электровозов 2 (3, 4)ЭС5К

Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный✉

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ zabolotnyu_vv@mail.ru

Резюме

В 2020 году в рамках контракта жизненного цикла заключенного между поставщиком локомотивов АО «Рослокомотив» и ОАО «Российский железные дороги» в эксплуатационные локомотивные депо продолжается поставка электровозов серии «Ермак» производства ООО «Производственной компании «Новочеркасский электровозостроительный завод». Зачастую при разработке и проектировании новых локомотивов тяжело определить реальные эксплуатационные механические воздействия на узлы и элементы оборудования локомотивов, работающих в разных условиях эксплуатации, ввиду чего в рамках жизненного цикла локомотивов предусмотрена их модернизация с целью повышения надежности и срока службы. За период эксплуатации новых локомотивов выявлен один из недостатков электровозов серии 2(3, 4)ЭС5К с поосным регулированием силы тяги – излом силовой токоведущей шины выпрямительно-инверторных преобразователей ВИП-4000-2М в местах контакта шин к выводам ВИП. В настоящее время приняты меры по доработки конструкции шинного монтажа, однако, полностью исключить проблему не удалось. Разработана САД и САЕ-модель шинного монтажа ВИП, проведен модальный и гармонический анализ с применением метода конечных элементов программного комплекса Solid Works Simulation. В статье приведены результаты модального и гармонического расчетов силовой токоведущей шины ВИП. Определены собственные частоты конструкции шинного монтажа ВИП, по амплитудно-частотной характеристике найдены максимальные напряжения, возникающие в конструкции. Результаты исследования в программном комплексе САПР подтвердили возникновение неисправностей шин ВИП-4000-2М. Предложена модернизация, позволяющая снизить концентрацию напряжений в конструкции и исключить риск возникновения механических неисправностей силовых шин.

Ключевые слова

контракт жизненного цикла, силовая шина, выпрямительно-инверторный преобразователь, САД-модель, САЕ-модель, модальный анализ, гармонический анализ, вибрация

Для цитирования

Давыдов Ю. А. Исследование механических воздействий на силовые шины выпрямительно-инверторного преобразователя-4000-2М электровозов 2 (3, 4)ЭС5К / Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 170–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).170-177

Информация о статье

поступила в редакцию: 13.03.2021, поступила после рецензирования: 20.03.2021, принята к публикации: 23.03.2021

Research of mechanical effects on power buses of a reversible converter-4000-2M OF electric locomotives 2 (3, 4) ES5K

Yu. A. Davydov, O. O. Mukhin, V. V. Zabolotnyi✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ zabolotnyu_vv@mail.ru

Abstract

In 2020, within the framework of the life cycle contract concluded between the locomotive supplier Roslokomotiv AO and Russian Railways OAO, the supply of electric locomotives of the series «Ermak» produced by «Production Company «Novocherkassk Electric Locomotive Plant» OOO. Often, when developing and designing new locomotives, it is difficult to determine the real operational mechanical effects on the components and elements of equipment of locomotives operating in different operating conditions. Which is why, within the life cycle of locomotives, their modernization is envisaged in order to increase reliability and service life. During the period of operation of the new locomotives, one of the shortcomings of series 2(3, 4) ES5K electric locomotives with axial traction control was revealed – a break in the power current-conducting bus of the reversible converters RIP-4000-2M at the points of contact of the buses to the terminals of the reversible converter. At present, measures have been taken to refine the construction design of the bus mounting, however, it was not possible to completely eliminate the problem. A CAD and CAE-model of the bus mounting of the reversible converters was developed, a modal and harmonic analysis was carried out using the finite element method of the Solid Works Simulation software package. The article presents the results of

modal and harmonic calculations of the power current-conducting bus of the reversible converters. The natural frequencies of the bus mounting construction design of the high-voltage power supply were determined, the maximum stresses arising in the structure were found from the amplitude-frequency characteristic. The results of the study in the CAD software complex confirmed the occurrence of malfunctions of the reversible converter-4000-2M buses. A modernization is proposed that allows one to reduce the concentration of stresses in the construction design and to eliminate the risk of mechanical failures in the power buses.

Keywords

life cycle contract, power bus, reversible convertor, CAD-model, CAE-model, modal analysis, harmonic analysis, vibration

For citation

Davydov Yu. A., Mukhin O. O., Zabolotnyi V. V. Issledovanie mekhanicheskikh vozdeystvii na silovye shiny vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya-4000-2M elektrovozov 2 (3, 4)ES5K [Research of mechanical effects on power buses of a reversible converter-4000-2M of electric locomotives 2 (3, 4) ES5K]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 170–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).170-177

Article Info

Received: 13.03.2021, Revised: 20.03.2021, Accepted: 23.03.2021

Введение

В рамках контракта жизненного цикла, заключенного между ОАО «Российские железные дороги» и АО «Рослокомотив», продолжается поставка в эксплуатационные локомотивные депо железных дорог новых локомотивов серии 2, (3, 4)ЭС5К производства ООО «Производственная компания «Новочеркасский электровозостроительный завод» [1, 2].

Выпускаемая продукция локомотивостроительного завода должна обеспечивать установленные параметры надежности и соответствовать ГОСТ Р 55364-2012 «Электровозы. Общие технические требования» [3, 4].

При проектировании локомотивов недостаточно ограничиваться только статическим линейным и нелинейным анализами конструкции, необходимо проводить исследование линейной динамики конструкции. Однако реальные эксплуатационные нагрузки и воздействия на отдельные узлы и элементы локомотивов сложно предсказать только в рамках проектирования.

Так контрактом жизненного цикла предусмотрен комплекс работ по улучшению технико-экономических характеристик тягового подвижного состава путем замены его составных частей на более совершенные [1, 2].

В ходе эксплуатации новых электровозов зафиксированы многократные изломы токоведущих силовых шин выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) в местах крепления их к силовым контактам (рис. 1). Для устранения данного недостатка завод модернизировал конструкцию путем установки металлических фланцев (рис. 1). Однако данное мероприятие в полной мере не оправдало ожидания.

Моделирование силовой токоведущей шины выпрямительно-инверторного преобразователя

С целью исследования механических воздействий на объект при эксплуатации локомотивов раз-

работана CAE-модель в программном комплексе «SolidWorks Simulation» (рис. 2) [5–8]. Конструкция состоит из шины, двух планок для ограничения перемещения конструкции, прикрепленных к шине через текстолитовые изоляторы [9].

Для упрощения исследования сделаны следующие допущения: модель представляет собой цельную связанную конструкцию без болтовых соединений (в связи с отсутствием дефектов в данном узле); коэффициент демпфирования принят 0,01; использована жесткая связь в местах заделки; материал токоведущей шины – алюминий, изоляторов – текстолит, планок – железо (в соответствии с реальными материалами устройства).

Модальный и гармонический анализы конструкции

Перед оценкой надежности по критерию максимального напряжения в конструкции целесообразно провести модальный анализ в «Simulation» [5–8, 10–13].

Известно, что в соответствии с пунктом 4.5 ГОСТ Р 55364-2012 оборудование электровоза должно быть рассчитано для работы при вибрационных нагрузках по группам механического исполнения М25, М26, М27 [4]. Токоведущая шина относится к группе М25 по ГОСТ 30631-99 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим воздействующим факторам при эксплуатации» [14]. В соответствии с Приложением Б ГОСТ 30631-99 максимальная амплитуда ускорения при вибрационных воздействиях для группы М25 составляет 10 м/с^2 [12–16].

По результатам частотного анализа получено 50 значений собственных частот (мод) конструкции (рис. 3), которым соответствуют значения коэффициента массового участия k , характеризующего вкладом массы в колебания изделия [17, 18]. На графике собственные частоты конструкции соответствуют точкам резкого возрастания коэффициента массового

участия по всем осям координат (рис. 3). Частоты 19,2 Гц, 36,9 Гц, 144,9 Гц, 158,3 Гц наиболее близки к реальным частотам вибрации в локомотиве и соответствуют наибольшим коэффициентам массового участия – 0,41 по оси z , 0,24 по оси z , 0,27 по оси x и

0,33 по оси y (рис. 3) [12, 13, 16]. Полученные частоты при совпадении с частотой вынужденных колебаний могут вызвать резонанс в конструкции силовой шины [19, 20].

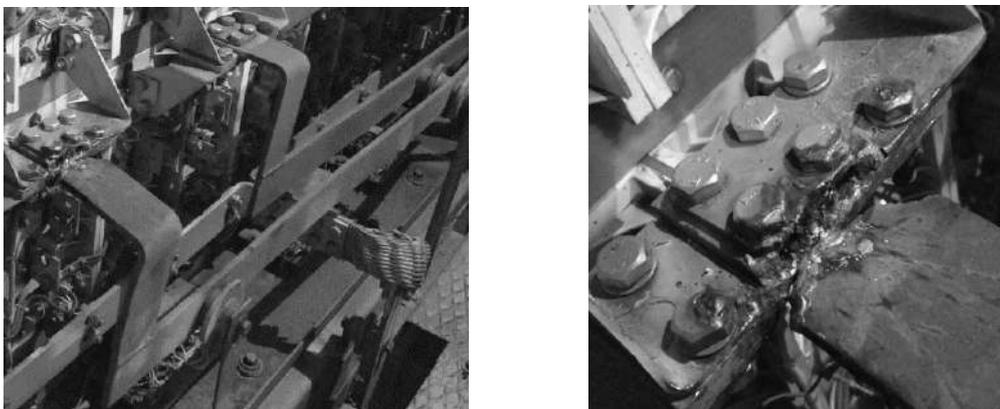


Рис. 1. Дефекты шины в месте крепления
Fig. 1. Defects of the bus at the attachment point

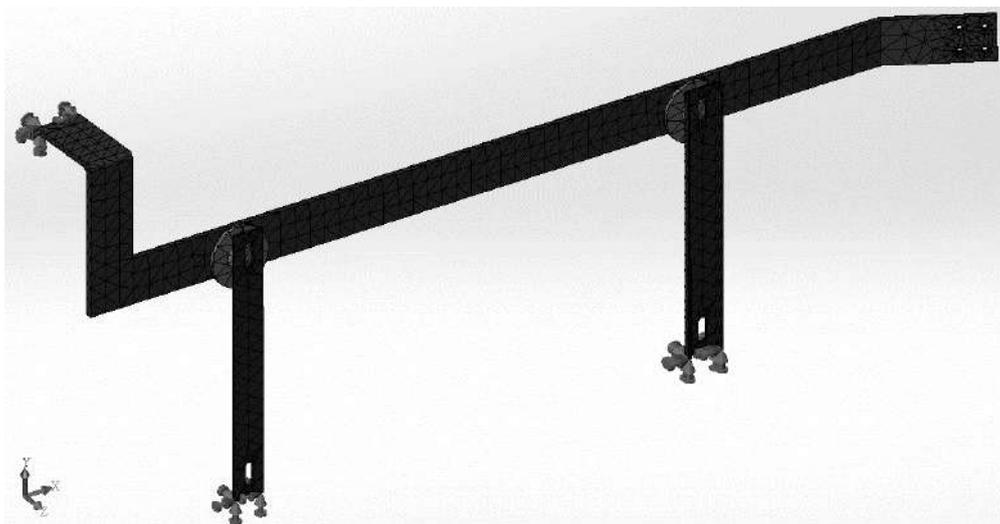


Рис. 2. САЕ-модель токоведущей шины выпрямительно-инверторного преобразователя
Fig. 2. CAE-model of the current-conducting bus of the reversible converter

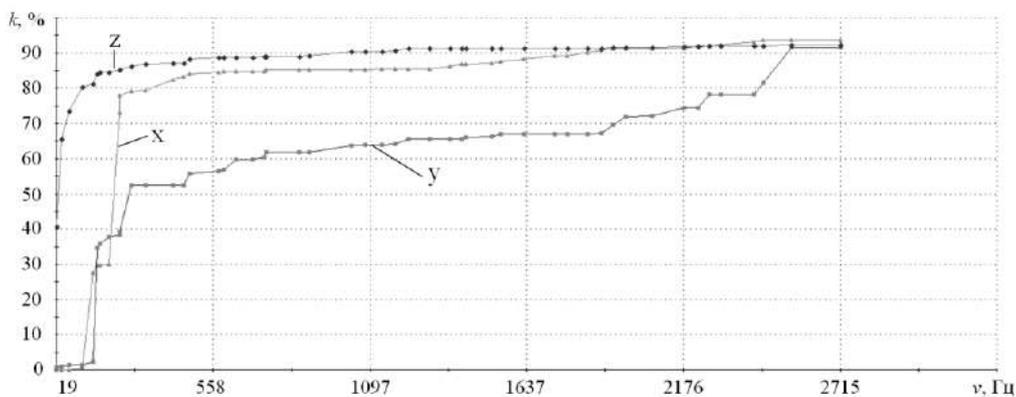


Рис. 3. График зависимости частоты от коэффициента массового участия
Fig. 3. The graph of the dependence of the frequency on the mass participation factor

Далее представлены графики форм колебания при резонансных частотах (рис. 4) [19]. Наибольшее негативное влияние на крепления силовой токоведущей шины к выводу ВИП оказывает форма колебания при частоте 158,3 Гц (рис. 4, *з*) в результате того, что металлические планки, фиксирующие конструкцию, при вибрации в данном направлении создают момент по оси *y* и перемещение шины по оси *z* [5–8].

Гармонический расчет конструкции при частоте колебаний 158,3 Гц подтверждает возникновение опасного механического воздействия на место крепления алюминиевой шины к выводу ВИП (рис. 5, *б*) [5–8, 21]. Максимальные напряжения концентрируются в месте крепления.

Представлена амплитудно-частотная характеристика (далее – АЧХ) по оси *z*, где амплитуда представляет собой напряжение в пяти точках в местах крепления токоведущей шины (рис. 6). Максимальные пики амплитуды напряжения соответствуют значениям собственных частот модального анализа [19, 23].

При резонансной частоте 158,3 Гц максимальное

напряжение составляет 58 МПа. Данная нагрузка является критической для токоведущей шины из алюминия [22]. Стоит отметить, что в реальных условиях протекающий по шине ток в месте контакта вызывает повышенный нагрев шины [9].

В результате нагрева механические свойства в отношении предела текучести снижаются [22, 24]. Представляется целесообразным провести модернизацию конструкции путем увеличения жесткости планок крепления.

Модернизация креплений силовой токоведущей шины выпрямительно-инверторного преобразователя

Для увеличения жесткости конструкции проведена замена используемых плоских планок на планки с угловым профилем 40×40×4 мм (рис. 7). При этом график зависимости частоты от коэффициента массового участия принимает вид (рис. 8). Частота 158,3 Гц для такой конструкции больше не является резонансной частотой. Зона резонанса по оси *y* сместилась на частоту 443,7 Гц, коэффициент при этом составляет 0,19.

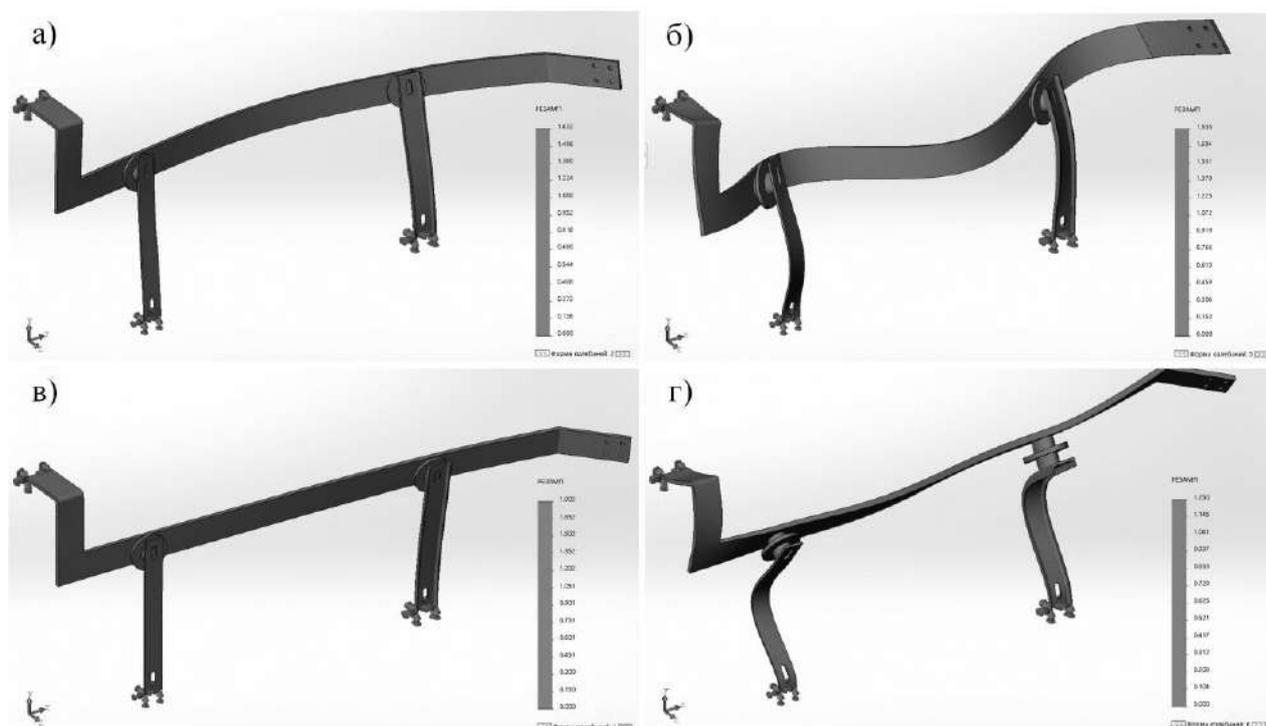


Рис. 4. Графики форм колебания при собственных частотах:

a – частота колебаний 19,19 Гц, коэффициент массового участия 0,41 по оси *z*; *б* – частота колебаний 144,9 Гц, коэффициент массового участия 0,27 по оси *x*; *в* – частота колебаний 36,9 Гц, коэффициент массового участия 0,24 по оси *z*; *г* – частота колебаний 158,3 Гц, коэффициент массового участия 0,33 по оси *y*

Fig. 4. Graphs of vibration modes at natural frequencies:

a – vibration frequency 19,19 Hz, mass participation factor is 0,41 along the *z*-axis; *b* – vibration frequency 144,9 Hz, mass participation factor is 0,27 along the *x*-axis; *c* – the oscillation frequency is 36,9 Hz, mass participation factor is 0,24 along the *z*-axis; *d* – vibration frequency 158,3 Hz, mass participation factor is 0,33 *y*-axis

График напряжений и формы колебания модернизированной конструкции при частоте 158,3 Гц принимает вид (рис. 9), при этом максимальное напряжение составляет менее 3 МПа и является не критическим для конструкции [22, 24]. При увеличении жесткости конструкции напряжения становятся меньше предела текучести алюминия [19, 20, 22, 24].

Представлена АЧХ САЕ-модели с планками для

крепления токоведущей шины 40×40×4 мм (рис. 10). Максимальные пики амплитуды напряжения возникают при частотах 30,8 Гц, 72,5 Гц, 157,5 Гц, 175,5 Гц, 219,3 Гц и при соответствующих им напряжениях 2 МПа, 4 МПа, 9 МПа, 7 МПа, 11 МПа [19, 21]. Полученные значения напряжения ниже, чем у модели со штатными планками для крепления шины ВИП.

Таким образом, применение планок для крепле-

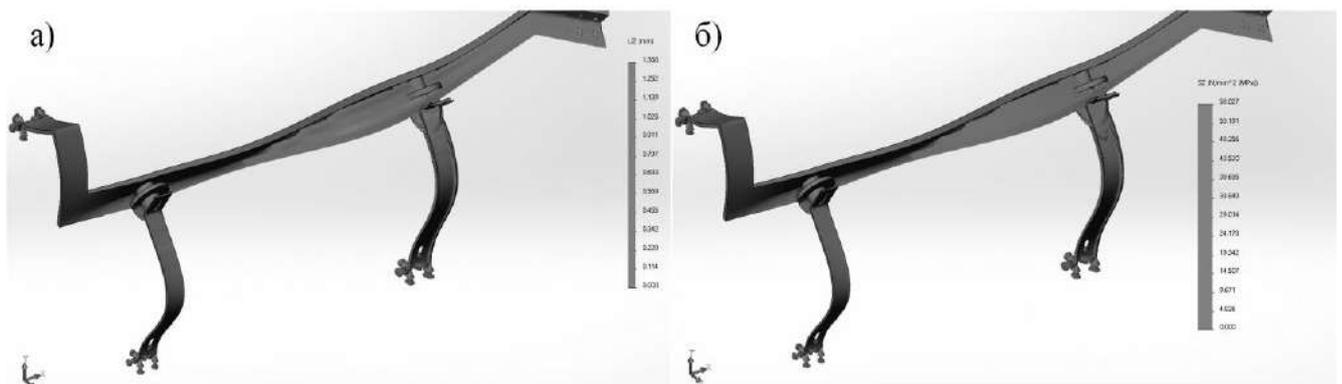


Рис. 5. Результаты гармонического расчета при опасной частоте колебания 158,3 Гц:
а – график перемещений по оси z; б – график напряжений по оси z

Fig. 5. Results of harmonic calculation at a dangerous oscillation frequency of 158,3 Hz:
a – a graph of displacements along the z-axis; b – graph of stresses along the z-axis

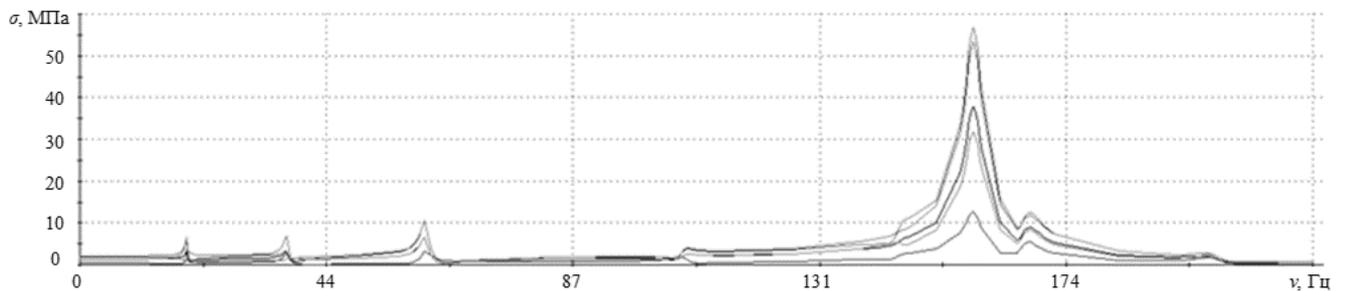


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика конструкции
Fig. 6. Frequency response of the construction design

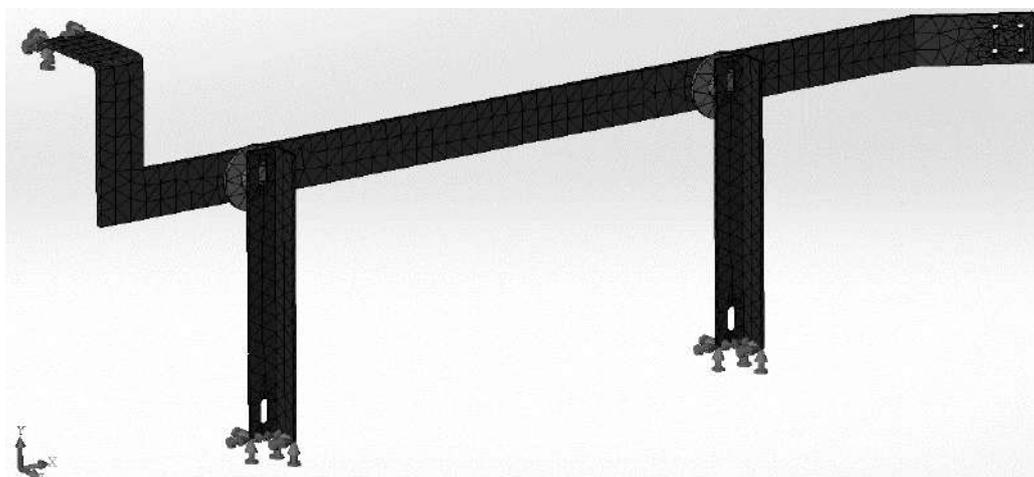


Рис 7. САЕ-модель с планками для крепления токоведущей шины 40×40×4 мм
Fig 7. CAE-model with strips for fixing the current-conducting bus 40×40×4 mm

ния с угловым профилем 40×40×4 мм позволит снизить механические напряжения в местах контакта токоведущей шины к выводам ВИП в 5 раз, исключить случаи излома шины. Кроме того, для замены штатных планок на планки с угловым профилем не требуется производить дополнительные монтажные работы – крепление планок с угловым профилем производится аналогично штатным. Стоимость модернизации для одной нижней шины составляет

800 руб., при этом для замены планок всех секций локомотива 3ЭС5К потребуется 4 800 руб.

Заключение

По результатам модального и гармонического анализов токоведущей шины ВИП сделан вывод о возникновении в эксплуатации недопустимых предельных напряжений в конструкции, вызванных вибрационными нагрузками. В результате чего

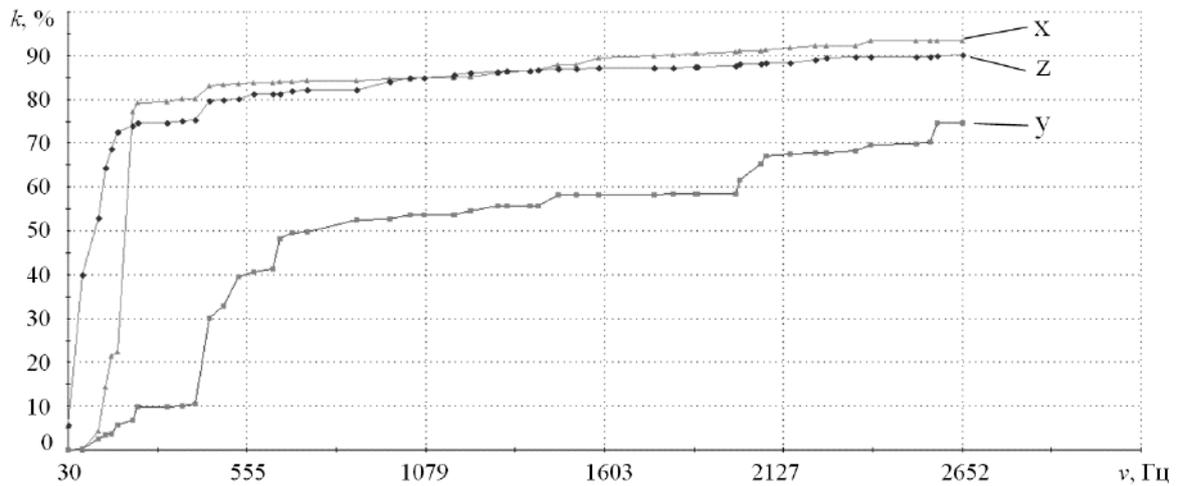


Рис. 8. График зависимости частоты от коэффициента массового участия измененной конструкции
Fig. 8. Graph of the dependence of frequency on the mass participation factor of a modified construction design

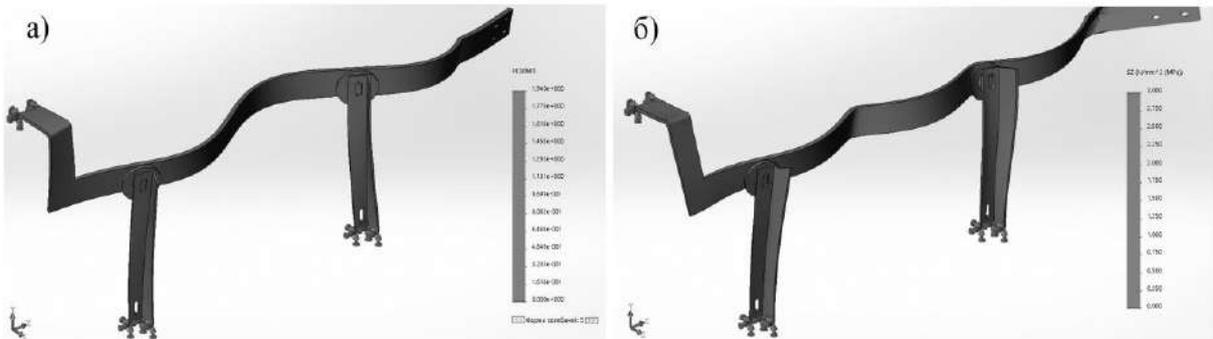


Рис. 9. Результаты расчета при частоте колебаний 158,3 Гц:
a – график формы колебания по оси *z*; *b* – график напряжений по оси *z*
Fig. 9. Calculation results at a vibration frequency of 158,3 Hz:
a – a graph of the waveform along the *z*-axis; *b* – a graph of stresses along the *z*-axis

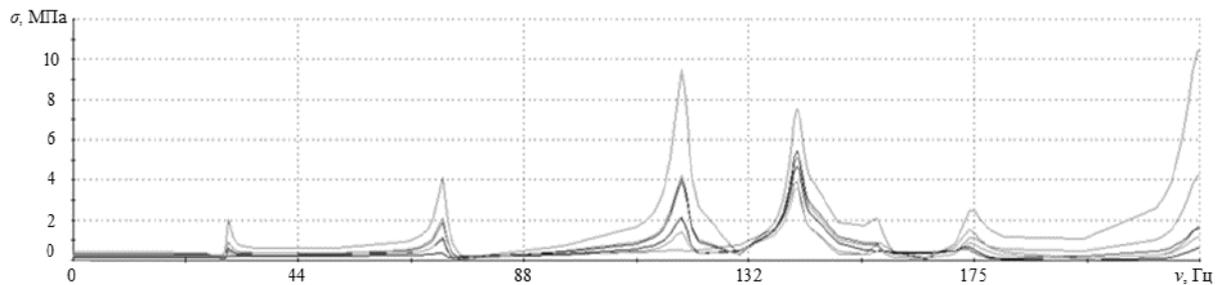


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика измененной конструкции
Fig. 10. Frequency response of a modified construction design

предложено провести модернизацию крепления токоведущей шины ВИП путем применения, вместо штатных планок крепления шины планки с угловым профилем 40×40×4 мм, что позволит исключить

случаи излома шин в местах контакта к выводам ВИП, повысив при этом прочность конструкции в 5 раз, при низкой стоимости модернизации.

Список литературы

1. Всерьез и надолго // Train and Brain : электрон. журн. URL: [https:// trainandbrain.ru/maintheme/vseriezinadolgo](https://trainandbrain.ru/maintheme/vseriezinadolgo) (дата обращения 18.10.2020).
2. ГОСТ 31539-2012 Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения. Введ. 2014-01-01. 14 с.
3. ГОСТ 33943-2016 Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Термины и определения. Введ. 2017-09-01. 40 с.
4. ГОСТ Р 55364-2012. Электровозы. Общие технические требования. М. : Изд-во стандартов, 2012. 62 с.
5. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. СПб. : БХВ-Петербург, 2012. 445 с.
6. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов. Задачи, методы, рекомендации. М. : ДМК-Пресс, 2015. 562 с.
7. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М. : ДМК-Пресс, 2019. 566 с.
8. Kurowski Paul M. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2020 // Design Generator Inc. 2020. 604 с. ISBN 978-1-63057-325-6.
9. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К, 4ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 1. Описание и работа. Электрические схемы. Новочеркасск, 2006. 251 с.
10. Справка по SolidWorks. Критерий максимального напряжения. URL: solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Maximum_Stress_Criterion_2.htm (дата обращения 18.10.2020).
11. Справка по SolidWorks. Модальный анализ временной диаграммы. URL: http://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Modal_Time_History_Analysis.htm?verRedirect=1 (дата обращения 20.10.2020).
12. Вибрации в технике. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / И.И. Блехман и др. М. : Машиностроение, 1979. 351 с.
13. Блехман И.И. Вибрационная механика. М. : Физматлит, 1994. 391 с.
14. ГОСТ 30631-99. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации. М. : ИПК Изд-во стандартов, 1999. 36 с.
15. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения. М. : ИПК Изд-во стандартов, 1980. 73 с.
16. Челомей В.Н. Диментберга Ф.М., Колесникова К.С.. Вибрации в технике: Колебания машин, конструкций и их элементов: справочник в 6 т. М. : Машиностроение, 1980. 544 с.
17. Справка по SolidWorks. Массовое участие. URL: http://help.solidworks.com/2012/russian/SolidWorks/cworks/IDH_HELP_LIST_MASS_PARTICIPATION.htm (дата обращения 01.10.2020).
18. Биргера И.А. Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания : справочник. Т. 2. М. : Машиностроение, 1968. 831 с.
19. Ходжаев К.Ш. Резонансные и нерезонансные случаи в задаче о возбуждении механических колебаний // Прикладная математика и механика. 1968. Т. 32, № 1. С. 85–100.
20. Erofeev V.I. Plehov A.S., Titov D.U. Electromechanic installations vibration acceleration protection system // International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing. Shenzhen, 2014. С. 75–77.
21. Справка по SolidWorks. Гармонический анализ. URL: http://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Harmonic_Analysis.htm?verRedirect=1 (дата обращения 05.12.2020).
22. Биргер И.А. Шор Б.Ф., Шнейдерович Р.М. Расчет на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1966. 616 с.
23. Кононенко В.О. Нелинейные колебания механических систем. Киев : Наук. думка, 1980. 382 с.
24. Краткий справочник для инженеров и студентов: Высшая математика. Теоретическая механика. Сопротивление материалов / А.Д. Полянин и др. М. : Международная программа образования, 1996. 432 с.

References

1. Vser'ez i nadolgo – Train and Brain. [For the long haul – Train and Brain] [Electronic media]. URL: [https:// trainandbrain.ru/maintheme/vseriezinadolgo](https://trainandbrain.ru/maintheme/vseriezinadolgo).
2. GOST 31539-2012 Tsikl zhiznenniy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Terminy i opredeleniya [GOST 31539-2012 Life cycle of railway rolling stock. Terms and definitions], 2014-01-01, 14 p.
3. GOST 33943-2016 Nadezhnost' zheleznodorozhnogo tyagovogo podvizhnogo sostava. Terminy i opredeleniya [GOST 33943-2016 Reliability of railway traction rolling stock. Terms and definitions], 2017-09-01. 40 p.
4. GOST R 55364-2012. Elektrovozy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [GOST R 55364-2012. Electric locomotives. General technical requirements]. Moscow: IPK Izdate'stvo standartov Publ., 2012. 62 p.
5. Alyamovskii A.A. SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi [SolidWorks Simulation. How to solve practical problems]. St. Petersburg: «BKHV-Petersburg» Publ., 2012. 445 p.
6. Alyamovskii A.A. SolidWorks Simulation. Inzhenernyi analiz dlya professionalov. Zadachi, metody, rekomendatsii [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals. Problems, methods, recommendations]. Moscow: «DMK-Press» Publ., 2015. 562 p.
7. Alyamovskii A.A. Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: «DMK-Press» Publ., 2019. 566 p.

8. Kurowski P.M. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2020. Design Generator Inc. Publ., 2020. 604 p.
9. Электровоз магистрал'nyi 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Рукoвoдствo пo экcплуaтaции. Книгa 1. Oпиcaниe и рaбoтa. Элeктричeскиe cхeмы [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). An operation manual. Book 1. Description and work. Electrical diagrams]. Novocheboksak, 2006. 251 p.
10. Spravka po SolidWorks. Kriterii maksimal'nogo napryazheniya [Help on SolidWorks. Maximum voltage criterion] []. URL: solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Maximum_Stress_Criterion_2.htm.
11. Spravka po SolidWorks. Modal'nyi analiz vremennoi diagrammy [Help on SolidWorks. Modal analysis of the timing diagram] [Electronic media]. URL: http://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Modal_Time_History_Analysis.htm?verRedirect=1. Accessed: ???
12. Blekhan I.I. et al. Vibratsii v tekhnike, T. 2. Kolebaniya nelineynykh mekhanicheskikh sistem [Vibrations in technology, Vol. 2. Oscillations of nonlinear mechanical systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 351 p.
13. Blekhan I.I. Vibratsionnaya mekhanika [Vibration mechanics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1994. 391 p.
14. GOST 30631-99. Obshchie trebovaniya k mashinam, priboram i drugim tekhnicheskim izdeliyam v chasti stoikosti k mekhanicheskim vneshnim voz-deystvuyushchim faktoram pri ekspluatatsii [General requirements for machines, devices and other technical products in terms of resistance to mechanical external factors during operation]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 36 p.
15. GOST 24346-80. Vibratsiya. Terminy i opredeleniya [Vibration. Terms and definitions]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1980. 73 p.
16. Chelomei V.N., Dimentberg F.M., Kolesnikov K.S. Vibratsii v tekhnike: Kolebaniya mashin, konstruksii i ikh elementov: spravochnik v 6-ti t [Vibrations in technology: Oscillations of machines, structures and their elements: a reference book in 6 volumes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 544 p.
17. Spravka po SolidWorks. Massovoe uchastie [Help for SolidWorks. Mass participation]. URL: http://help.solidworks.com/2012/russian/SolidWorks/cworks/IDH_HELP_LIST_MASS_PARTICIPATION.htm.
18. Birger I.A., Panovko Ya.G. Prochnost', ustoychivost', kolebaniya. Spravochnik v 3-kh t. T. 2. [Strength, stability, fluctuations. A reference book in 3 volumes. Vol. 2]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. 831 p.
19. Khodzhaev K.Sh. Rezonansnye i nerezonansnye sluchai v zadache o vozbuzhdenii mekhanicheskikh kolebaniy [Resonant and nonresonant cases in the problem of excitation of mechanical vibrations]. *Prikladnaya matematika i mekhanika [Applied Mathematics and Mechanics]*, 1968. Vol. 32. No. 1. Pp. 85–100.
20. Erofeev V.I., Plekhov A.S., Titov D.U. Electromechanic installations vibration acceleration protection system. *International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing (16–17 November 2014, Shenzhen)*, 2014. Pp. 75–77.
21. Spravka po SolidWorks. Garmonicheskii analiz [Help on SolidWorks. Harmonic analysis] [Electronic media]. URL: http://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/Cworks/c_Harmonic_Analysis.htm?verRedirect=1.
22. Birger I.A., Shor B.F., Shneiderovich R.M. Raschet na prochnost' detalei mashin [Strength calculation of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1966. 616 p.
23. Kononenko V.O. Nelineinye kolebaniya mekhanicheskikh sistem [Nonlinear vibrations of mechanical systems]. Kiev: Nauk. Dumka Publ., 1980. 382 p.
24. Polyani A.D. et al. Kratkii spravochnik dlya inzhenerov i studentov: Vysshaya matematika. Teoreticheskaya mekhanika. Soprotivlenie materialov [A short guide for engineers and students: Higher mathematics. Theoretical mechanics. Resistance of materials]. Moscow: International Education Program Publ., 1996. 432 p.

Информация об авторах

Давыдов Юрий Анатольевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: puch@festu.khv.ru.

Мухин Олег Олегович – аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: muhinoo@mail.ru.

Заболотный Владимир Владимирович – аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: zabolotnyy_vv@mail.ru.

Information about the authors

Yurii A. Davydov – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: puch@festu.khv.ru.

Oleg O. Mukhin – Ph.D. student of the Subdepartment of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: muhinoo@mail.ru.

Vladimir V. Zabolotnyi – Ph.D. student of the Subdepartment of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: zabolotnyy_vv@mail.ru.

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).177-183

УДК 625.031.3

Модель генератора эквивалентных вертикальных неровностей железнодорожного пути

Э. Л. Михайлов✉

Восточно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация

✉ DomatDynamics@yandex.ru