

Анализ эксплуатационного контроля состояния жестких поперечин контактной сети

О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий, Л. А. Астраханцев✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ astrahancev1943@mail.ru

Резюме

Высокие темпы развития железнодорожного перевозочного процесса ведут к усложнению систем и оборудования железных дорог. Это обусловлено, в большей степени, возрастанием потребностей перевозки товаров и грузов. В связи с этим увеличиваются требования, обеспечивающие безопасность и надежность движения поездов. Это, в свою очередь, приводит к необходимости усовершенствования систем контроля и разработке новых методов диагностики оборудования железнодорожного транспорта. Одним из наиболее сложных элементов на железной дороге является контактная сеть, так как она не имеет резерва. Выход из строя одного элемента влечет за собой нарушение функционирования всей системы, что напрямую влияет на непрерывность технологического процесса перевозок, а в случае разрушения создает угрозу для безопасности движения поездов и жизни людей. Основные виды нагрузки, действующие на контактные сети, приходится на опорные конструкции. Авторами предложены к рассмотрению жесткие поперечины контактной подвески многопутевых перегонов и станций. Это важный элемент опорных конструкций, разрушение которых может привести к продолжительному простоям поездов и нарушению работы других устройств контактной сети. В статье проведен статистический анализ срока эксплуатации жестких поперечин контактной сети на Восточно-Сибирской железной дороге, рассмотрены нормируемые повреждения и способы определения технического состояния металлических ригелей. Предложено в качестве способа определения напряжений в конструкции использовать моделирование методом конечных элементов. Исследование проведено для различных режимов работы и условий эксплуатации. Сформированы рекомендации по дальнейшей эксплуатации жестких поперечин.

Ключевые слова

жесткие поперечины, контактная сеть, диагностика оборудования железнодорожного транспорта, металлические опорные конструкции, эксплуатационный контроль, обрыв контактного провода, техническое состояние, действующая нагрузка

Для цитирования

Лобанов О. В. Анализ эксплуатационного контроля состояния жестких поперечин контактной сети / О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий, Л. А. Астраханцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 153–162. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).153-162

Информация о статье

поступила в редакцию: 23.03.2022 г.; поступила после рецензирования: 28.03.2022 г.; принята к публикации: 29.03.2022 г.

Analysis of operational control of the contact network rigid crossbars condition

О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий, Л. А. Астраханцев✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ astrahancev1943@mail.ru

Abstract

High rates of development of the railway transportation process lead to the complication of railway systems and equipment. To a greater extent, this is due to the increasing needs for the transportation of goods and cargo. In this regard, the requirements for ensuring the safety and reliability of train traffic are increasing. This, in turn, results in the need to improve control systems and develop new diagnostic methods for railway transport equipment. One of the most complex elements on the railway is the contact network. This is due to the fact that it has no reserve. The failure of one element entails a disruption of the functioning of the entire system, which directly affects the continuity of the technological process of transportation, and in case of destruction poses a threat to the safety of train traffic and people's lives. In turn, the main types of loads affecting the contact network are taken on by the supporting structures. In this article, the authors propose to consider the rigid crossbars of the contact suspension of multi-track crossings and stations. This is an important element of supporting structures, whose destruction can lead to prolonged downtime of trains and disruption of other devices of the contact network. The article presents a statistical analysis of the contact network rigid crossbars service life on the East Siberian Railway. The normalized damages have been analyzed as well as methods of determining the technical condition of metal crossbars. The authors proposed using finite element modeling as a method for determining stresses in the structure. The study was conducted for various operating modes and operating conditions. Based on the results obtained, recommendations were formed for the further operation of rigid crossbars.

Keywords

rigid crossbars, contact network, diagnostics of railway transport equipment, metal support structures, operational control, contact wire breakage, technical condition, operating load

For citation

Lobanov O. V., Stupitskii V. P., Astrakhansev L. A. Analiz ekspluatatsionnogo kontrolya sostoyaniya zhestkikh poperechin kontaktnoi seti [Analysis of operational control of the contact network rigid crossbars condition]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 153–162. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).153-162

Article Info

Received: 23.03.2022; revised: 28.03.2022; accepted: 29.03.2022.

Введение

В связи с развитием железнодорожного транспорта происходит увеличение скоростей движения поездов и массы перевозимых грузов. Это ведет к возрастанию нагрузки на всю инфраструктуру железных дорог [1, 2]. В связи с этим появляется потребность в усовершенствовании систем диагностики эксплуатационного состояния устройств и оборудования железных дорог [3–6].

Одним из наиболее важных устройств электрифицированных железных дорог являются металлические конструкции [7–9]. Подвеска контактной сети в условиях многопутевых перегонов, и на железнодорожных станциях осуществляется с использованием металлических жестких поперечин балочного типа [10]. Жест-

кие поперечины представляют собой металлические фермы с параллельными поясами и раскосной решеткой. Решетка треугольная с распорками в каждом узле. Для усиления в узлах устанавливают еще одну распорку по диагонали. Отдельные блоки стыкуют друг с другом накладками из угловой стали.

Ригели выступают в качестве опорной конструкции для подвески элементов контактной сети и для установки дополнительных устройств [11, 12].

Каждый пояс и раскос в конструкции рассчитывается и выбирается по предельным состояниям воспринимаемых нагрузок. В связи с этим перед работниками дистанции электроснабжения возникают сложные задачи:

– определить в условиях эксплуатации



Рис. 1. Острodefектная жесткая поперечина по индексу 6.2М

Fig. 1. Highly defective crossbar by 6.2M index

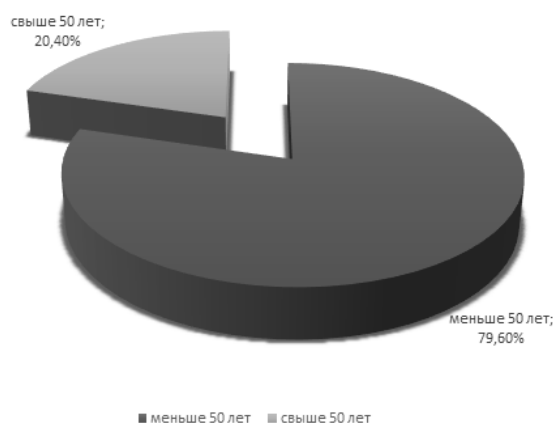


Рис. 2. Распределение жестких поперечин по сроку их эксплуатации

Fig. 2. Operation timing for rigid crossbars

техническое состояние жесткой поперечины;

– спрогнозировать динамику текущего состояния [13].

Согласно указаниям по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети [14] по-разному нормируются повреждения сжатых и растянутых конструктивных элементов. На рис. 1 представлена острodefектная жесткая поперечина.

Важным параметром является нормативный срок эксплуатации, который составляет 50 лет [15]. При проведении анализа получены данные (рис. 2), по которым можно сделать вывод, что на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) находится 20,4 % жестких поперечин, срок службы которых превышен.

Подготовка к моделированию

На первом этапе исследования предложе-

но использовать метод конечно-элементного моделирования и программу Solid Works. Проанализированы варианты нагружения жесткой поперечины:

– основное нагружение – основной расчетный случай [16], нагрузка определяется весом поперечины, подвески, элементов освещения и нагрузкой от ветра максимальной интенсивности;

– основное нагружение с учетом обледенения, т. е. дополнительно учитывается вес обледенения поперечины и вес элементов подвески;

– нагружение с односторонним обрывом провода – отсутствует нагрузка со стороны оборванного провода.

В программе Solid Works были смоделированы крайние и средний блок ригеля. На рис. 3 представлена трехмерная модель среднего блока.

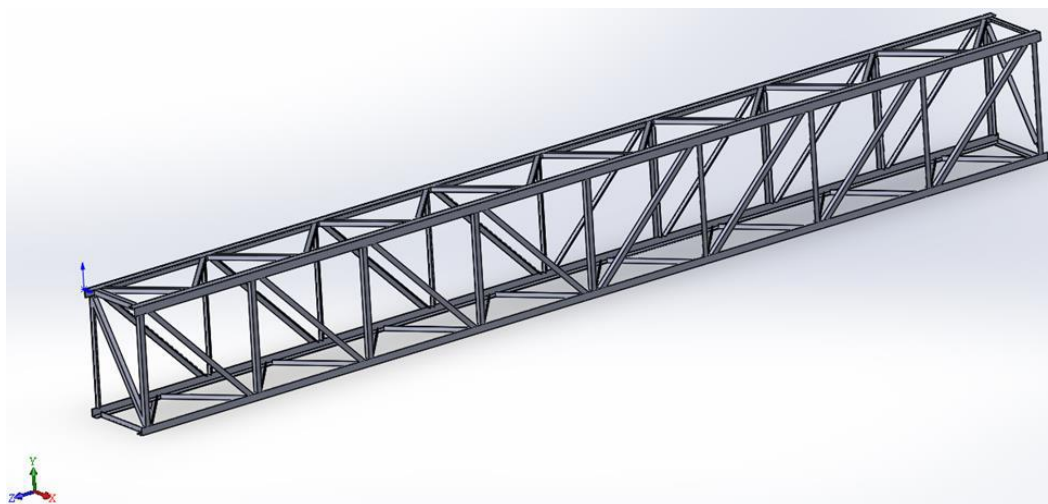


Рис. 3. Трехмерная модель среднего блока

Fig. 3. 3D model of a middle block

Для выполнения расчёта полученной модели задаются параметры материала, из которого выполнены элементы ригеля [17]. Жесткая поперечина, выбранная для исследования, выполнена из стали марки С245 со следующими характеристиками: плотность $\rho \approx 7,85$ г/см³; модуль Юнга $E = (2,0-2,1) \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,24 \dots 0,28$;

После занесения характеристик, можно приступить к расчету ригеля с помощью метода конечных элементов. Для этого необходимо на каждый элемент модели наложить сетку, которая разобьет ригель на конечное количество подобластей. Следующим шагом подготовки соединяют элементы. Для этого используем функцию «connect», которая имитирует сварное соединение элементов ригеля.

Для получения результатов о распределении нагрузки на жесткой поперечине определяются силы, действующие на элементы ригеля [18].

В исследовании учитывались следующие механические воздействия и нагрузки:

- массовые силы – вес самой конструкции, определяемый согласно проектной документации;

- возможная массовая распределенная нагрузка обледенения;

- возможная распределенная поверхностная ветровая нагрузка, определяемая для самого неблагоприятного расположения поперечины по отношению к ветру;

- сосредоточенные силы в узлах установки подвески контактной сети;

- силы реакции от опор жесткой поперечины.

Анализ конструкции креплений и установки и установки поперечины на опоры позволяет считать эти опоры шарнирным типом крепления. Учтен важный фактор – у поперечины в месте крепления к опоре возможно некоторое потенциальное перемещение [19], от чего не в полной мере передаются нагрузки при деформации от ригеля к опорам и с опор на поперечину при их смещении.

Расчет нагрузок на ригель

Для исследования смоделирован ригель ОРЦ 380-30,3 с расчетной длиной $l_{расч} = 30,260$ м [20]. Номинальная величина прогиба определяется как:

$$h_{прог} = \frac{1}{150} \cdot l_{расч}.$$

По результатам расчета номинальная величина прогиба ригеля составила $h_{прог} = 0,202$ м.

Для моделирования необходимо рассчитать нагрузки на жесткой поперечине под действием собственного веса, контактной подвески с учетом гололеда и ветровой нагрузки. Ригель эксплуатируется на линии переменного тока. Подвеска на главных путях ПБСМ-95 + 2МФ-100, на станционных ПБСМ-95 и МФ-100 [21,22].

Собственный вес элементов контактной сети, гололед, ветровой напор заданы в справочниках по проектированию. Для моделирования был выбран район III по гололедному образованию и II ветровой. Расчетная толщина стенки гололеда $b_z = 0,015$ м, максимальная скорость ветра $v^2 = 25$ м/с. Длина пролета для расчета нагрузок принята $l_{пр} = 60$ м.

Вертикальные нагрузки от контактной подвески по оси пути:

$$G_i = (g_n + g_k) \cdot l_{пр} + g_a,$$

где g_n и g_k – вес 1 м соответственно несущего троса и контактного провода; g_a – вес армировки по всей длине продольного пролета.

По осям главных путей нагрузка равна $G_{эл} = 1932,4$ Н, по осям станционных путей $G_{ст} = 1396$ Н. Определяется вертикальная нагрузка от гололеда на проводах контактной подвески и струнах:

$$G_{iz} = (g_{zn} + g_{zk} + g_{zcmp}) \cdot l_{пр},$$

где g_{zn} , g_{zk} – вес гололеда на 1 м соответственно несущего троса и контактного провода; g_{zcmp} – вес гололеда на струнах, приведенных к весу гололеда на 1 м пролета.

Подробные расчеты представлены в учебных пособиях по проектированию контактной сети [23]. Полученные результаты нагрузки по рассматриваемым параметрам следующие: по осям главных путей $G_{эл} = 1383,84$ Н; по осям станционных путей $G_{ст} = 1025,52$ Н.

Далее рассчитываем нагрузку на ригель от ветра максимальной интенсивности:

$$P_p = \gamma \cdot v^2,$$

где γ – коэффициент учитывающий сопротивление ригеля ветровому напору.

Значение нагрузки на ригель от ветра получилось $P_p = 300$ Н/м.

Полученные значения нагрузок указывались в программе Solid Works в зависимости от моделируемого случая.

Результаты моделирования

1. Основное нагружение

В данном случае рассматривается работа жесткой поперечины под нормальной эксплуатационной нагрузкой. Основные результаты измерения приведены в табл. 1.

На рис. 4 представлена схема расположения сжатых и растянутых зон на элементах конструкции (красным цветом отмечены элементы, работающие на сжатие), на рис. 5 – схема перемещения жесткой поперечины при нормальном условии эксплуатации. Значение прогиба ригеля находится в пределах допустимых значений, что не влияет на работу жесткой поперечины.

Программа Solid Works строит световую шкалу, показывая влияние распределения

нагрузки на максимальные значения напряжений, а также места, в которых они будут находиться, что позволяет быстро и качественно выполнять анализ данных.

На рис. 4 видно, что верхние пояса жесткой поперечины работают на сжатие, а нижние на растяжение. Раскосы в основном работают на сжатие.

2. Основное нагружение с учетом обледенения.

На втором этапе к основным нагрузкам в программе дополнительно включены усилия, передаваемые жесткой поперечине от веса гололеда на провода контактной подвески и самом ригеле. Численные результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты расчета при основном нагружении
Table 1. Calculation results under basic loading

№ п/п	Параметр Parameter	Единицы измерения Measures	Величина Magnitude	
			Минимум Minimum	Максимум Maximum
1	Напряжение - 1 главное Main stress - 1	кН/м ²	-142 328	485 134
2	Перемещение - по вертикали Movement - vertical	мм	3,13	-39,50
3	Допустимое значение прогиба Allowable deflection value	мм	-202	

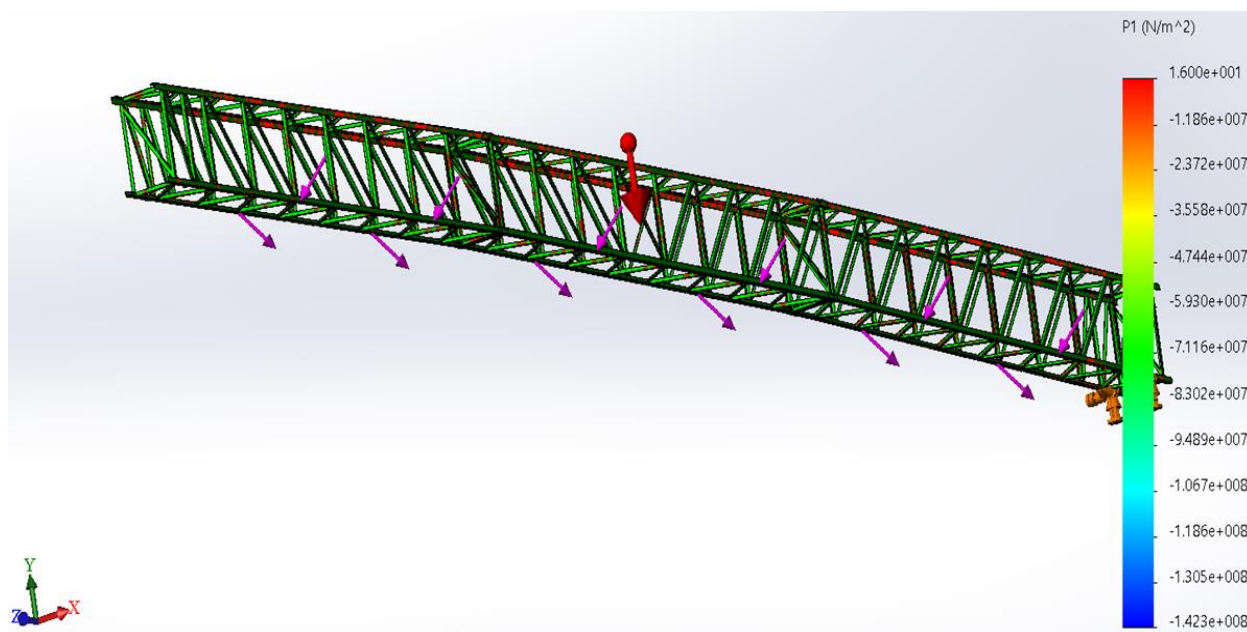


Рис. 4. Схема расположения растянутых и сжатых элементов поперечины при основном нагружении
Fig. 4. Position scheme for stretched and compressed elements under basic loading

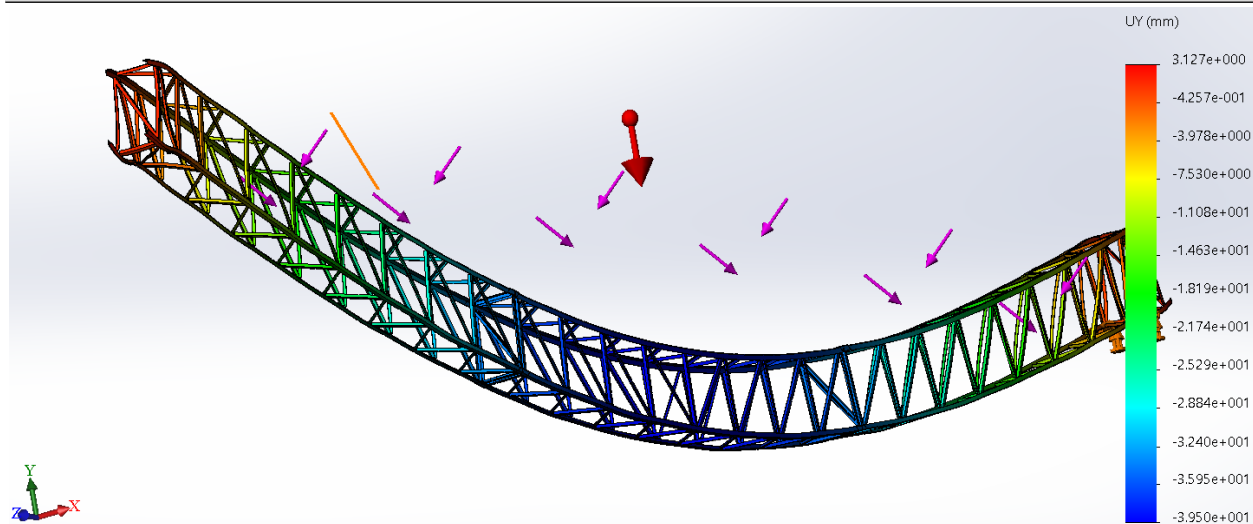


Рис. 5. Перемещение по вертикали при основном нагружении
 Fig. 5. Vertical movement under basic loading

Таблица 2. Результаты расчета при нагружении с гололедом
 Table 2. Calculation results under loading with sleet

№ п/п	Параметр Parameter	Единицы измерения Measures	Величина Magnitude	
			Минимум Minimum	Максимум Maximum
1	Напряжение – 1 главное Main stress - 1	кН/м ²	-168 055	580 457
2	Перемещение - по вертикали Movement - vertical	мм	3,71	-46,92
3	Допустимое значение прогиба Allowable deflection value	мм	-202	

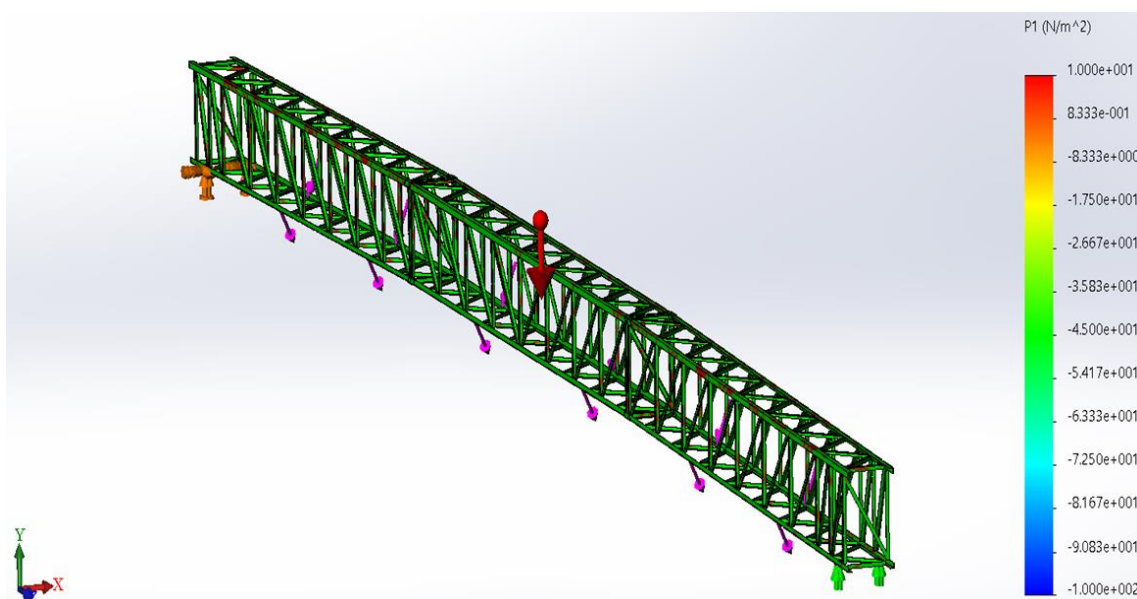


Рис. 6. Схема расположения растянутых и сжатых элементов поперечины при нагружении с гололедом
 Fig. 6. Position scheme for stretched and compressed elements of the crossbar under loading with sleet

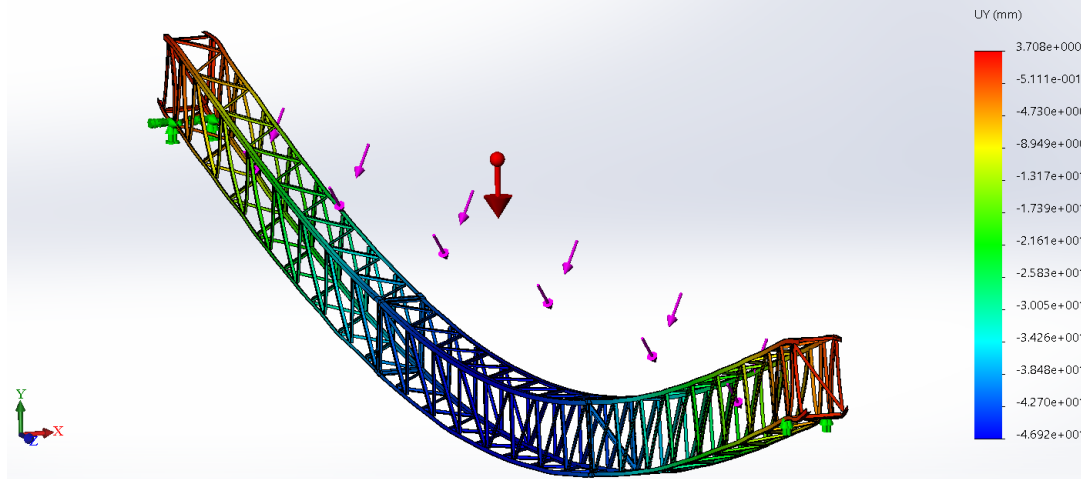


Рис. 7. Перемещение по вертикали при нагружении с гололедом
Fig. 7. Vertical movement under loading with sleet

На рис. 6 показана схема расположения сжатых и растянутых элементов конструкции при дополнительной нагрузке от гололеда, на рис. 7 – результаты изменения прогиба демонстрируют увеличение значений в отличие от нагрузки без гололеда. Величина прогиба находится в допустимых значениях и не влияет на работу жесткой поперечины.

Результаты позволяют утверждать, что при увлечении нагрузки расположение сжатых и растянутых зон не меняется по сравнению с основным нагружением. Верхние пояса и раскосы так же работают на сжатие, а нижние на растяжение. Что соответствует расчетам при проектировании.

3. Нагружение с обрывом одного провода. На данном этапе были смоделированы

нагрузки на жесткую поперечину при обрыве крайнего провода контактной подвески.

Если рассматривать модель в программе (рис. 8) видно, что отсутствует нагрузка от контактной подвески, действующая вертикально. Это имитирует обрыв одного пути контактной подвески. Результаты, полученные в ходе данного этапа моделирования, представлены в табл. 3.

Расположение сжатых и растянутых зон (см. рис 8) позволяет говорить об изменении реакции жесткой поперечины на действующие нагрузки. В нижнем поясе ригеля появились места, в которых происходит работа элементов на сжатие.

Распределение нагрузки отличается от проектных [18]. Исходя из типовых расчетов,

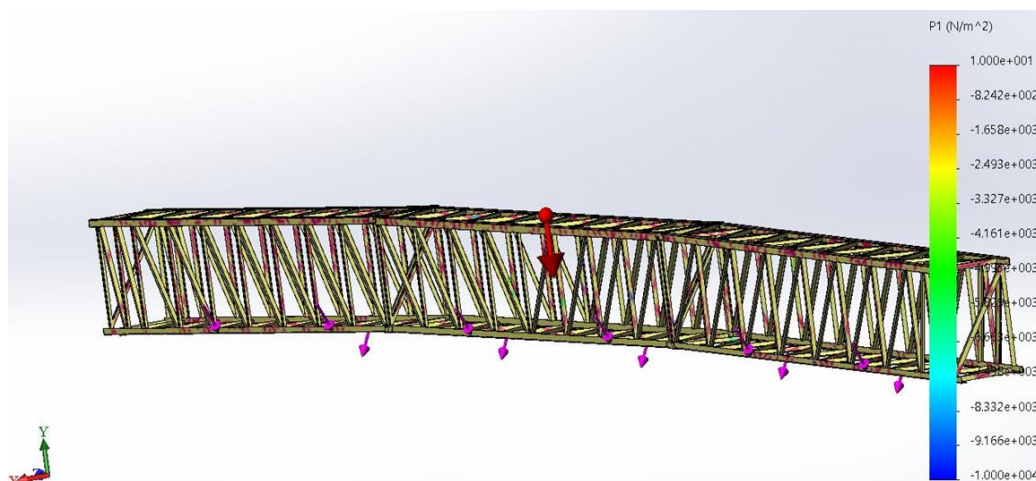


Рис. 8. Схема расположения растянутых и сжатых элементов поперечины при нагружении с обрывом провода

Fig. 8. Position scheme for stretched and compressed elements of the crossbar under loading with wire break

нижний пояс ригеля работает на растяжение, в связи с этим он выполнен из уголков меньшего сечения. В рассматриваемом варианте появляются места с работой на сжатие в нижнем поясе, что приводит к нарушению конструкции ригеля в эксплуатационных условиях. Верхний пояс и раскосы работают на сжатие, что соответствует проектным расчетам.

На рис. 9 представлены вертикальные перемещения жесткой поперечины под действием нагрузки. Уменьшение прогиба ригеля на 16,77 мм в сравнении с нормальным нагружением, объясняется уменьшением нагрузки на жесткую поперечину, а именно отсутствием силы от одной из контактных подвесок. Произошло смещение стрелы провеса, влияющее на перераспределение нагрузки на ригеле. Для полного понимания работы жесткой поперечины нужны дополнительные исследования.

Заключение

По результатам моделирования сформулируем ряд выводов:

1. В каждом исследовании нагрузка на

ригель не превышала расчетных значений. Жесткая поперечина, испытывая данные нагрузки, будет находиться в работоспособном состоянии.

2. По результатам испытания с обрывом провода произошло изменение распределения нагрузки на ригеле, а при эксплуатации на жесткой поперечине могут возникнуть погнутости. Они нормируются согласно инструкции [12], в которой указаны различные допуски для сжатых и растянутых зон конструкции. Может возникнуть ситуация, когда обрыв провода приведет к изменению нагрузки, и в зону сжатой работы попадет повреждение или элемент, не рассчитанные на данную нагрузку. Это может привести к появлению дополнительных погнутостей или полному разрушению конструкции.

3. Для полного анализа учитываются особенности каждой отдельной конструкции. Множество дополнительных факторов влияют на состояние жесткой поперечины. Получение достоверной информации зависит от ряда параметров и условий эксплуатации:

Таблица 3. Результаты расчета при нагружении с обрывом провода

Table 3. Calculation results under loading with wire break

№ п/п	Параметр Parameter	Единицы измерения Measures	Величина Magnitude	
			Минимум Minimum	Максимум Maximum
1	Напряжение - 1 главное Main stress - 1	кН/м ²	-48 432	463 497
2	Перемещение - по вертикали Movement - vertical	мм	1,13	-22,73
3	Допустимое значение прогиба Allowable deflection value	мм	-202	

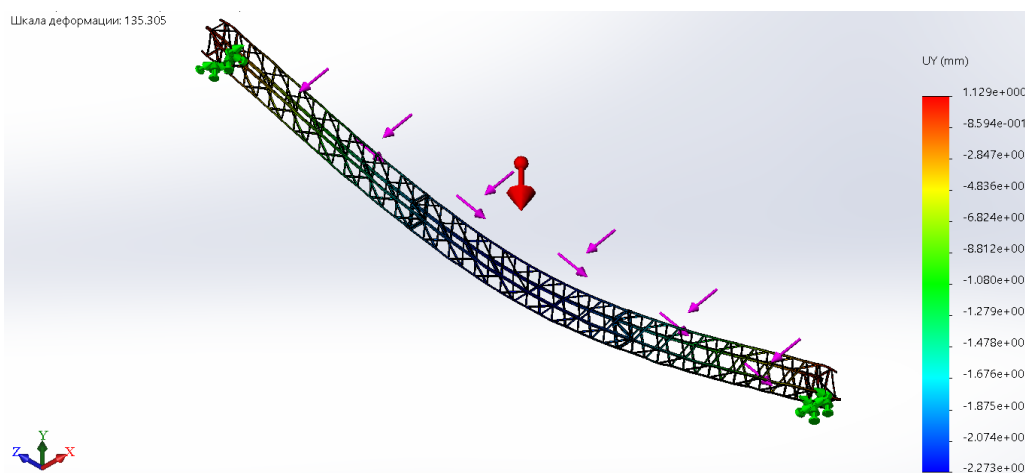


Рис. 9. Перемещение по вертикали при нагружении с обрывом провода

Fig. 9. Vertical movement under loading with wire break

– частота следования поездов и их скорость;

– наличие повреждений на ригеле, которые могут вызывать дополнительные нагрузки,

– режимы работы контактной подвески,

– угол наклона опоры и воздействие грунта на ее положение,

– техническое состояние опор,

– аварийные случаи на контактной сети.

Хотелось бы отметить, что развитие исследований в данной области может позволить усовершенствовать процесс диагностики как жестких поперечин, так и металлических опор контактной сети. Это даст возможность увеличить надёжность и безопасность движения поездов.

Список литературы

1. Пузина Е.Ю. Усиление устройств системы тягового электроснабжения // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2021. Т. 1. С. 348–353.
2. Чекулаев В.Е., Зайцев А.И. Повышение надежности работы контактной сети и воздушных линий. М. : Транспорт, 1992. 128 с.
3. Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков Е.А. Моделирование электромагнитных влияний гибкого симметричного токопровода на протяженные металлические конструкции // Труды Брат. гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 1. С. 118–124.
4. Гасельник В.В., Лопатин М.В. Проблемы и перспективы применения двухчастотного электромагнитного метода неразрушающего контроля при ремонте и диагностике ферромагнитных деталей подвижного состава // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2012. Т. 1. С. 226–229.
5. Окунев А.В., Галкин А.Г., Ковалев А.А. Определение предельных состояний опор контактной сети на основе математического моделирования изменения их несущей способности // Изв. Транссиба. 2019. № 2 (38). С. 82–90.
6. Лобанов О.В. Система мониторинга работоспособности металлических опорных конструкций для скоростного и высокоскоростного движения электроподвижного состава // Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика : материалы междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2021. С. 245–250.
7. Филиппов Д.М., Ступицкий В.П., Лобанов О.В. Проблемы диагностики параметров контактной сети // Молодая наука Сибири. 2021. № 2(12). С. 125–131.
8. Расчет несущей способности металлической решетчатой опоры контактной сети при кручении верхней части методом конечных элементов в САПР Femap / В.П. Ступицкий, И.А. Худогов, В.А. Тихомиров и др. // Транспорт Урала. 2021. № 1 (68). С. 99–102. DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-99-102.
9. Определение остаточной несущей способности металлических конструкций контактной сети / В.П. Ступицкий, И.А. Худогов, В.А. Тихомиров и др. // Изв. Транссиба. 2019. № 3 (39). С. 88–99.
10. Коптев А.А., Коптев И.А. Сооружение, монтаж и эксплуатация устройств электроснабжения. Монтаж контактной сети. М. : УМЦ ЖДТ, 2007. 478 с.
11. Борц Ю.В., Чекулаев В.Е. Контактная сеть. М. : Транспорт, 2001. 247 с.
12. Беляев И.А. Устройства контактной сети на зарубежных дорогах. М. : Транспорт, 1991. - 192с.
13. Ерохин Е.А. Устройство, эксплуатация и техническое обслуживание контактной сети и воздушных линий. М. : УМЦ ЖДТ, 2007. 404 с.
14. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети : N К-146-08. М. : Транспорт, 2008. 120 с.
15. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
16. Воронин А.В. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 2010. 296 с.
17. Горошков Ю.И., Бондарев Н.А. Контактная сеть. М. : Транспорт, 2011. 400с.
18. Кудрявцев А.А. Несущая способность опорных конструкций контактной сети. М. : Транспорт, 1988. 160 с.
19. Михеев В.П. Контактные сети и линии электропередачи. М. : Транспорт, 2006. 415 с.
20. Типовой проект №5254 Унифицированные конструкции жестких поперечин балочного типа. Научно-исследовательский институт транспортного строительства, 2006. 72 с.
21. Бондарев Н.А., Чекулаев В.Е. Контактная сеть. М. : Транспорт, 2006. 589 с.
22. Справочник по электроснабжению железных дорог. Под ред. К.Г. Марквардта. М. : Транспорт, 1981. 392 с.
23. Фрайфельд А.В. Проектирование контактной сети. М. : Транспорт, 2014. 328 с.

References

1. Puzina E.Yu. Usilenie ustroystv sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Strengthening of traction power supply system devices]. *Materialy Vserossiyskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Increasing the efficiency of energy production and use in Siberia»]. Irkutsk, 2021, Vol. 1, pp. 348-353.
2. Chekulayev V.E., Zaitsev A.I. Povyshenie nadezhnosti raboty kontaktnoi seti i vozdushnykh liniy [Improving the reliability of the contact network and overhead lines]. Moscow: Transport Publ., 1992. 128 p.
3. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov E.A. Modelirovanie elektromagnitnykh vliyaniy gibkogo simmetrichnogo tokoprovoda na protyazhennyye metallicheskie konstruksii [Modeling of electromagnetic influences of a flexible symmetrical cur-

rent pipeline on extended metal structures]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences]. 2021, Vol. 1, pp. 118-124.

4. Gasel'nik V.V., Lopatin M.V. Problemy i perspektivy primeneniya dvukhchastotnogo elektromagnitnogo metoda nerazrushayushchego kontrolya pri remonte i diagnostike ferromagnitnykh detalei podvizhnogo sostava [Problems and prospects of applying the two-frequency electromagnetic method of non-destructive testing in the repair and diagnostics of ferromagnetic parts of rolling stock]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2012, Vol. 1, pp. 226-229.

5. Okunev A.V., Galkin A.G., Kovalyov A.A. Opredelenie predel'nykh sostoyanii opor kontaktnoi seti na osnove matematicheskogo modelirovaniya izmeneniya ikh nesushchei sposobnosti [The definition of the limit states of catenary supports on the basis of mathematical modeling of changes in their carrying capacity]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletin of the Transsib]. 2019, no 2 (38), pp. 82–90.

6. Lobanov O.V. Sistema monitoringa rabotosposobnosti metallicheskikh opornykh konstruktssii dlya skorostnogo i vysokoskorostnogo dvizheniya elektropodvizhnogo sostava [System for monitoring the operability of metal support structures for high-speed and high-speed movement of electric rolling stock]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye proizvodstvennye tekhnologii i resursoberegayushchaya energetika»* [Materials of the international scientific and practical conference «Innovative production technologies and resource-saving energy»]. Omsk, 2021, pp. 245-250.

7. Filippov, D.M., Stupnitskii V.P., Lobanov O.V. Problemy diagnostiki parametrov kontaktnoi seti [Problems of diagnostics of contact network parameters]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2021, no 2(12), pp. 125-131.

8. Stupitskii V.P., Khudonogov I.A., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. Raschet nesushchei sposobnosti metallicheskoi reshetchatoi opory kontaktnoi seti pri kruchenii verkhnei chasti metodom konechnykh elementov v SAPR Femap [Calculation of bearing capacity of metal lattice catenary pole at torsion of the upper part by finite element method in the Femap CAD]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2021, no 1(68), pp. 99-102. DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-99-102.

9. Stupitskii V.P., Khudonogov I.A., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. Opredelenie ostatochnoi nesushchei sposobnosti metallicheskikh konstruktssii kontaktnoi seti [Determination of residual bearing capacity of metal structures of the contact network]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletin of the Transsib]. 2019, no 3(39), pp. 88 – 99.

10. Koptev A.A., Koptev. I.A. Sooruzhenie, montazh i ekspluatatsiya ustroystv elektrosnabzheniya. Montazh kontaktnoi seti [Construction, installation and operation of power supply devices. Installation of the contact network: a textbook for universities of railway transport]. Moscow: UMTS ZHDT Publ., 2007. 478 p.

11. Borts Yu.V., Chekulaev V.E. Kontaktnaya set' [Contact network]. Moscow: Transport Publ., 2001. 247 p.

12. Belyaev I.A. Ustroystva kontaktnoi seti na zarubezhnykh dorogakh [Contact network devices on foreign roads]. Moscow: Transport Publ., 1991. 192 p.

13. Erokhin E.A. Ustroystvo, ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie kontaktnoi seti i vozdukhnykh linii [Device, operation and maintenance of the contact network and overhead lines]. Moscow: UMTS ZHDT Publ., 2007. 404 p.

14. Ukazaniya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu opornykh konstruktssii kontaktnoi seti [Instructions for maintenance and repair of support structures of the contact network: N K-146-08]. Moscow: Transport Publ., 2008. 120 p.

15. Markvardt K.G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electricity supply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1982. 528 p.

16. Voronin A.V. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electricity supply of electrified Railways]. Moscow: Transport Publ., 2010. 296 p.

17. Goroshkov Yu.I., Bondarev N.A. Kontaktnaya set' [Contact network]. Moscow: Transport Publ., 2011. 400 p.

18. Kudriavtsev A.A. Nesushchaya sposobnost' opornykh konstruktssii kontaktnoi seti [The bearing capacity of the supporting structures of the contact network]. Moscow: Transport Publ., 1988. 160 p.

19. Mikheev V.P. Kontaktnye seti i linii elektroperedachi [Contact networks and power lines]. Moscow: Transport Publ., 2006. 415 p.

20. Tipovoi proekt №5254 Unifitsirovannyye konstruktssii zhestkikh poperechin balochnogo tipa [Standard project No. 5254 Unified designs of rigid beam-type crossbars]. Nauchno-issledovatel'skiy institut transportnogo stroitel'stva Publ., 2006. 72 p.

21. Bondarev N.A., Chekulaev V.E. Kontaktnaya set' [Contact network]. Moscow: Transport Publ., 2006. 589 p.

22. Markvardt K.G. (Edit) Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznykh dorog [Handbook of railway power supply]. Moscow: Transport Publ., 1981. 392 p.

23. Frayfeld A.V. Proektirovanie kontaktnoi seti [Contact network design]. Moscow: Transport Publ., 2014. 328 p.

Информация об авторах

Лобанов Олег Викторович, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: oleg.6965@mail.ru

Ступицкий Валерий Петрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: dokasvp@mail.ru

Астраханцев Леонид Алексеевич, д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Information about the authors

Oleg V. Lobanov, Ph.D. student of the Subdepartment «Electrical Power Industry of Transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: oleg.6965@mail.ru

Valeriy P. Stupitskii, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment «Electrical Power Industry of Transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: dokasvp@mail.ru

Leonid A. Astrakhantsev, Doctor of Engineering Science, Professor, the Full Professor of the Subdepartment «Electrical Power Industry of Transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astrahancev1943@mail.ru