

УДК 624.04:004.94

А. О. ШИМАНОВСКИЙ, А. А. НОВИЧЕНКО

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

СРАВНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ И ЧИСЛЕННОЙ МЕТОДИК РАСЧЕТА ЖЕСТКОЙ ПОПЕРЕЧИНЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Проведен расчет внутренних сил в стержнях жесткой поперечины контактной сети, рассматриваемой как ферма с шарнирами в узлах. Определено перемещение центральной точки конструкции с применением метода Мора. Показано, что значения внутренних сил, рассчитанные аналитически и методом компьютерного моделирования в среде программного комплекса ANSYS, практически не отличаются, а деформации, найденные аналитическим способом, оказались заниженными на 18 %.

Ключевые слова: жесткая поперечина контактной сети, напряжения, деформации, компьютерное моделирование.

В развитых странах мира является актуальным развитие систем электропитания. Они используются во всех сферах жизнедеятельности человека: в промышленности, транспорте, сельском хозяйстве и т. д. Устойчивость обеспечения потребителей электроэнергией связана в том числе с грамотно выполненными механическими расчетами, ставящими своей целью не допустить появления в конструкциях больших напряжений и деформаций [1, 2].

В системах электропитания контактной сети железных дорог находит применение жесткая поперечина, которая имеет вид горизонтально расположенной пространственной фермы, установленной на железобетонные или металлические опоры. Она удобна для размещения осветительных приборов, а также подвешивания проводов различного назначения.

Как правило, расчеты таких конструкций осуществляются с помощью специально разработанных компьютерных программ, которыми пользуются в проектных организациях [3]. Однако иногда возникает необходимость выполнения одноразовых расчетов подобных систем. Приобретение специализированных программ в этом случае оказывается экономически невыгодным, поэтому существует потребность в разработке методов расчета жестких поперечин, позволяющих быстро оценить их механические свойства.

Целью представленной работы является сравнение результатов применения аналитических и численных методов расчета жестких поперечин и разработка рекомендаций по их использованию.

Анализ сил, возникающих в конструкции жесткой поперечины, и ее деформаций под действием эксплуатационной нагрузки рассмотрим на примере конкретной схемы, представленной на рисунке 1. Исследуемая система состоит из шести прямоугольных ячеек одинакового размера, внутри которых раз-

мещен диагональный стержень. Общая ширина конструкции – 14,5 м, ее высота – 1,2 м. Принято, что силы тяжести конструкции вместе с возможной добавкой от намерзшего льда соответствуют значению $F = 1541$ Н; сила, действующая на поперечину со стороны контактного провода, $P_{\text{пр}} = 1541$ Н.

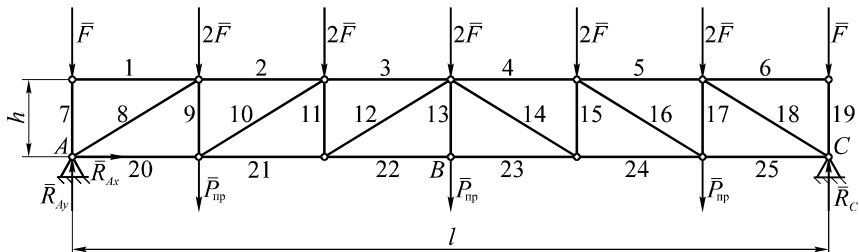


Рисунок 1 – Схема рассчитываемой конструкции

В ходе аналитического расчета с применением методов статики абсолютно твердого тела из уравнений равновесия конструкции в целом получены реакции связей $R_{Ax} = 0$; $R_{Ay} = R_C = 10029$ Н. Затем способом вырезания узлов были найдены значения внутренних сил в стержнях фермы. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения внутренних продольных сил в стержнях фермы

В килоньютонах

Вид расчета	Номер стержня												
	1, 6	2, 5	3, 4	7, 19	8, 18	9, 17	10, 16	11, 15	12, 14	13	20, 25	21, 24	22, 23
Аналитический	0	-17,09	-26,93	-1,54	-19,09	5,40	-10,98	1,80	-4,05	0,46	17,09	26,94	30,56
Численный	0	-17,08	-26,94	-1,57	-19,06	5,38	-10,97	1,76	-4,05	0,46	17,1	26,93	30,57

Поскольку жесткая поперечина имеет длину, более чем в 10 раз превосходящую высоту, то при расчетах деформаций ее можно рассматривать в виде балки, на которую действуют внешние силы, как это показано на рисунке 2. Для определения перемещения точки B использован метод Мора, в соответствии с которым перемещения определяются по формуле

$$y_B = \frac{1}{EI_x(l)} \int M_{\text{гр}} \bar{M} \cdot dx,$$

где E – модуль упругости материала, Па; I_x – осевой момент инерции поперечного сечения, м^4 ; $M_{\text{гр}}$ – значения внутреннего изгибающего момента на грузовой эпюре (от действия приложенной нагрузки), Н·м; \bar{M} – моменты от действия единичной силы, м.

Соответствующие эпюры изгибающих моментов показаны на рисунке 2. Расчет интеграла, входящего в формулу Мора, выполнен по формуле Симпсона, что привело к его значению $782,8 \text{ кН}\cdot\text{м}^3$.

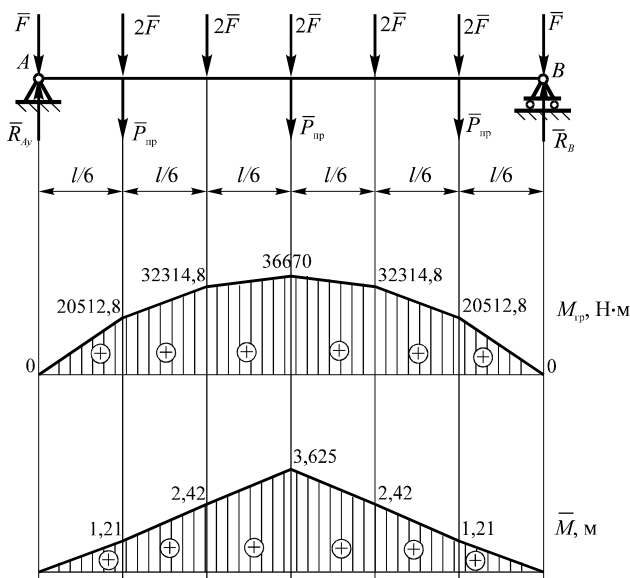


Рисунок 2 – Эпюры изгибающих моментов для расчета интеграла Мора

Пренебрегая наличием наклонных стержней, для упрощения расчетов полагаем, что поперечное сечение фермы представляет собой два сечения стержней верхнего и нижнего пояса, расположенных так, что расстояние между их центрами тяжести равно h (см. рисунок 1). Принимая, что стержни имеют квадратное поперечное сечение с площадью $A = 3,89 \text{ см}^2$, по формуле Штейнера получаем момент инерции поперечного сечения

$$I_x = 2 \left(\frac{A^2}{12} + A \frac{h^2}{4} \right) = 2 \cdot \left(\frac{(3,89 \cdot 10^{-4})^2}{12} + 3,89 \cdot 10^{-4} \cdot 0,6^2 \right) = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4.$$

В результате подстановки в интеграл Мора получаем

$$y_c = \frac{1}{EI_{\text{хобщ}}(l)} \int M_{\text{гр}} \bar{M} dz = \frac{782800}{2 \cdot 10^{11} \cdot 2,8 \cdot 10^{-4}} = 0,0140 \text{ м}.$$

Для проведения уточненного расчета методом конечных элементов использован программный комплекс ANSYS [4, 5].

Геометрия фермы задавалась с помощью ключевых точек и прямых отрезков в текущей глобальной системе координат. Чтобы учесть возможность продольных и изгибных деформаций стержней, использованы балочные конечные элементы BEAM 224. При задании свойств материалов поперечины полагалось, как и в случае аналитического расчета, что модуль Юнга $E = 210 \text{ ГПа}$, а коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

На рисунке 3 приведена схема распределения деформаций конструкции, из которой видно, что наибольшая деформация имеет место в центре нижнего пояса и составляет 0,0171 м.

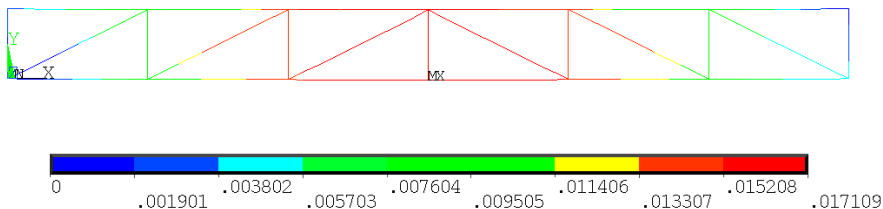


Рисунок 3 – Перемещения точек конструкции, м, под действием приложенных сил

Результаты расчетов показали, что значения внутренних поперечных сил и изгибающих моментов весьма малы, поэтому ими можно пренебречь. Эпюры внутренних продольных сил (рисунок 4) и нормальных напряжений в стержнях (рисунок 5) оказались весьма схожими. Следовательно, значения нормальных напряжений в поперечных сечениях стержней определяются главным образом действием продольных сил и почти не зависят от внутренних изгибающих моментов.

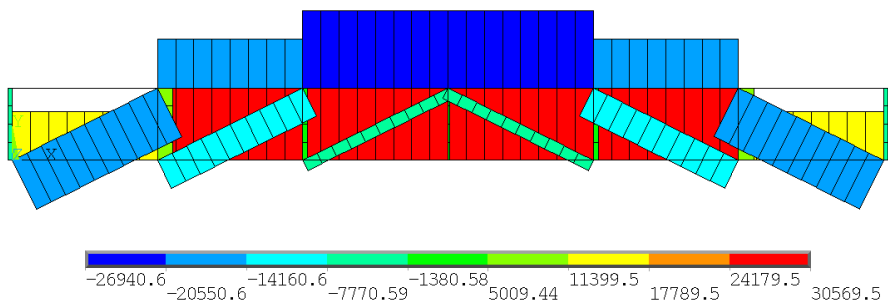


Рисунок 4 – Эпюра внутренних продольных сил в ферме

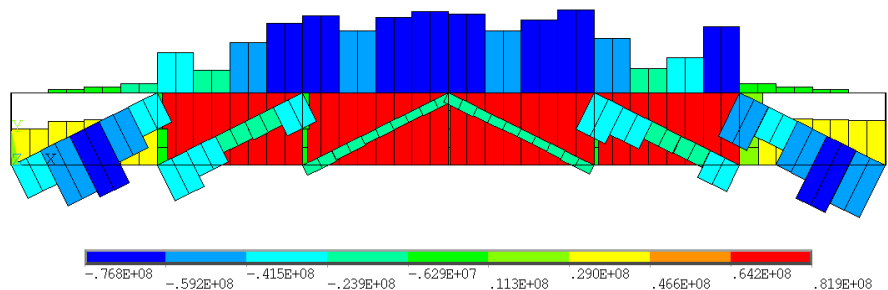


Рисунок 5 – Эпюра нормальных напряжений

Сравнение результатов расчетов, выполненных численным и аналитическим способами (см. таблицу 1), показало, что отличие продольных сил в стержнях не превышает 0,04 кН. С другой стороны, значение перемещения, найденное аналитическим способом, составило 1,40 см, а численным методом – 1,71 см, т. е. различие составляет около 18 %. Такая ситуация связана с тем, что в модели (см. рисунок 2) с землей связаны крайние точки балки, лежащие на ее оси, в то время как на самом деле опирание происходит в нижней части сечения. Кроме того, не учитывалось наличие вертикальных и наклонных стержней.

Таким образом, при необходимости оценки прочности и жесткости протяженных ферменных конструкций следует учитывать, что аналитические расчеты на упрощенных моделях позволяют с высокой степенью точности оценить значения внутренних продольных сил. В то же время они дают заниженные на 15–20 % значения перемещений точек под действием приложенных нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Михеев, В. П.** Контактные сети и линии электропередачи / В. П. Михеев. – М. : Маршрут, 2003. – 416 с.

2 **Кудряшов, Е. В.** Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей : дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Е. В. Кудряшов; Петерб. гос. ун-т путей сообщ. – СПб, 2010. – 187 с.

3 **Кудряшов, Е. В.** Совершенствование методов проектирования контактной сети / Е. В. Кудряшов, Д. И. Чередников, Е. В. Мартыненко [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uks.ru/news/Eltrans/Improvement%20of%20design%20methods.pdf>. – Дата доступа: 30.10.2017. – 10 с.

4 **Moaveni, S.** Finite element analysis. Theory and application with ANSYS / S. Moaveni. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1999. – 527 p.

5 **Шимановский, А. О.** Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики / А. О. Шимановский, А. В. Путято. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 61 с.

A. O. SHIMANOVSKY, A. A. NOVICHENKO
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

COMPARISON OF ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS OF A CONTACT NETWORK RIGID CROSSBARS CALCULATIONG

There was carried out the calculation of internal forces in the rods of a contact network rigid crossbar considered as a truss with hinges in nodes. The displacement of the central point of the structure was determined using the Mohr method. It is shown that the values of internal forces, calculated analytically and by computer simulation in the ANSYS software package, do not differ much, and the deformations found by an analytical method were underestimated by 18 %.

Получено 04.11.2018