

УДК 621.332

М. Г. КУЗНЕЦОВА, И. Е. КРАКОВА, И. Г. МИЛОДОВСКИЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ НАГРУЗОК

Выполнен анализ прочности и устойчивости консоли опоры электрической сети аналитическим и численным методами. На основе расчета с использованием метода конечных элементов в инженерном пакете ANSYS установлено, что минимальная критическая сила, определенная на основе анализа устойчивости конструкции, соответствует форме, при которой стержни консоли выходят из ее плоскости.

Ключевые слова: контактная сеть, напряженно-деформированное состояние, устойчивость равновесия, компьютерное моделирование.

Контактная сеть – один из основных элементов электрифицированных железных дорог. Она служит для передачи электрической энергии к тяговому подвижному составу при заданных скоростях движения и весах поездов с помощью непосредственного контакта провода с токоприемником. В целях обеспечения надежного и экономичного токосъема при высоких скоростях движения возникает необходимость в разработке новых и совершенствовании существующих конструкций элементов контактной сети. Обеспечение механической прочности и устойчивости всех ее элементов, в частности опорных и поддерживающих устройств, является актуальной проблемой, поскольку к расчету проектируемых контактных сетей необходимо подходить как с точки зрения надежности, так и экономической целесообразности [1].

В настоящее время проектирование элементов контактной сети осуществляется на основе рекомендаций [2]. Однако в них не всегда в полной мере учитываются особенности деформирования конструкций под действием эксплуатационных нагрузок, что, в частности, может быть связано с использованием в конструкциях новых материалов. Целью представленной работы является установление напряженно-деформированного состояния консоли, поддерживающей контактный провод, и определение критической силы, соответствующей потере устойчивости конструкции.

Геометрическая модель исследуемой консоли создана в соответствии со схемой, которая приведена на рисунке 1. При выполнении расчетов на прочность и устойчивость конструкции рассматривались две схемы ее нагружения: только сосредоточенной силой и сосредоточенной силой совместно с равномерно распределенной нагрузкой (снеговой). Соответствующие расчетные схемы представлены на рисунке 2.

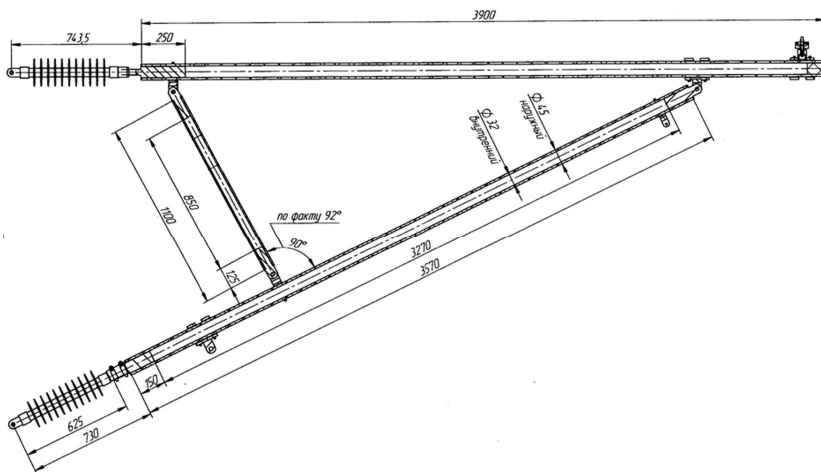


Рисунок 1 – Консоль опоры контактной сети

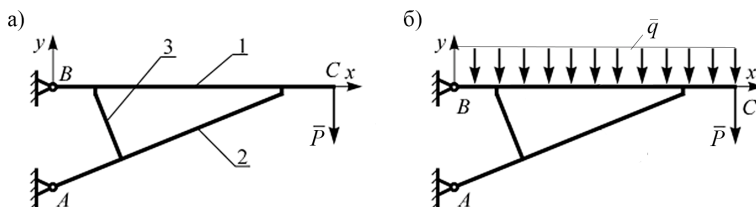


Рисунок 2 – Расчетная схема изолированной консоли с приложенной сосредоточенной (а) и комбинированной (б) нагрузкой:

1 – консоль, 2 – подкос, 3 – распорка

На первой стадии исследования выполнен анализ конструкции на основе известных соотношений сопротивления материалов. Проведен расчет нормальных напряжений, возникающих вследствие сжатия и изгиба, по формуле [3]

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma],$$

где N – продольная сила, Н; A – площадь поперечного сечения, м^2 ; M_{\max} – максимальное значение изгибающего момента, возникающего в поперечном сечении стержня, Н·м; W_x – осевой момент сопротивления поперечного сечения стержня, м^3 .

Касательные напряжения определялись по формуле Журавского [3]

$$\tau = \frac{Q_{\max} S_x^{\text{отс}}}{b^{\text{отс}} J_x},$$

где Q_{\max} – максимальная внутренняя поперечная сила, Н; $S_x^{\text{отс}}$ – статический момент отсеченной части сечения, м^3 ; $b^{\text{отс}}$ – ширина сечения в месте отсечения (по оси x), м; J_x – момент инерции сечения, м^4 .

Также выполнена проверка устойчивости путем определения коэффициента запаса устойчивости [4]

$$n_y = \frac{P_k}{N},$$

где $P_k = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{l^2}$ – критическая сила, Н; EJ_{\min} – жесткость стержня, Н/м; N – расчетная продольная сила, Н; l – длина сжатой части стержня, м.

Для уточненного расчета разработана компьютерная модель консоли в инженерном пакете ANSYS. При создании конечноэлементной модели использовался четырехузловой элемент BEAM189, который позволяет учесть пластичность, ползучесть, вязкоупругость и вязкопластичность, а также наличие больших деформаций. Учитывалось, что стержни имели кольцевые сечения, размеры которых указаны на рисунке 1.

На модель конструкции, изображённую на рисунке 2, накладывались следующие ограничения: полностью запрещалось смещение точек A и B , а для точки C отсутствует перемещение по оси z . Полагалось, что конструкция выполнена из материала Ст3, имеющего следующие характеристики: плотность 7850 кг/м^3 ; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; допускаемое нормальное напряжение $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$; допускаемое касательное напряжение $[\tau] = 0,6[\sigma] = 96 \text{ МПа}$ [5].

Результаты аналитических и численных расчетов нормальных и касательных напряжений в консоли опоры контактной сети оказались весьма близкими. Касательные напряжения, как и предполагалось, оказались пренебрежимо малыми. Нормальные напряжения достигают допускаемого значения при значении силы P , равном 563 Н. На рисунке 3 приведена эпюра прогибов для данного значения силы, максимальное смещение составило 4,8 мм.

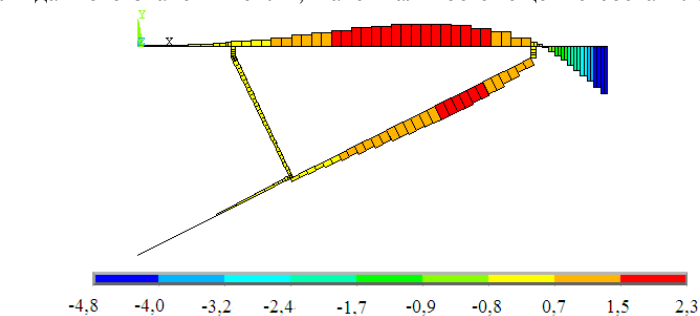


Рисунок 3 – Эпюра прогибов элементов конструкции (мм) при $P = 563 \text{ Н}$

Результаты расчетов конструкции на прочность при учете распределенной нагрузки $q = 100$ Н/м от действия силы тяжести конструкции, а также снега и льда, значения внутренних изгибающих моментов и поперечных сил изменяются незначительно.

Выполнен анализ устойчивости равновесия рассматриваемой конструкции под действием приложенных сил. Проведенные расчеты показали, что минимальная критическая сила возникает вследствие перемещений точек конструкции по направлению, перпендикулярному плоскости консоли, как показано на рисунке 4. Отметим, что потере устойчивости соответствует значение силы P , значительно меньшее определенного из условия прочности. Аналогичная ситуация наблюдается и со второй формой потери устойчивости (рисунок 5). Лишь третья форма происходит в плоскости консоли (рисунок 6).

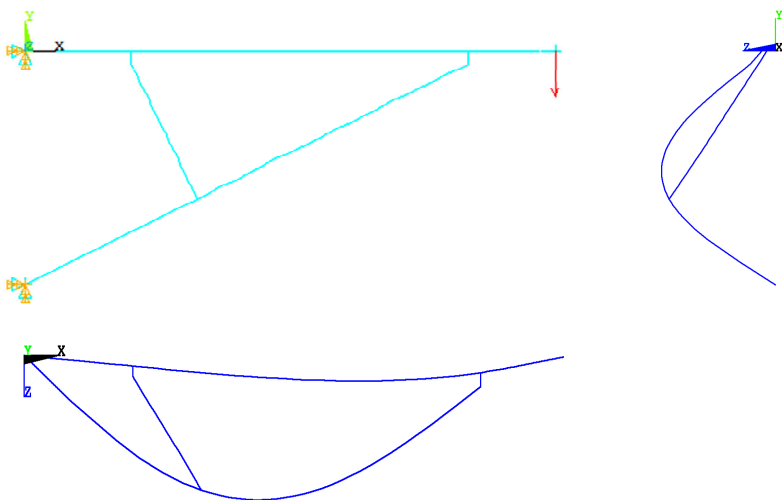


Рисунок 4 – Первая форма потери устойчивости, $F_k = 0,2P$

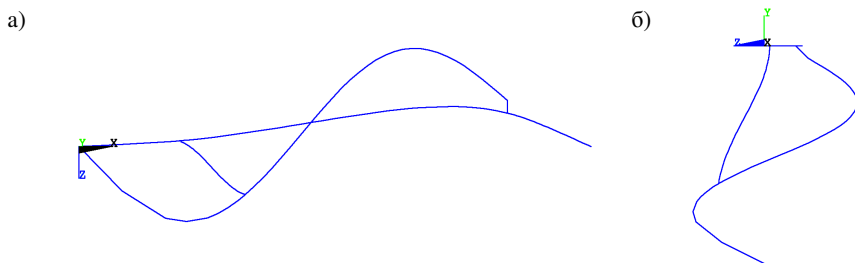


Рисунок 5 – Вторая форма потери устойчивости: а – вид сверху, б – вид справа, $F_k = 0,76 P$

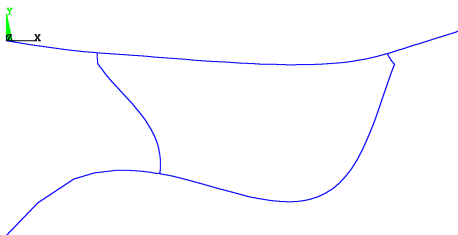


Рисунок 6 – Третья форма потери устойчивости, $F_k = 0,9 P$

Таким образом, выполненные расчеты показали, что учет перемещений только в одной плоскости, как это рекомендуется делать в [2], приводит к завышенным значениям критической силы. Аналогичные результаты были получены нами в работе [6]. Поэтому при проектировании консолей опор контактных сетей необходимо использовать пространственные схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Кудряшов, Е. В. Механические расчеты контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей / Е. В. Кудряшов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – Вып. 3(24). – С. 258–268.

2 Нормы проектирования контактной сети СТН ЦЭ 141-99. Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. – М. : Трансиздат, 2001. – 176 с.

3 Сопrotивление материалов / В. И. Феодосьев [и др.]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 590 с.

4 Тимошенко, С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. – М. : Наука, 1971. – 808 с.

5 Марочник сталей и сплавов / Ю. Г. Драгунов [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2014. – 1216 с.

6 Шимановский, А. О. Анализ устойчивости несущих элементов контактной сети под действием эксплуатационных нагрузок / А. О. Шимановский, И. Е. Кракова // Актуальные проблемы и перспективы развития строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективность в строительстве / Междунар. науч.-практ. конф. 19–20 декабря 2013 г. – Алматы: КазБСК, 2013. – С. 53–57.

M. G. KUZNIATSOVA, I. E. KRAKOVA, I. G. MILODOVSKY
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

ANALYSIS OF STRENGTH AND STABILITY OF THE CATENARY SUSPENSION ELEMENTS UNDER THE ACTION OF CONCENTRATED AND DISTRIBUTED LOADS

The analysis of strength and stability of the support console of the electrical network by analytical and numerical methods is performed. Based on the calculation using the finite element method in the ANSYS engineering package, it is established that the minimal critical force, obtained from the structural stability analysis, corresponds to the shape considering the console rods out of its plane.

Получено 04.11.2016