

М. Н. КИРСАНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф.
НИУ МЭИ, г. Москва; e-mail: mpei2004@yandex.ru

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАВИСИМОСТИ ПРОГИБА ФЕРМЫ С ПОДВЕСНЫМ НИЖНИМ ПОЯСОМ ОТ ЧИСЛА ПАНЕЛЕЙ

Цель: Вывод в аналитической форме зависимости прогиба модели плоской статически определимой фермы в форме рамы от числа панелей в ригеле и боковых частях. Дополнительный прямолинейный нижний пояс (затяжка) подвешен к ригелю. Решетка фермы крестообразная, две симметричные части соединены шарнирно. Одна опора фермы является неподвижным шарниром, три опоры — подвижные шарниры. Рассмотрен случай нагрузки, равномерно распределенной по узлам подвесного пояса.

Метод. Прогиб фермы определяется по формуле Максвелла—Мора по значениям усилий, найденных в символьной форме из решения системы уравнений равновесия узлов конструкции. Используются операторы программы символьных преобразований Maple. Серия решений, полученных для ферм с разным числом панелей, методом индукции по двум независимым параметрам обобщается на произвольное число панелей. Коэффициенты формулы для прогиба находятся из решения линейных однородных рекуррентных уравнений, которым они удовлетворяют.

Результаты. Выведены формулы для прогиба конструкции и усилий в критических (наиболее сжатых и растянутых) стержнях. Все решения имеют вид полиномов не выше четвертой степени. Для четных чисел панелей обнаружен и подтвержден схемой возможных скоростей узлов случай кинематической изменчивости конструкции. Выполнен асимптотический анализ решения.

Ключевые слова: ферма, рама, прогиб, Maple, индукция, число панелей, асимптотика, затяжка, подвесной пояс.

Постановка задачи

Одной из схем большепролетных покрытий зданий, промышленных предприятий, цехов и стадионов является конструкция, сочетающая в себе составную ферменную конструкцию и затяжку. Такие конструкции часто используются в мостах [1] (рис. 1).

Сложные ферменные конструкции рассчитываются, как правило, численно [2–4]. При значительном числе стержней и вант расчет в численной форме в стандартных общепринятых пакетах может вызвать некоторые сложности как на этапе ввода информации о геометрии, упругих и прочностных характеристиках материала конструкции, так и в процессе счета и оценке полученного результата. Основная же проблема численного счета масштабных сооружений — эффект накопления ошибок округления. Аналитические решения во многом решают эти проблемы. С развитием систем символьных преобразований роль точных решений в расчетах строительных конструкций возросла. Впервые проблемы расчета регулярных ферм были рассмотрены в работах [5–8]. В монографии [9] впервые приведена методика и примеры получения



Рис. 1. Бейонский мост, Нью-Джерси, США [1]

аналитических решений для регулярных ферм. Метод конечных элементов в системе символьной математики в [10] применен для построения алгоритмов и получения решений в аналитической форме. В печати появились также решения для регулярных плоских ферм арочного типа [11–18], решетчатых ферм и рам [19–23], консолей [24, 25], пространственных ферм [26–28], полученные методом индукции. Ценность этих решений определяется числом независимых параметров конструкции, учтенных в расчетных формулах.

В число параметров помимо размеров конструкции и нагрузки входят и целочисленные величины, определяющие порядок ее регулярности. Для ферм это, как правило, число панелей. В балочных системах такой параметр один, в рамах — два (число панелей в ригеле и боковых сторонах). Одним из методов вывода формул для прогиба и усилий в стержнях регулярных систем является метод индукции. В настоящей работе именно таким методом выводится формула для прогиба фермы рамного типа с подвесным нижним поясом, выполняющим роль затяжки (рис. 2).

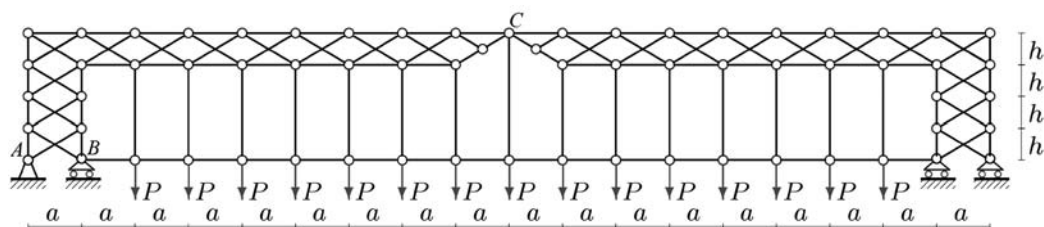


Рис. 2. Равномерная нагрузка по нижнему поясу фермы, $n = 7, m = 3$

Расчетная модель и определение усилий

Ферма состоит из симметричных частей, шарнирно соединенных в узле ферм. Длина пролета $L = 2a(n + 1)$, где a — длина панели, высота фермы $(m + 1)h$. Подвижные опоры соединены затяжкой из стержней длиной a , подвешенных на нижний пояс ригеля. Решетка фермы крестообразная. Четыре опоры, одна из которых — неподвижный шарнир, и три подвижных шарнира создают внешнюю статическую неопределимость, что не дает возможность найти пять реакций опор из условия равновесия фермы в целом. Более того, к этой конструкции не применим метод сечений для непосредственного определения усилий в стержнях. Пользуясь тем, что система статически определима, так как число стержней $\mu = 8m + 12n + 24$ вместе с пятью стержнями, моделирующими опоры, в два раза больше числа внутренних шарниров, усилия в стержнях и реакции опор можно определить из системы уравнений равновесия узлов в проекции на оси координат. Воспользуемся программой, написанной на языке Maple специально для этого случая [29]. В программу вносятся координаты шарниров и порядок соединения стержней. По этим данным определяются направляющие косинусы усилий, являющиеся коэффициентами системы уравнений равновесия узлов. В нечетные строки входят проекции на горизонтальную ось x , в четные — на y . Решение системы дает выражения для усилий и реакций опор в символьном виде. Однако первые же расчеты показали, что для четных значений n и m определитель системы уравнений равновесия обращается в ноль независимо от величины нагрузки и размеров a и h . Это

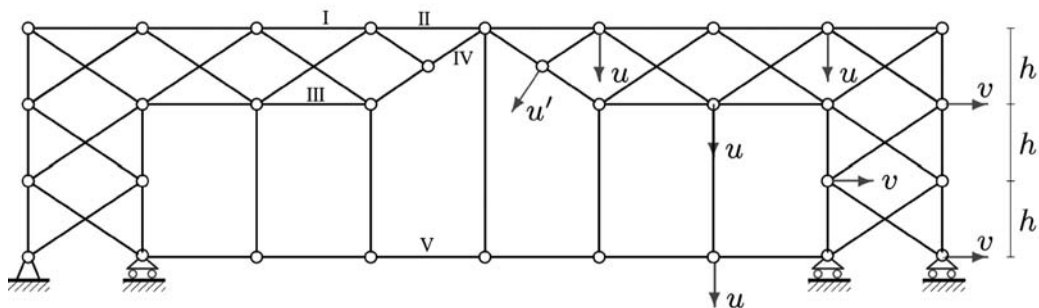


Рис. 3. Схема возможных скоростей узлов кинематически изменяемой фермы и нумерация критических стержней; $n = m = 2$

указывает на кинематическое вырождение конструкции, превращающейся в мгновенно изменяемый механизм. Методами кинематики плоского движения найдена картина распределения виртуальных скоростей, подтверждающая обнаруженный эффект (рис. 3). Соотношение скоростей имеет вид: $v/h = u/a = 2u'/c$, где $c = \sqrt{a^2 + h^2}$ — длина раскоса. Таким образом все расчеты будут проведены для нечетных $n = 2p - 1$, $m = 2q - 1$, $p, q = 1, 2, 3, \dots$

Прогиб

Прогиб Δ конструкции, равный вертикальному смещению сочленяющего шарнира C , определяется по формуле Максвелла—Мора

$$\Delta = \sum_{i=1}^{\mu-5} \frac{S_i s_i l_i}{EF}. \quad (1)$$

Сумма составлена только для деформируемых стержней, пять опорных предполагаются жесткими. Использованы обозначения: S_i — усилия в i -м стержне фермы от действия распределенной нагрузки, s_i — усилие в стержне i от действия единичной вертикальной силы на узел C . Жесткость EF всех стержней принята одинаковой. В результате расчета ряда ферм с разным числом панелей замечено что, вид искомой формулы один и тот же и различается только значениями коэффициентов при степенях размеров a , c , h :

$$\Delta = P \frac{C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3}{EFh^2}. \quad (2)$$

Определение зависимостей коэффициентов от числа панелей (в данном случае от p и q) составляет часть вывода искомой формулы. Так как параметры не зависят друг от друга, то для получения результата требуется метод двойной индукции [17]. Решается задача в два этапа. На первом этапе выполняется индукция по одному параметру при фиксированном втором. Сначала фиксируется, например, число $q=1$ панелей в боковых опорах фермы и рассчитывается прогиб фермы с последовательно увеличивающимся числом панелей в консоли при $p=1, 2, 3, \dots$. Коэффициенты при a^3 образуют последовательность 16, 114, 458, 1308, 3020, 6046... . Если длина последовательности достаточная, то оператор `rgf_findrecur` пакета `genfunc` системы Maple выявляет рекуррентное уравнение, которому удовлетворяют члены последовательности. В данной задаче требуется последовательно рассчитать 10 ферм. Полученное уравнение — линейное однородное пятого порядка: $C_{1,n} = 5C_{1,n-1} - 10C_{1,n-2} - 10C_{1,n-3} - 5C_{1,n-4} + C_{1,n-5}$. Решение этого уравнения дает оператор `rsolve`:

$$C_1 = p(12p^3 + 10p^2 + 9p + 17) / 3. \quad (3)$$

При других значениях q результат в данном случае оказывается тот же. Для коэффициента C_2 уравнение немного проще, четвертого порядка, но решение уже зависит от q . При различных значениях числа панелей q получаются следующие выражения:

$$\begin{aligned} q=1, \quad C_2 &= 4p^3 + 3p^2 + 4p + 2, \\ q=2, \quad C_2 &= 4p^3 + 3p^2 + 6p + 4, \\ q=3, \quad C_2 &= 4p^3 + 3p^2 + 8p + 6, \\ q=4, \quad C_2 &= 4p^3 + 3p^2 + 10p + 8. \dots \end{aligned}$$

Эти выражения достаточно просто без привлечения системы Maple обобщаются на произвольное число q :

$$C_2 = 4p^3 + 3p^2 + 2(q+1)p + 2q. \quad (4)$$

Аналогично получается общий вид коэффициента при h^3

$$\begin{aligned} C_3 &= (12(4q-1)p^3 - 12(4q-1)(q-1)p^2 + \\ &+ 2(8q^3 - 27q^2 + 10q + 3)p + 2(8q^2 - 3q + 1)q) / 3. \end{aligned} \quad (5)$$

Зависимость (2) с коэффициентами (3)—(5) дает решение поставленной задачи. Проверить решение можно, выполнив индукцию в обратном порядке, сначала по числу панелей q , затем по p .

Кривые зависимости прогиба $\Delta' = EF\Delta / (LP_{sum})$, отнесенного к суммарной нагрузке $P_{sum} = (2n + 4m + 1)P$ и длине пролета L числа панелей p , обнаруживают при $p = 4$ экстремум

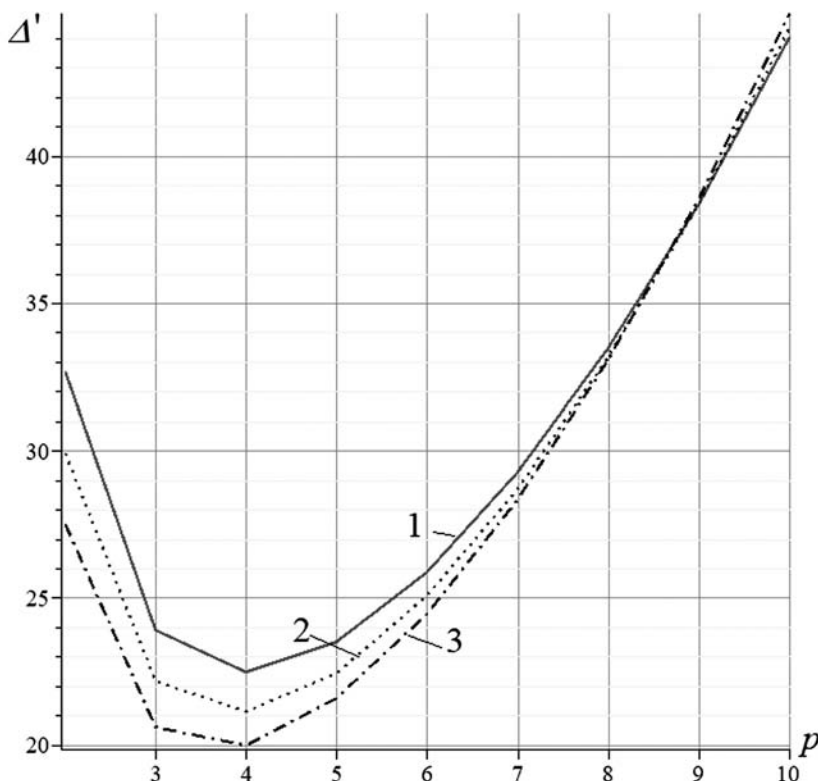


Рис. 4. Зависимость прогиба от числа панелей p , 1— $h = 2,0$ м; 2— $h = 2,1$ м; 3— $h = 2,2$ м

(рис. 4), $L = 50$ м. Эта точка соответствует $n = 7$ и длине панели $a = L / (2(n + 1)) = 50 / 16 = 3,125$ м. С увеличением высоты минимальный прогиб уменьшается, но соответствующее значение длины панели почти не меняется. Кроме того, при числе панелей в ригеле p , близком к 9, кривые пересекаются, что означает равенство прогиба конструкций с разными высотами.

Асимптотика решения для прогиба легко выявляется средствами Maple. Она оказывается квадратичной по числу панелей в ригеле p : $\lim_{p \rightarrow \infty} \Delta' / p^2 = 4hq / L$.

Зависимость безразмерного прогиба от высоты панели h также имеет точку минимума (рис. 5). Кривые построены при $L = 50$ м, $p = 3$.

Эти кривые имеют линейные асимптоты

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \Delta' / h = (48qp^3 - 3(16q^2 - 20q + 1)p^2 + 2(q - 1)(8q^2 - 19q - 6)p + 2q(8q^2 - 3q + 4)) / (3(4p - 1)L).$$

Усилия в стержнях

Для полного расчета конструкции необходимо проверить устойчивость сжатых и прочность растянутых элементов. В процессе вывода формулы для прогиба аналитические выражения для всех усилий были уже найдены. Выпишем формулы для некоторых из них, наиболее сжатых или растянутых. Предположительно это стержни из середины пролета. На рисунке 3 они отмечены римскими цифрами. Методом индукции получены следующие выражения:

$$S_I = S_{II} = -2Pap / h, S_{III} = 2Pap / h, S_{IV} = -3Pap / h, S_V = -Pc / h, S_V = Pa(p + 1) / h.$$

От числа q панелей по вертикали значения этих усилий не зависят. Стержни нижнего и верхнего пояса ригеля оказались сжатыми, стяжка — растянута. Аналогично получаются и выражения для зависимости вертикальных реакций опор от числа панелей:

$$Y_A = -P(2p^2 - 2q - (2q - 1)p), Y_B = P(2p^2 - p(2q - 3) - 2q).$$

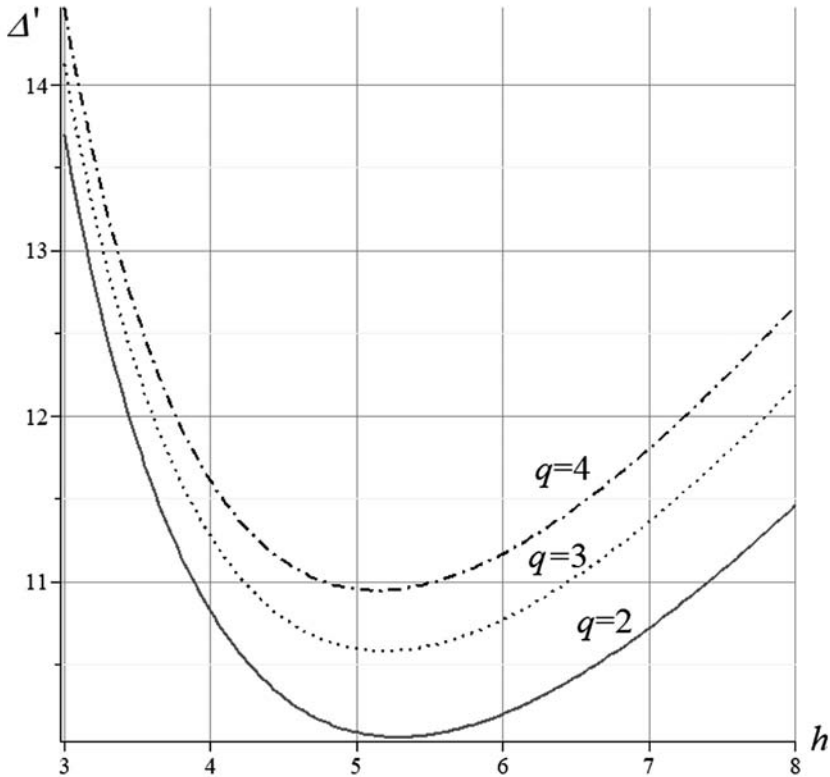


Рис. 5. Зависимость прогиба от высоты панели h при $m = 2n$

Заключение

Предложенная модель рамной фермы с подвесным дополнительным нижним поясом, выполняющим роль затяжки, допускает сравнительно простое аналитическое решение задачи об определении зависимости прогиба от числа панелей. Такая зависимость удобна для оценки гибкости конструкции на этапе проектирования, при выборе числа панелей и их размеров. Графики найденных зависимостей, имеющие точки минимума, подтверждают актуальность поставленной и решенной задачи. Помимо этого в конструкции обнаружен неожиданный дефект: при четном числе панелей в ригеле или по высоте в опорных частях конструкции система кинематически вырождается. Этот результат подсказывает, что конструкции с крестообразной-решеткой (одинарной, как в рассмотренной задаче, или двойной) имеют тенденцию к кинематическому вырождению [29]. В фермах с решетками треугольного типа этого не происходит.

Решение, полученное для случая одинаковых жесткостей стержней, может быть обобщено на стержни разной жесткости. Для этого в формуле (2) при степенях размеров стержней достаточно ввести понижающие или повышающие жесткость коэффициенты, относящиеся к соответствующим размерам [23].

Список литературы

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Бейонн>
2. Ватин Н.И., Синельников А.С. Холодногнутый стальной профиль в малых мостовых конструкциях // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2012. – №. 3. – С. 39–51.
3. Klowak C.S., Mufti A.A. Behaviour of bridge deck cantilever overhangs subjected to a static and fatigue concentrated load // Construction and Building Materials. – 2009. – Т. 23. – №. 4. – С. 1653–1664.
4. Shu J. et al. Assessment of a cantilever bridge deck slab using multi-level assessment strategy and decision support framework // Engineering Structures. – 2019. – Т. 200. – С. 109666.
5. Guest S.D., Hutchinson J.W. On the determinacy of repetitive structures // J. Mech. Phys. Solids. – 2003. – 51. – Pp. 383–391.

6. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids – the hunt for statically determinate periodic trusses // ZAMM Z. Angew. Math. Mech. – 2005. – 85, № 9. – Pp. 607–617.
7. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2006. – Vol. 54. – № 4. – Pp. 756–782.
8. Zok F. W., Latture R. M., Begley M. R. Periodic truss structures // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2016. – Vol. 96. – Pp. 184–203. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2016.07.007>
9. Игнатъев В.А. Расчет регулярных стержневых систем. Саратов: Саратовское высшее военно-химическое военное училище. – 1973.
10. Rybakov L.S. Linear theory of an elastic prismatic framework // Mechanics of Solids. – 2001. – Т. 36. – № 4. – С. 83.
11. Осадченко Н.В. Аналитические решения задач о прогибе плоских ферм арочного типа // Строительная механика и конструкции. – 2018. – № 1. – С. 12–33.
12. Астахов С.В. Вывод формулы для прогиба внешне статически неопределимой плоской фермы под действием нагрузки в середине пролета // Строительная механика и архитектура. – 2017. – Vol. 5. – Issue 2 (15). – 50–54.
13. Bolotina T.D. The deflection of the flat arch truss with a triangular lattice depending on the number of panels // Bulletin of Scientific Conferences. – 2016. – № 4–3 (8). – Pp.7–8.
14. Kazmiruk I.Yu. On the arch truss deformation under the action of lateral load // Science Almanac. – 2016. – № 3–3 (17). – Pp. 75–78.
15. Voropai R.A., Kazmiruk I.Yu. Analytical study of the horizontal stiffness of the flat statically determinate arch truss. Bulletin of Scientific Conferences. – 2016. – № 2–1(6). – Pp. 10–12.
16. Voropay R.A., Domanov E.V. Analytical solution of the problem of shifting a movable support of a truss of arch type in the Maple system // Postulat. – 2019. – № 1.
17. Воропай Р.А., Доманов Е.В. Вывод общей формулы для сдвига подвижной опоры фермы арочного типа индукцией по двум параметрам в системе Maple // Постулат. – 2019. – № 2. – С. 11.
18. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. The dependence of the deflection of the arched truss loaded on the upper belt, on the number of panels // Научный альманах. – 2017. – № 2–3 (28). – С. 268–271.
19. Тимофеева Т.А. Формулы для расчета прогиба плоской решетчатой рамы с произвольным числом панелей // Строительная механика и конструкции. – 2019. – № 4 (23). – С. 26–33.
20. Белянкин Н.А., Бойко А.Ю. Формулы для прогиба балочной фермы с произвольным числом панелей при равномерном нагружении // Строительная механика и конструкции. – 2019. – № 1 (20). – С. 21–29.
21. Ткачук Г.Н. Формула зависимости прогиба несимметрично нагруженной плоской фермы с усиленными раскосами от числа панелей // Строительная механика и конструкции. – 2019. – № 2 (21). – С. 32–39.
22. Бойко А.Ю., Ткачук Г.Н. Вывод формул зависимости прогиба плоской шарнирно-стержневой рамы от числа панелей в системе Maple // Строительная механика и конструкции. – 2019. – № 4 (23). – С. 15–25.
23. Петриченко Е.А. О прогибе консольной фермы с крестообразной решеткой в зависимости от перераспределения площадей стержней и числа панелей // Научный альманах. – 2016. – № 6–2 (19). – С. 279–266.
24. Пережилова Е.Д. Формула для прогиба консольной фермы под действием распределенной нагрузки по верхнему поясу // Постулат. – 2018. – № 12.
25. Белянкин Н.А., Бойко А.Ю., Плясова А.А. Вывод формулы для прогиба плоской решетчатой фермы с консолями в системе Maple методом индукции // Постулат. – 2019. – № 3. – С. 25.
26. Кирсанов М.Н. Аналитический расчет балочной фермы со сложной решеткой // Строительная механика и расчет сооружений. – 2015. – № 3 (260). – С. 7–12.
27. Доманов Е.В. Аналитическая зависимость прогиба пространственной консоли треугольного профиля от числа панелей // Научный альманах. – 2016. – № 6–2 (19). – С. 214–217.
28. Ларичев С.А. Индуктивный анализ влияния строительного подъема на жесткость пространственной балочной фермы // Trends in Applied Mechanics and Mechatronics. М: Инфра–М, 2015. – Т. 1. – С. 4–8.
29. Кирсанов М.Н. Плоские фермы. Схемы и расчетные формулы: справочник. М.: ИНФРА–М, 2019. – 238 с.

FORMULAS FOR CALCULATING THE DEPENDENCE OF THE DEFLECTION OF A TRUSS WITH A SUSPENDED LOWER BELT ON THE NUMBER OF PANELS

M.N. Kirsanov, National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia;
e-mail: mpei2004@Yandex.ru

***Abstract.** Output in analytical form of the dependence of the deflection of the model of a flat statically definable truss in the form of a frame on the number of panels in the crossbar and side parts is obtained. An additional straight lower belt (tie) is suspended from the crossbar. The truss grid is cross-shaped, with two symmetrical parts connected by a hinge. One truss support is a fixed hinge, three supports are movable hinges. The case of a load evenly distributed over the nodes of the suspension belt is considered. The deflection of the truss is determined by the Maxwell–Mohr formula based on the values of forces found in symbolic form from the solution of the system of equilibrium equations of the construction nodes. The operators of the symbol transformation program Maple are used. A series of solutions obtained for farms with different numbers of panels is generalized by induction using two independent parameters to an arbitrary number of panels. The coefficients of the formula for deflection are found from the solution of linear homogeneous recurrent equations that they satisfy. Formulas for the deflection of the structure and forces in the critical (most compressed and stretched) rods are derived. All solutions have the form of*

polynomials no higher than the fourth power. For even numbers of panels, the case of kinematic changeability of the structure was detected and confirmed by the scheme of possible node speeds. An asymptotic analysis of the solution is performed.

Key words: truss, frame, deflection, Maple, induction, number of panels, asymptotics, screed, suspension belt.

References

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Бейонн>
2. Vatin N.I., Sinelnikov A.S. Cold-formed steel profile in small bridge structures. Construction of unique buildings and structures. 2012. №. 3. Pp. 39–51.
3. Klowak C.S., Mufti A.A. Behavior of bridge deck cantilever overhangs achieved to a static and fatigue concentrated load. Construction and Building Materials. – 2009. – Vol. 23. – №. 4. – Pp. 1653–1664.
4. Shu J. et al. Assessment of a cantilever bridge deck slab using multi-level assessment strategy and decision support framework. Engineering Structures. – 2019. – Vol. 200. – Pp. 109666.
5. Guest S.D., Hutchinson J.W. On the determinacy of repetitive structures. J. Mech. Phys. Solids. – 2003. – Vol. 51. – Pp. 383–391.
6. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids – the hunt for statically determinate periodic trusses. ZAMM Z. Angew. Math. Mech. – 2005. – 85, №. 9. – Pp. 607–617.
7. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2006. – Vol. 54. – №. 4. – Pp. 756–782.
8. Zok F.W., Latture R.M., Begley M.R. Periodic truss structures // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2016. – Vol. 96. – Pp. 184–203. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2016.07.007>
9. Ignatiev V.A. Calculation of regular core systems. – Saratov: Saratov Higher Military Chemical Military School, 1973.
10. Rybakov L.S. Linear theory of an elastic prismatic framework // Mechanics of Solids. – 2001. – Vol. 36. – №. 4. – Pp. 83.
11. Osadchenko N.V. Analytical solutions to problems of deflection of flat trusses of arch type // Structural Mechanics and Structures. – 2018. – №. 1. – Pp. 12–33.
12. Astakhov S. The derivation of formula for deflection of statically indeterminate externally flat truss under load at mid-span // Construction and Architecture. – 2017. – Vol. 5. – №. 2. – Pp. 50–54.
13. Bolotina T.D. The deflection of the flat arch truss with a triangular lattice depending on the number of panels // Bulletin of Scientific Conferences. – 2016. – № 4–3 (8). – Pp.7–8.
14. Kazmiruk I.Yu. On the arch truss deformation under the action of lateral load // Science Almanac. – 2016. – № 3–3 (17). – Pp. 75–78.
15. Voropai R.A., Kazmiruk I.Yu. Analytical study of the horizontal stiffness of the flat statically determinate arch truss // Bulletin of Scientific Conferences. – 2016. – № 2–1 (6). – Pp. 10–12.
16. Voropay R.A., Domanov E.V. Analytical solution of the problem of shifting a movable support of a truss of arch type in the Maple system // Postulat. – 2019. – № 1.
17. Voropay R.A., Domanov E.V. The derivation of the general formula for the shift of the movable support of arch type truss using the method of induction on two parameters in the system Maple // Postulate. – 2019. – № 2. – Pp. 11.
18. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. The dependence of the deflection of the arched truss loaded on the upper belt, on the number of panels // Scientific Almanac. – 2017. – № 2–3 (28). – Pp. 268–271.
19. Timofeeva T.A. Formulas for calculating the deflection of a flat lattice frame with an arbitrary number of panels // Structural Mechanics and Structures. – 2019. – № 4 (23). – Pp. 26–33.
20. Belyankin N.A., Boyko A.Yu. Formulas for deflection of a beam truss with an arbitrary number of panels with uniform loading // Structural Mechanics and Structures. – 2019. – № 1 (20). – Pp. 21–29.
21. Tkachuk G.N. The formula for the dependence of the deflection of an asymmetrically loaded flat truss with reinforced braces on the number of panels // Structural Mechanics and Structures. – 2019. – № 2 (21). – Pp. 32–39.
22. Boyko A.Yu., Tkachuk G.N. Derivation of formulas for the dependence of the deflection of a flat hinged-rod frame on the number of panels in the Maple system // Structural Mechanics and Structures. – 2019. – № 4 (23). – Pp. 15–25.
23. Petrichenko E.A. About the deflection of a cantilever truss with a cross-shaped lattice depending on the redistribution of the areas of the rods and the number of panels // Scientific almanac. – 2016. – № 6–2 (19). – Pp. 279–266.
24. Perezhilova E.D. Formula for deflection of a cantilever truss under the action of distributed load in the upper zone // Postulate. – 2018. – № 12.
25. Belyankin N.A., Boyko A.Yu., Plyasova A.A. Derivation of the formula for the deflection of a flat trellised truss with consoles in the Maple system by induction // Postulate. – 2019. – № 3. – Pp. 25.
26. Kirsanov M.N. Analytical calculation of a beam truss with a complex lattice // Structural mechanics and calculation of structures. – 2015. – № 3 (260). – Pp. 7–12.
27. Domanov E.V. The analytical dependence of the deflection of the spatial console of a triangular profile on the number of panels // Scientific almanac. – 2016. – № 6–2 (19). – Pp. 214–217.
28. Larichev S.A. Inductive analysis of the effect of a building lift on the stiffness of a spatial beam truss // Trends in Applied Mechanics and Mechatronics. – Moscow: Infra-M, 2015. – Vol. 1. – Pp. 4–8.
29. Kirsanov M.N. Flat trusses. Schemes and formulas: handbook. – Moscow: Infra-M, 2019. – 238 p.

Для цитирования: Кирсанов М. Н. Формулы для расчета зависимости прогиба фермы с подвесным нижним поясом от числа панелей // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 2. С. 21–27.
DOI: 10.37538/0039-2383.2020.2.21.27

For citation: Kirsanov M.N. Formulas for calculating the dependence of the deflection of a truss with a suspended lower belt on the number of panels. Structural Mechanics and Analysis of Constructions, 2020, no. 2, pp. 21–27. (In Russian).
DOI: 10.37538/0039-2383.2020.2.21.27