

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья
УДК 629.4.028:620.178.35
DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-297-305
EDN: <https://elibrary.ru/fdnctq>



ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ СЦЕПНЫХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

В. И. Беляев✉, **Д. В. Горский**, **Д. А. Ступин**, **А. Н. Коньшков**

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. До настоящего времени требования к сцепным и автосцепным устройствам пассажирских вагонов локомотивной тяги и электропоездов были полностью идентичными, несмотря на значительно более низкий уровень продольных сил при движении моторвагонного подвижного состава с распределенной тягой. С появлением специализированных конструкций сцепных устройств для электропоездов были разработаны требования к прочности, позволяющие создавать новые модели с меньшими габаритами и массой. Опыт эксплуатации показал возможность разрушения деталей сцепок, приводящего к расцеплению поездов. Причиной произошедших случаев могли быть усталостные повреждения. Однако результатов исследований нагруженности сцепок электропоездов в эксплуатации, на основании которых можно было разработать нормативные требования к специализированным сцепным устройствам, не существовало.

Материалы и методы. Проведены измерения сил, действующих в сцепках электропоездов различных категорий и типов при штатной эксплуатации, определены частоты возникновения сил различного уровня. По результатам обработки полученных данных построены гистограммы распределения размахов продольных сил, действующих на межвагонные сцепки, и параметра, характеризующего накопление усталостных повреждений, на 100 тыс. км пробега.

Результаты. По результатам обработки экспериментальных данных выполнен расчет накопления усталостных повреждений сцепок и установлены требования к их ресурсу. Также разработаны методики испытаний по определению прочности и сопротивлению усталости при многоцикловых и малоцикловых режимах нагружения. Дано обоснование введения в методику обработки результатов испытаний поправочного коэффициента, позволяющего выполнять ресурсные испытания на оборудовании с различными значениями коэффициента асимметрии цикла нагружения.

Обсуждение и заключение. Определена нагруженность сцепных устройств при эксплуатации электропоездов, на основании которой разработаны технические требования и методики испытаний, утвержденные ОАО «РЖД». В соответствии с этими нормативными документами будет осуществляться разработка и приемка всех новых моделей сцепных устройств для электропоездов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электропоезда, сцепные устройства электропоездов, силы при штатной эксплуатации, требования к прочности, требования к сопротивлению усталости, методика испытаний

Для цитирования: Беляев В. И., Горский Д. В., Ступин Д. А., Коньшков А. Н. Определение нагруженности сцепных устройств электропоездов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 297–305. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-297-305>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.028:620.178.35

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-297-305

EDN: <https://elibrary.ru/fdnctq>



EVALUATION OF PREVAILING DRAFT LOADS IN THE COUPLINGS OF THE ELECTRIC TRAINS

Vladimir I. Belyaev✉, Dmitriy V. Gorskiy,
Dmitriy A. Stupin, Alexander N. Konyshkov

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Until now, the requirements for manual and automatic couplers for locomotive-hauled passenger carriages and electric trains have been completely identical, despite the significantly lower level of longitudinal forces during the movement of multi-unit rolling stock with distributed traction. The introduction of specialised designs of coupling devices for electric trains led to the development of strength requirements that enable the creation of new models with smaller dimensions and weight. Operating experience has shown that parts of couplings may be destroyed, leading to the uncoupling of trains. Fatigue damage may cause accidents. However, there were studies of the draft loads of electric trains couplers in operation, on the basis of which it was possible to develop regulatory requirements for specialised coupling devices.

Materials and methods. The authors measured the forces acting in the couplings of electric trains of various categories and types during normal operation, as well as the frequencies of the occurrence of forces of various levels. The article includes histograms based on the results of processing the received data showing the distribution of longitudinal forces acting on the inter-car couplers and the parameter characterising the accumulation of fatigue damage per 100,000 km.

Results. According to the results of processing of the experimental data, the calculation of the accumulation of fatigue damage to the couplers was carried out and the requirements for their expected service life were established. Test procedures have also been developed to evaluate strength and fatigue resistance under high-cycle and low-cycle loading conditions. The article provides ground for introducing a correction factor into the procedure for processing test results, which makes it possible to perform life tests on equipment with different values of the load cycle asymmetry factor.

Discussion and conclusion. The authors have evaluated the draft loads in coupling devices during the operation of electric trains, on the basis of which technical requirements and test methods were developed and approved by JSC Russian Railways. Development and acceptance of all new models of coupling devices for electric trains will be carried out in accordance with these regulatory documents.

KEYWORDS: electric trains, electric train couplers, normal operation forces, strength requirements, fatigue resistance requirements, testing methodology

For citation: Belyaev V. I., Gorskiy D. V., Stupin D. A., Konyshkov A. N. Evaluation of prevailing draft loads in the couplings of the electric trains. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):297-305. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-297-305>.

✉ belyaev.vladimir@vniizht.ru (V. I. Belyaev)

© Belyaev V. I., Gorskiy D. V., Stupin D. A.,
Konyshkov A. N., 2022

Введение. При проведении приемочных и сертификационных испытаний сцепных и автосцепных устройств необходимым является экспериментальное подтверждение соответствия требованиям ТР ТС 001/2011 [1] по обеспечению безопасности в течение назначенного срока службы или ресурса при воздействии нагрузок, которым они могут подвергаться в процессе эксплуатации. Однако до настоящего времени отсутствовали какие-либо нормативные документы, устанавливающие требования к усталостной прочности сцепных/автосцепных устройств, предназначенных для эксплуатации в электропоездах. Также отсутствовали и стандартизированные методики проведения испытаний по этому показателю. Вследствие этого определение соответствия сцепок требованиям ТР ТС 001/2011 зависело от испытательного центра, т. е. не являлось объективным.

Вместе с тем в последнее десятилетие на пассажирском подвижном составе ОАО «РЖД» появилось несколько разнообразных конструкций специализированных сцепных устройств, которые не обладают таким огромным запасом по прочности и сопротивлению усталости, как было ранее при повсеместном использовании автосцепки СА-3 на пассажирских вагонах локомотивной тяги и электропоездов. С появлением новых сцепных устройств уже произошло несколько случаев разрушения деталей сцепок, вызвавших расцепление вагонов в поезде. Такие события, даже единичные, вызывают более серьезные проблемы, чем обрывы автосцепок в грузовых поездах, поскольку создают угрозу жизни и здоровью людей. Эти обстоятельства обосновали необходимость проведения работы по изучению нагруженности сцепок в эксплуатации электропоездов.

На зарубежных железных дорогах также обращают внимание на возможность повреждений сцепок электропоездов вследствие несогласованности работы тормозов или тяговых двигателей, для исключения чего предложена сложная многоуровневая система активного гашения продольной вибрации [2].

Целью проведенной работы было определение нагруженности сцепных устройств при эксплуатации электропоездов и построение зависимостей статистического распределения действующих сил. Полученное распределение явилось основанием для создания нормативного документа, в котором установлены требования к прочности и особенно к сопротивлению усталости сцепных устройств электропоездов (ранее такие требования полностью отсутствовали: их не было ни в стандартах, ни в ведомственных документах, ни в результатах исследований), а также унифицированных методик испытаний.

Необходимо отметить, что выполненные исследования относятся только к продольным силам, переда-

ваемым через сцепки, хотя в штатных эксплуатационных режимах движения электропоездов при проходе горизонтальных и вертикальных кривых, а также относительных колебаниях вагонов возникают отклонения сцепки от продольной оси вагона. Однако отклонения в горизонтальной плоскости не вызывают значимых сил (все сцепки в расцепленном состоянии могут быть отклонены вручную), а уровни сил в вертикальной плоскости и частота (статистическая вероятность) их возникновения зависят от конструкции крепления сцепки, т. е. не могут быть стандартизованы в качестве единых для всех моделей сцепок, и в данной работе не рассматривались.

Определение нагруженности сцепок в эксплуатации.

На первом этапе работы определена нагруженность межвагонных сцепок электропоездов в эксплуатации. С этой целью была разработана программа и методика измерения сил, передаваемых через сцепки электропоездов в процессе эксплуатации.

В соответствии с этой программой было проведено измерение сил в сцепках четырех электропоездов различных категорий и типов:

- двенадцативагонном пригородном электропоезде ЭТ2М с автосцепками СА-3, эксплуатируемом на участке Москва — Конаково ГРЭС;
- пятивагонном городском электропоезде ЭС2Г, эксплуатируемом на Московском центральном кольце (МЦК);
- пятивагонном электропоезде ЭС2ГП дальнего следования, эксплуатируемом на участках Москва — Орел и Москва — Белгород (в сдвоенном режиме);
- пятивагонном электропоезде ЭС2ГП дальнего следования, эксплуатируемом на участке Москва — Иваново, включая движение по участку Владимир — Иваново с тепловозом ТЭП70БС в голове поезда.

С каждым электропоездом проведено по две поездки — при отрицательных и положительных температурах. Регистрация сил осуществлялась при штатной эксплуатации электропоездов с пассажирами. Частота регистрации сигнала составляла 50 Гц. Суммарный пробег электропоездов с регистрацией сил составил 9628 км.

Образцы записей скорости движения и реализации сил в межвагонных сцепках электропоезда ЭС2Г в поездке по МЦК показаны на рис. 1, 2, 3. Запись приведена для участка движения продолжительностью 4 ч 45 мин (по шкале абсцисс указаны порядковые номера точек опроса), сжимающие силы указаны с положительным знаком, растягивающие — с отрицательным.

Движение электропоезда состоит из частых разгонов, преимущественно до скорости 60–100 км/ч, и торможений (рис. 1).

Приведенные записи силы не являются шумом, что можно проиллюстрировать фрагментом записи

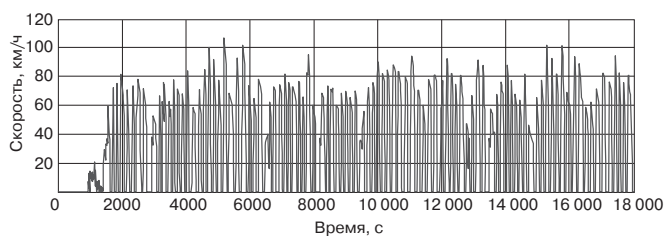


Рис. 1. Фрагмент записи скорости движения электропоезда ЭС2Г в поездке по МЦК

Fig. 1. Fragment of the speed recording of an ES2G electric train on a trip around the Moscow Central Circle

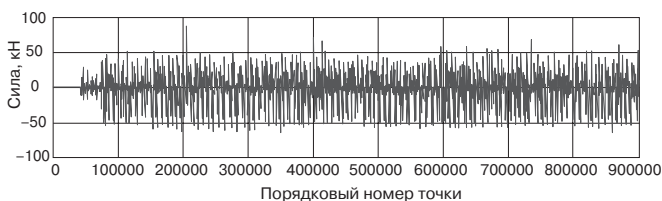


Рис. 2. Фрагмент записи реализации силы между головным моторным и прицепным вагонами (1 и 2 с головы состава) электропоезда ЭС2Г при движении по МЦК

Fig. 2. Fragment of the recording of the realisation of force between the head rail motor wagon and trailer car (1st and 2nd from the head of the train) of the ES2G electric train when moving along the Moscow Central Circle

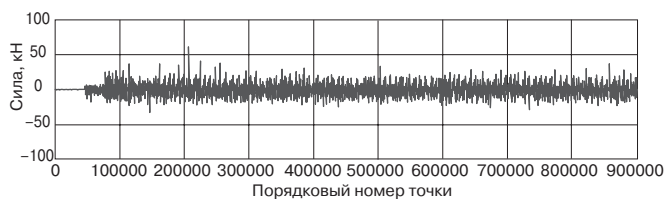


Рис. 3. Фрагмент записи реализации силы между прицепными вагонами (3 и 4 с головы состава) электропоезда ЭС2Г при движении по МЦК

Fig. 3. Fragment of the recording of the realisation of force between trailer cars (3rd and 4th from the head of the train) of the ES2G electric train when moving along the Moscow Central Circle

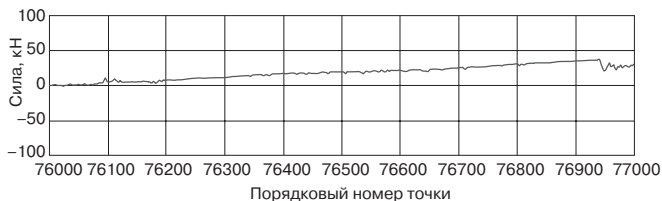


Рис. 4. Фрагмент записи реализации силы длительностью 20 с между вагонами 1 и 2 с головы состава электропоезда ЭС2Г по МЦК

Fig. 4. Fragment of the recording of the realisation of force with a duration of 20 s between cars 1 and 2 from the head of the ES2G electric train along the Moscow Central Circle

реализации силы с увеличенным масштабом по горизонтальной оси длительностью 20 с, приведенным на рис. 4.

Из рис. 2 и 3 видно, что уровень наиболее часто возникающих сил в сцепках между головным моторным и прицепным вагонами (номера 04 и 05) значительно выше, чем между двумя прицепными вагонами (номера 02 и 03): ± 50 и ± 25 кН соответственно. Это объясняется схемой формирования электропоездов ЭС2Г и ЭС2ГП, в которой только головные вагоны являются моторными, а промежуточные — прицепными. Поэтому в средней части состава усилия растяжения от головного моторного вагона близки к значению усилия сжатия, передаваемого от хвостового моторного вагона. На больший уровень размахов сил в межвагонной сцепке головного вагона и сцепленной с ней сцепки прицепного вагона может оказывать влияние совокупность нескольких факторов: непосредственное приложение нагрузки от моторного вагона, неодновременность возникновения растягивающих и сжимающих сил от головного и хвостового вагонов (даже при синхронном включении их двигателей) вследствие затрат времени на передачу сил через три прицепных вагона с поглощающими аппаратами. То же наблюдается у сцепок хвостового вагона (со сменой знаков нагрузки).

Максимальные силы в межвагонных сцепках пригородных электропоездов имели более высокий уровень, несмотря на то, что каждый прицепной вагон находился между двумя моторными. Фрагмент записи реализации силы в сцепке показан на рис. 5. Запись приведена для участка движения продолжительностью 5 ч 30 мин.

Приведенный на рис. 6 фрагмент записи реализации силы с увеличенным масштабом по горизонтальной оси длительностью 20 с (1000 точек с частотой регистрации 50 Гц) показывает значительные отличия от аналогичной диаграммы, приведенной на рис. 4 для электропоезда ЭС2Г, — здесь зарегистрированы кратковременные скачки силы (например, точки 1, 2 и 3). Это вызвано установкой между передним и задним упорами поглощающего аппарата на пригородных электропоездах в соответствии с ГОСТ 3475–81 [3] с усилием начальной затяжки, равным 25–80 кН (поглощающие аппараты Р-5П, которыми преимущественно оборудованы пригородные электропоезда прежних лет выпуска, имеют усилие начальной затяжки ближе к верхней границе этого диапазона). Вследствие этого при всех изменениях режима движения поезда (трогании, наборе тяги, торможении) сила увеличивается вплоть до 60–70 кН (точка 3 на рис. 6) практически скачкообразно, без какого-либо демпфирования. Установка поглощающих аппаратов между упорами без начальной затяжки запрещена всеми действующими нормативными документами.

Поглощающие аппараты модели Т-8П, установленные на электропоездах ЭС2Г и ЭС2ГП, имеют другую конструкцию и другой способ установки на вагоне, при котором обеспечивается демпфирование любых малых сил.

Влияние роста усилия начальной затяжки на увеличение продольных ускорений в пассажирских поездах было отмечено по результатам математического моделирования уже ранее [4]. Тем не менее установка поглощающих аппаратов на подвижной состав в соответствии с ГОСТ 3475–81, но без предварительного поджатия, при эксплуатации приведет к появлению продольных зазоров, что является браковочным признаком. Наличие и высокий уровень начальной затяжки пассажирских поглощающих аппаратов (входящих в состав сцепных устройств пассажирских вагонов локомотивной тяги, электро- и дизель-поездов) приводит к разнонаправленным результатам: увеличивает энергоемкость, что повышает защиту вагонов и пассажиров в нештатных ситуациях, а также исключает отбраковку аппаратов по причине появления зазоров между аппаратом и упорами, но ухудшает виброкомфорт пассажиров при действии продольных ускорений в эксплуатации и в некоторой степени усложняет условия продольной нагруженности сцепок в эксплуатации (как будет показано по результатам данных исследований).

Статистическая обработка результатов. Реализации зарегистрированных в поездках сил в сцепках являются случайными процессами, в связи с чем для проведения статистической обработки результатов была выполнена их схематизация методом «дождя», предусмотренная ГОСТ 25.101–83 [5].

Результатом проведенной статистической обработки стало построение гистограммы распределения размахов (двойных амплитуд) сил в сцепках и их количества в каждой поездке, приведенных к 100 тыс. км пробега. На рис. 7 приведена гистограмма распределения размахов продольных сил при эксплуатации пригородного электропоезда ЭТ2М, на рис. 8 — при эксплуатации городского электропоезда ЭС2Г на МЦК. Все гистограммы построены с логарифмической шкалой по оси ординат.

Распределение сил в сцепках электропоездов дальнего следования ЭС2ГП показало, что количество размахов сил уровня более 45–50 кН значительно ниже, чем в сцепках городского электропоезда ЭС2Г (рис. 8). Данное обстоятельство определяется значительно меньшим количеством остановок и троганий поезда на 100 тыс. км пробега, при которых возникают силы относительно высокого уровня. Вместе с тем эти поезда оборудуются сцепными устройствами одинаковых моделей, в связи с чем они должны отвечать более строгим требованиям, т. е. определенным условиям эксплуатации городского электропоезда.

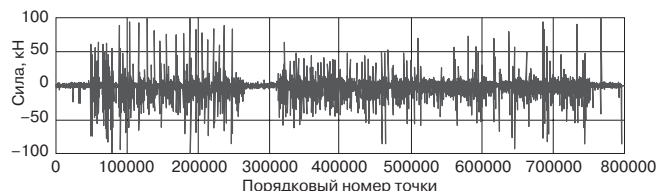


Рис. 5. Фрагмент записи реализации силы между вагонами электропоезда ЭТ2М при движении по участку Крюково — Москва — Конаково ГРЭС

Fig. 5. Fragment of the recording of the realisation of force between the cars of the ET2M electric train when moving along the Kryukovo — Moscow — Konakovo GRES section

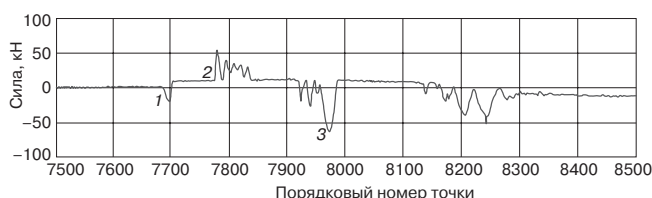


Рис. 6. Фрагмент записи реализации силы длительностью 20 с электропоезда ЭТ2М при движении по участку Крюково — Москва — Конаково ГРЭС: 1, 2, 3 — точки кратковременных скачков силы

Fig. 6. Fragment of the recording of the realisation of force with a duration of 20 s of the ET2M electric train when moving along the Kryukovo — Moscow — Konakovo GRES section: 1, 2, 3 — points of short-term power surges

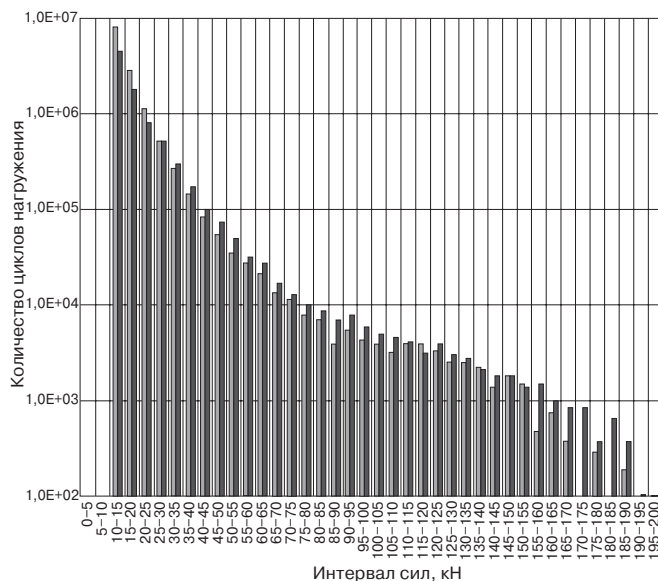


Рис. 7. Гистограмма распределения размахов продольных сил, действующих на межвагонные сцепки пригородного электропоезда ЭТ2М, на 100 тыс. км пробега: ■ — вагоны 02 и 03; ■ — вагоны 07 и 08

Fig. 7. Distribution histogram of the ranges of longitudinal forces acting on the inter-car couplers of the ET2M suburban electric train, per 100,000 km of run: ■ — cars 02 and 03; ■ — cars 07 and 08

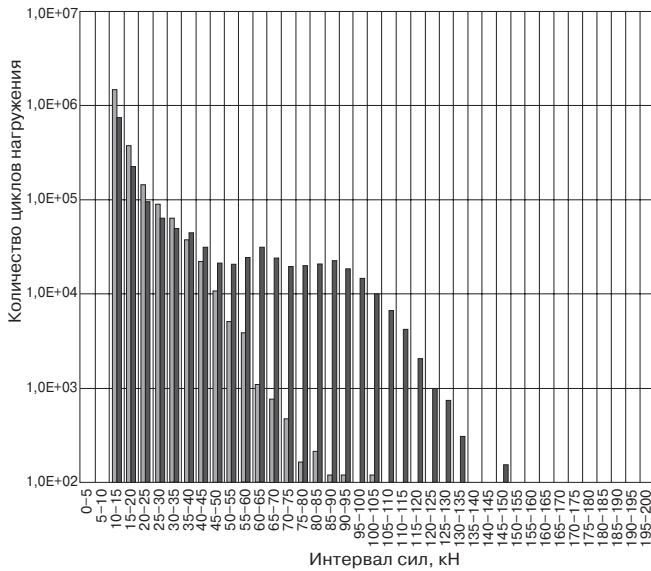


Рис. 8. Гистограмма распределения размахов продольных сил, действующих на межвагонные сцепки городского электропоезда ЭС2Г, на 100 тыс. км пробега:
 ■ — вагоны 02 и 03; ■ — вагоны 04 и 05

Fig. 8. Distribution histogram of the ranges of longitudinal forces acting on the inter-car couplers of the ES2G urban electric train, per 100,000 km of run:
 ■ — cars 02 and 03; ■ — cars 04 and 05

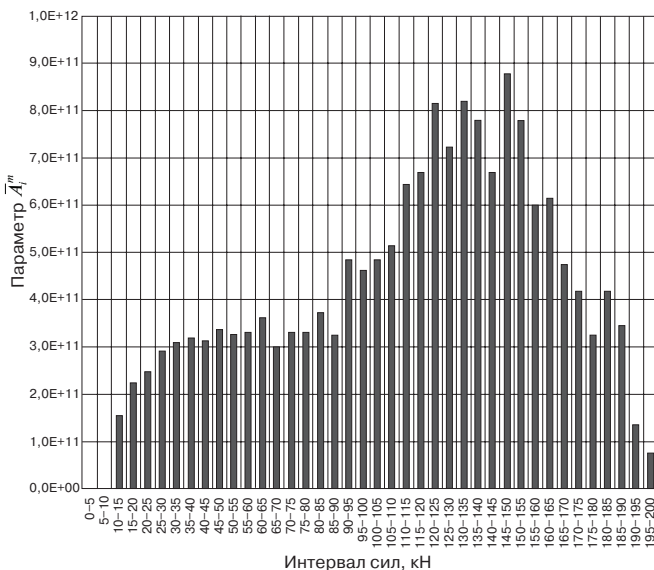


Рис. 9. Гистограмма распределения параметра \bar{A}_i^m , характеризующего накопление усталостных повреждений, для каждого диапазона размахов продольных сил на 100 тыс. км пробега (с линейной шкалой) в пригородном поезде

Fig. 9. Distribution histogram of the parameter \bar{A}_i^m , which characterises the accumulation of fatigue damage, for each range of longitudinal forces per 100,000 km of run (with a linear scale) in a suburban train

Накопление усталостных повреждений сцепки происходит вследствие воздействия переменных нагрузок всех уровней. Причем степень влияния дей-

ствующих напряжений σ определяется кривой усталости, которая во всем диапазоне долговечности в соответствии с нормами расчетов вагонов на прочность в редакции 1996 г. [6] имеет вид

$$\sigma_i^m N_i = \text{const}, \quad (1)$$

где σ_i , N_i — средний уровень напряжений класса i и их количество соответственно; m — показатель степени для кривой усталости, зависящий от вида термообработки: при нормализации $m = 4$, при закалке с отпуском $m = 5$.

Других нормативов в данной области не установлено, поэтому в работе были приняты указанные выше показатели степени для кривой усталости. Исходя из того, что сцепки могут подвергаться или нормализации, или закалке с отпуском, в расчете нагруженности сцепок учтены оба допускаемых варианта.

С учетом влияния нагрузок различных классов в степени $m = 4$ и $m = 5$ значимость нагрузок высокого уровня значительно возрастает. Гистограмма распределения параметра \bar{A}_i^m , характеризующего накопление усталостных повреждений, для сцепок с нормализацией в пригородном поезде имеет вид, приведенный на рис. 9.

Накопление усталостных повреждений соответствует площади приведенной гистограммы. Таким образом, для всего диапазона нагрузок и срока службы подвижного состава, для которого предназначена сцепка, требование к ресурсу сцепки T_p можно определить по формуле

$$T_p = \sum_{i=1}^k (\bar{A}_i^m N_i) T_c L_r 10^{-5} [n]^m, \quad (2)$$

где \bar{A}_i — среднее значение действующих сил класса нагрузки i , кН; T_c — срок службы подвижного состава, для которого предназначена сцепка (принимается равным 40 годам); L_r — средний годовой пробег подвижного состава, для которого предназначена сцепка (принимается равным 130 тыс. км для электропоездов с конструкционной скоростью 120 км/ч и 170 тыс. км для электропоездов с конструкционной скоростью 160 км/ч); $[n]$ — допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости (принимается равным 1,7).

Для сцепок, эксплуатируемых на городских электропоездах, значение параметра $\sum_{i=1}^k (\bar{A}_i^m N_i)$ ниже, чем для пригородного электропоезда. Однако разница их средних годовых пробегов (130 тыс. км у пригородного и 170 тыс. км у городского электропоезда) сокращает разницу между нагруженностью их сцепок за срок службы электропоезда (40 лет). Тем не менее наиболее тяжелые условия эксплуатации сцепок по показателю усталостной прочности наблюдаются на пригородных электропоездах, и параметры нагружен-

ности сцепок, зафиксированные на этих электропоездах, были приняты в качестве базовых при разработке требований к усталостной прочности.

Исходя из изложенного, значения требований к ресурсу сцепных устройств по нагруженности T_p , рассчитанные по формуле (2), составили:

- $7,38 \cdot 10^{15}$ кН⁴ (для сцепок с нормализацией);
- $1,43 \cdot 10^{18}$ кН⁵ (для сцепок с закалкой и отпуском).

Значения и размерности данного параметра не имеют понятного физического смысла, но устанавливают конкретные требования к сопротивлению усталости сцепок, которые возможно подтвердить испытаниями.

Методика испытаний на усталостную прочность.

Для подтверждения соответствия сцепок по показателю усталостной прочности разработана типовая методика таких испытаний, которые следует проводить путем циклического нагружения по одному из вариантов — с коэффициентом асимметрии цикла нагружения $R = P_{\min} / P_{\max}$, равным -1 ; 0 ; $0,1$ или $0,2$ (где P_{\min} и P_{\max} — минимальное и максимальное значение силы при циклическом нагружении). Значения размаха (двойной амплитуды) сил и количества циклов нагружения, соответствующих значению требуемого ресурса сцепки по нагруженности, рассчитывают по формуле

$$A_s^m N_s = T_p K_R, \quad (3)$$

где A_s — эквивалентный размах сил, кН; N_s — эквивалентное количество циклов нагружения с амплитудой сил A_s ; T_p — значение требования к ресурсу сцепки по нагруженности, рассчитанное по формуле (2); K_R — поправочный коэффициент, учитывающий влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения R .

Цель введения поправочного коэффициента заключается в следующем.

Предел выносливости при циклическом нагружении зависит не только от количества и размаха сил, но и от коэффициента асимметрии цикла нагружения. Наиболее тяжелым с точки зрения сопротивления усталости является симметричный знакопеременный цикл ($R = -1$), которому преимущественно соответствуют продольные силы, передаваемые через сцепки электропоездов в эксплуатации.

Вместе с тем существовавшие ранее методики усталостных испытаний сцепных устройств не устанавливали требований к проведению испытаний с конкретными значениями коэффициента асимметрии цикла нагружения (так как это накладывало бы значительные ограничения на оснащённость испытательным оборудованием). Однако это не препятствовало проведению испытаний в различных условиях, значительно влияющих на их результаты. Значение поправочного коэффициента K_R показывает требуемое увеличение количества нагружений при измене-

нии коэффициента асимметрии цикла R для обеспечения равного усталостного воздействия.

Исходя из соотношения значений предела выносливости стали σ_R при различных значениях коэффициента асимметрии цикла нагружения R , представленного в [7], поправочный коэффициент в общем случае можно описать уравнением

$$K_R = \frac{\sigma_R}{\sigma_{-1}} = \frac{2}{(1-R) + \psi(1+R)}, \quad (4)$$

где ψ — коэффициент влияния асимметрии цикла нагружения, зависящий от предела прочности стали σ_B . В диапазоне $-1 \leq R \leq 0,5$ он может быть определен по формуле, рекомендованной в ГОСТ 25.504–82 [8]:

$$\psi = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \sigma_B. \quad (5)$$

Расчеты показали, что более чем двукратная разница пределов прочности сталей, применяемых при изготовлении деталей сцепных устройств, незначительно (по сравнению с коэффициентом асимметрии цикла нагружения) влияет на значения поправочного коэффициента.

В связи с этим, а также с учетом возможности применения в конструкции сцепных устройств сборочных единиц, изготовленных из разных марок сталей, в разработанной методике установлены следующие значения поправочного коэффициента K_R , учитывающего влияние коэффициента асимметрии цикла R :

$$K_{-1} = 1,00 \text{ при } R = -1;$$

$$K_0 = 1,70 \text{ при } R = 0;$$

$$K_{0,1} = 1,80 \text{ при } R = 0,1;$$

$$K_{0,2} = 1,95 \text{ при } R = 0,2.$$

Такие испытания позволяют подтвердить соответствие требованиям к сопротивлению усталости при многоцикловых режимах нагружения.

Проведенные измерения сил в сцепках электропоездов подтвердили, что максимальные зарегистрированные значения продольных сил, действующих на сцепки ($+117/-128$ кН при сжатии/растяжении), намного ниже уровня, соответствующего нормативным требованиям к прочности сцепок ($+1500/-1000$ кН при сжатии/растяжении). Следовательно, повышение существующих нормативов не требуется.

Снижение требований к прочности сцепок также нецелесообразно по следующим причинам:

- поглощающие аппараты, входящие в состав сцепных устройств электропоездов, реализуют требуемую энергоёмкость при нормативной силе 1000 кН. Уменьшение этой силы приведет к соответствующему снижению энергоёмкости существующих аппаратов,

потребуется изменения действующих нормативов и параметров аппаратов;

- некоторые модели вагонов электропоездов имеют в своем составе крэш-элементы с усилением срабатывания в интервале 1500–2500 кН. Следовательно, сцепки не должны разрушаться при таких силах и обеспечивать их передачу на крэш-элементы;

- допускается движение сцепа вагонов электропоезда в составе другого поезда локомотивной тяги, где уровень сил выше;

- в соответствии с Правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [9] при сцеплении допускается подход локомотива к вагонам со скоростью 3 км/ч. Возникающая при этом сила определяется массой локомотива и параметрами поглощающих аппаратов сцепных устройств локомотива и электропоезда.

Указанный низкий уровень продольных сил в сцепках подтверждает, что их упругопластического деформирования в эксплуатации не происходит. Следовательно, усталостные повреждения могут возникать только при упругом деформировании, т. е. при многоцикловых режимах нагружения. Соответствие требованиям по сопротивлению усталости при малоцикловых режимах нагружения подтверждается результатами испытаний сцепок на прочность и специальных испытаний не требует.

Разработанные по результатам исследования технические требования к сцепным устройствам электропоездов и типовые методики их испытаний утверждены в качестве нормативного документа ОАО «РЖД» [10], что позволяет проводить исследовательские, предварительные и приемочные испытания этих устройств на соответствие единым нормативам по непротиворечивым типовым методикам.

Заключение. Результаты экспериментальных исследований показали, что наибольшей нагруженности подвергаются автосцепки СА-3, установленные на двенадцативагонном пригородном электропоезде ЭТ2М в соответствии с ГОСТ 3475–81.

Проведенный анализ спектра продольных сил в эксплуатации позволил установить нормативное распределение сил растяжения и сжатия для сцепных устройств электропоездов.

Для оценки соответствия сцепок электропоездов требованиям по показателю сопротивления усталости разработана типовая методика усталостных испытаний сцепных устройств на оборудовании с различными значениями коэффициента асимметрии цикла нагружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О безопасности железнодорожного подвижного состава [Электронный ресурс]: технический регламент Таможенного союза (ТР ТС 001/2011): принят решением Комиссии Таможенного союза

от 15 июля 2011 г. № 710 (в редакции решения Совета Евразийской экономической комиссии от 14 сентября 2021 г. № 90). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902293438> (дата обращения: 15.08.2022).

2. Jackiewicz J. Coupler force reduction method for multiple-unit trains using a new hierarchical control system // *Railway Engineering Science*. 2021. Vol. 29. P. 163–182.

3. ГОСТ 3475–81. Устройство автосцепное подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм. Установочные размеры: дата введения 1982-01-01. Переиздание с Изменениями № 1, 2, утвержденными в августе 1986 г., феврале 1991 г. (ИУС 11–86, 5–91). М.: Изд-во стандартов, 1998. 6 с.

4. Беляев В.И., Ступин Д.А. Сцепные и автосцепные устройства железнодорожного подвижного состава. М.: ТрансИнфо, 2012. 414 с.

5. ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов: дата введения 1984-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1983. 25 с.

6. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 316 с.

7. Жуков В.А., Михайлов Ю.К. Механика. Основы расчета и проектирования деталей машин: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2014. 348 с.

8. ГОСТ 25.504–82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости: дата введения 1983-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1982. 55 с.

9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Электронный ресурс]: утв. приказом Минтранса России от 23 июня 2022 г. № 250. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351240235?marker=6560Ю> (дата обращения: 15.08.2022).

10. Технические требования к прочности и сопротивлению усталости при малоцикловых и многоцикловых режимах нагружения сцепных устройств электропоездов и методики испытаний [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 7 апреля 2022 г. № 934/п // АСПИЖТ (дата обращения: 15.08.2022).

REFERENCES

1. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [On the safety of railway rolling stock]. Technical regulations of the Customs Union (TR TS 001/2011): adopted by the decision of the Commission of the Customs Union dated July 15, 2011 No. 710 (as amended by the decision of the Council of the Eurasian Economic Commission dated September 14, 2021 No. 90). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902293438> (access date: 15.08.2022). (In Russ.).

2. Jackiewicz J. Coupler force reduction method for multiple-unit trains using a new hierarchical control system. *Railway Engineering Science*. 2021;(29):163-182.

3. GOST 3475–81. Ustroystvo avtostsepnogo podvizhnogo sostava zheleznnykh dorog kolei 1520 (1524) mm. Ustanovochnye razmery [Automatic coupling device for rolling stock of 1520 (1524) mm gauge railways. Installation dimensions]. Introduction date 1982-01-01. Reissue. Moscow: Publ. house of standards; 1998. 6 p. (In Russ.).

4. Belyaev V.I., Stupin D.A. Stsepnnye i avtostsepnnye ustroystva zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Manual and automatic coupling devices of railway rolling stock]. Moscow: Transinfo Publ.; 2012. 414 p. (In Russ.).

5. GOST 25.101–83. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruksiy i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov [Calculations and strength tests. Methods for schematization of random processes of loading of machine elements and structures and statistical presentation of results]. Introduction date 1984-07-01. Moscow; 1983. 25 p. (In Russ.).

6. Normy rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznnykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Calculation and Design Norms for

1520 mm Gauge Railway Cars of the Ministry of Railways (non-self-propelled)]. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT Publ.; 1996. 316 p. (In Russ.).

7. Zhukov V.A., Mikhaylov Yu. K. Mekhanika. Osnovy rascheta i proektirovaniya detaley mashin [Mechanics. Fundamentals of calculation and design of machine parts]. Textbook. Moscow: INFRA-M Publ.; 2014. 348 p. (In Russ.).

8. GOST 25.504–82. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody rascheta kharakteristik soprotivleniya ustalosti [Calculations and strength tests. Methods for calculating fatigue resistance characteristics]. Introduction date 1983-07-01. Moscow: Publ. house of standards; 1982. 55 p. (In Russ.).

9. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation]. Approved by order of the Ministry of Transport of Russia dated June 23, 2022 No. 250. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351240235?marker=656010> (access date: 15.08.2022). (In Russ.).

10. Tekhnicheskie trebovaniya k prochnosti i soprotivleniyu ustalosti pri malotsiklovyykh i mnogotsiklovyykh rezhimakh nagruzheniya stsepykh ustroystv elektropoezdov i metodiki ispytaniy [Technical requirements for endurance and fatigue resistance under low-cycle and high-cycle loading modes of electric train coupling devices and testing methods]. Order of Russian Railways Company dated April 7, 2022 No. 934/r. ASPIZHT database (access date: 15.08.2022). (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Игоревич БЕЛЯЕВ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Центр испытаний и моделирования, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 273129, <https://orcid.org/0000-0003-1020-6865>

Дмитрий Вячеславович ГОРСКИЙ,

технический эксперт, научный центр «Нетяговый подвижной состав и автотормозные системы поезда», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 957048, <https://orcid.org/0000-0002-9060-3432>

Дмитрий Алексеевич СТУПИН,

канд. техн. наук, заведующий лабораторией, Центр испытаний и моделирования, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 444575, <https://orcid.org/0000-0002-2929-4087>

Александр Николаевич КОНЬШКОВ,

заместитель директора научного центра «Динамика и прочность тягового подвижного состава», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), <https://orcid.org/0000-0001-6083-1840>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. BELYAEV,

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Centre for Testing and Modelling, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 273129, <https://orcid.org/0000-0003-1020-6865>

Dmitriy V. GORSKIY,

Technical Expert, Non-Traction Rolling Stock and Automatic Brake Systems of Trains Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 957048, <https://orcid.org/0000-0002-9060-3432>

Dmitriy A. STUPIN,

Cand. of Sci. (Engineering), Head of Laboratory, Centre for Testing and Modelling, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 444575, <https://orcid.org/0000-0002-2929-4087>

Alexander N. KONYSHKOV,

Deputy Director of Dynamics and Strength of Traction Rolling Stock Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), <https://orcid.org/0000-0001-6083-1840>

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Игоревич БЕЛЯЕВ. Руководство работой, организация, проведение испытаний, обработка и анализ результатов (25%).

Дмитрий Вячеславович ГОРСКИЙ. Проведение испытаний, обработка результатов (25%).

Дмитрий Алексеевич СТУПИН. Анализ результатов испытаний (25%).

Александр Николаевич КОНЬШКОВ. Разработка методики и проведение статистической обработки результатов испытаний (25%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. BELYAEV. Work guidance, organisation and performing of testing, processing and analysis of the results (25%).

Dmitriy V. GORSKIY. Conducting the tests, processing the results (25%).

Dmitriy A. STUPIN. Analysis of the test results (25%).

Alexander N. KONYSHKOV. Development of a methodology and statistical processing of the test results (25%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23.08.2022, рецензия от первого рецензента получена 01.11.2022, рецензия от второго рецензента получена 03.11.2022, принята к публикации 15.11.2022.

The article was submitted 23.08.2022, first review received 01.11.2022, second review received 03.11.2022, accepted for publication 15.11.2022.