

ИНДУКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАТИВНОСТИ МНОГОРЕШЕТЧАТОЙ ФЕРМЫ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ЗАГРУЖЕНИИ

Н. А.Белянкин¹, А. Ю.Бойко², А. А.Плясова³

Национальный исследовательский университет “МЭИ”
Россия, г. Москва

¹Студент; e-mail: belankin2@gmail.com

²Студент; e-mail: boykoanyu@mail.ru

³Студентка; e-mail: annaplyasova13@gmail.com

Ферма с одной неподвижной шарнирной и тремя подвижными опорами имеет двойную крестообразную решетчатую структуру. Показано, что при некоторых значениях числа панелей определитель системы уравнений равновесия узлов вырождается. Выводятся аналитические зависимости прогиба от числа панелей. Уравнения для определения усилий в стержнях решаются в символьной форме в системе компьютерной математики Maple. Применяется формула Максвелла - Мора и метод индукции для получения общего решения.

Ключевые слова: Ферма, прогиб, формула Максвелла-Мора, Maple

INDUCTIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATION OF A MULTI-LINK TRUSS UNDER NON-SYMMETRIC LOADING

N. A.Belyankin¹, A. Y.Boyko², A. A.Plyasova³

*National Research University “MPEI”,
Russia. Moscow*

¹Student; e-mail: belankin2@gmail.com

² Student; e-mail: boykoanyu@mail.ru

³ Student; e-mail: annaplyasova13@gmail.com

A truss has one fixed hinged and three movable supports and a double cross-shaped lattice structure. Analytical dependences of the deflection on the number of panels are derived. It is shown that for some values of the number of panels, the determinant of the system of equilibrium equations for nodes degenerates. Equations for determining the forces in rods are solved in symbolic form in the system of computer mathematics Maple. The Maxwell-Mohr formula and the method of induction are used to obtain a general solution.

Keywords: Truss, deflection, Maxwell-Mohr formula, Maple

Введение

Расчет жесткости фермы, оцениваемой, как правило по перемещению ее узлов под действием нагрузок, выполняется в большинстве случаев численно в стандартных пакетах, основанных на методе конечных элементов. С появлением и развитием систем компьютерной математики (Maple, Mathematica, Derive, Reduce и др.) стало возможным выводить аналитические зависимости с достаточно широкой областью применения таких решений.

Востребованность формул для расчета строительных конструкций определяется числом независимых параметров задачи. Формулы для расчета какой-либо конкретной конструкции, в которые входят только размеры, величина нагрузки определенного вида и характеристики свойств материала получаются в системах компьютерной математики достаточно просто и особой ценности не имеют.

Чем универсальней формула, тем больше ее ценность. Наиболее сложно ввести в формулу целочисленные параметры, характеризующие число панелей или число каких-нибудь ячеек периодичности. В работах [1-6] методом индукции получены решения для плоских ферм. Для ферм консольного типа найдены простые аналитические решения в [7-9]. Серия решений задач о прогибе решетчатых ферм с различным видом решетки содержится в работах [10-18]. Значительно реже встречаются аналитические решения для регулярных статически неопределимых решеток [19]. Ряд ферм арочного вида аналитически рассчитаны в [20-27]. Метод индукции применим в пространственных задачах [28-35] и для внешне неопределимых ферм [35,36]. Известна также приближенная формула Качурина [38] для расчета широкого класса балочных ферм и формулы Игнатьева В.А. [39].

Расчет

В настоящей работе на основе программы [40], использованной в [2] и многих других работах, для нахождения усилий в стержнях статически определимых фермах и упомянутого метода индукции выводятся формулы для прогиба центрального узла плоской фермы (рис. 1). Ферма с n панелями (считаются по нижнему поясу) содержит $m=4n+18$ стержней и $2n+9$ сочленяющих узлов.

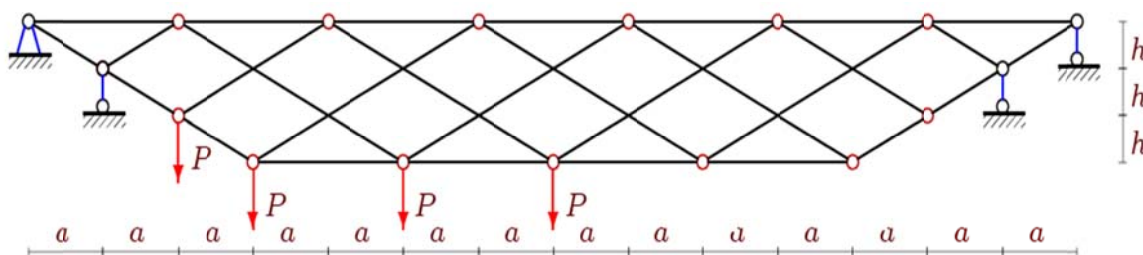


Рис. 1. Ферма при значениях $n = 2k = 4$

Ферма внешне статически неопределима. Из трех уравнений равновесия конструкции в целом найти пять реакций невозможно. Это вытекает из того, что в свободная от опор ферма не является жестким телом, имея две степени свободы. Поэтому для определения реакций опор требуется полный расчет фермы с вырезанием всех узлов и составлением общей системы равновесия. Фермы с похожей решеткой рассчитаны аналитически в [41,42]. Ферма может быть использована как жесткий элемент в составе пространственной конструкции, например покрытия промышленного здания (рис. 2).

1. Рассмотрим решение задачи о действии сил на половину пролета по нижнему поясу. В программу [2] вводятся координаты узлов, порядок соединения стержней и узлов. Результатом расчетов являются аналитические выражения для усилий.

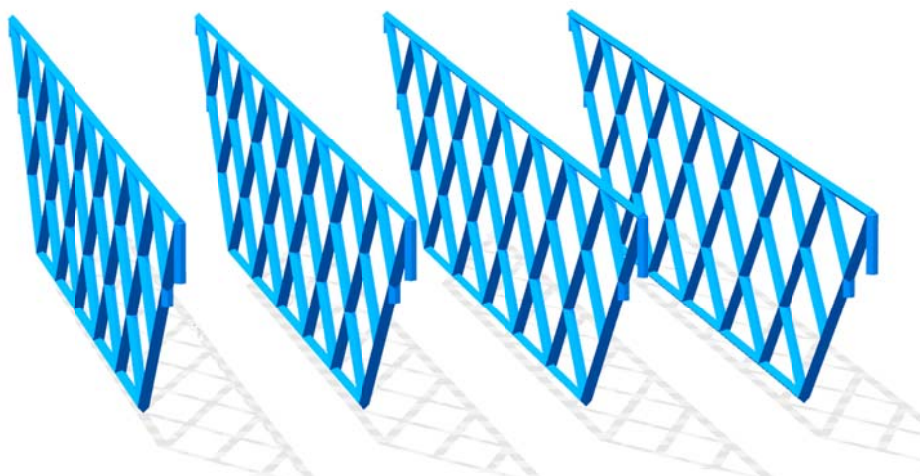


Рис. 2. Ферма в составе пространственной конструкции.
Горизонтальные связи не показаны

Смещение вычисляется по формуле Максвелла – Мора

$$\Delta = P \sum_{i=1}^{m-5} S_i^2 l_i / (EF),$$

где S_i — усилия в стержнях фермы от действия единичной нагрузки P , l_i — длины стержней, EF — жесткость стержней (принята одинаковой для всех стержней). Принимается четное число панелей $n=2k$. Суммирование ведется по всем стержням, кроме опорных. В процессе счета было замечено, что при $k=2,5,8\dots$ определитель системы уравнений равновесия обращается в ноль, что соответствует кинематической изменяемости конструкции. В качестве подтверждения этого факта приведем одну из возможных картин распределения скоростей узлов фермы (рис. 3).

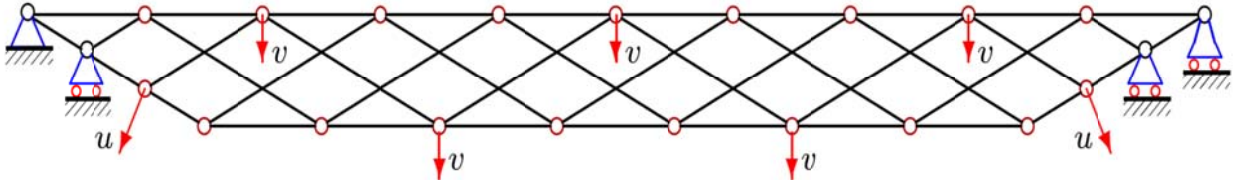


Рис. 3. Схема возможных скоростей узлов изменяемой фермы, $n=2k=4$

Для того, чтобы исключить эти значения из метода индукции для параметра k выбирается закон изменения $k = ((-1)^j + 6j - 1) / 4, j=1,2,3\dots$

Получено следующее выражение для прогиба

$$EF\Delta = P(A_j a^3 + C_j c^3) / (2h^2) \quad (1)$$

где $c = \sqrt{h^2 + a^2}$.

Рассчитаем коэффициенты в (1) от нагрузки по нижнему поясу при нагрузке от 3-го узла, до узла $(6j + 15 + (-1)^j) / 4$ (рис.1). Методом индукции получено

$$A_j = (4j^3 + 6(1 + (-1)^j)j^2 + 2(4 + 3(-1)^j)j + (-1)^j + 5) / 2,$$

$$C_j = (6j + (-1)^j + 5) / 2..$$

Для получения этих зависимостей из решений для ферм с числом панелей от 1 до 14 были выявлены последовательности коэффициентов перед кубами линейных размеров a и c :

- Для размера a : 5, 57, 59, 255, 257, 693, 695, 1467, 1469, 2673, 2675, 4407, 4409, 6765, 6767, 9843;
- Для размера c : 5, 9, 11, 15, 17, 21, 23, 27, 29, 33, 35, 39, 41, 45, 47, 51.

Для последовательностей меньшей длины закономерность не определялась. Оператор **rgf_findrecur** из пакета **genfunc** системы Maple по этим данным дал однородное линейное рекуррентное уравнение, которому удовлетворяют члены последовательностей:

$$A_j = A_{j-1} + 3A_{j-2} - 3A_{j-3} - 3A_{j-4} + 3A_{j-5} + A_{j-6} - A_{j-7}$$

Такое же уравнение получилось и для коэффициента C_j . График зависимости безразмерного прогиба фермы $\Delta' = \Delta EF / (P_0 L)$ при в данном случае при $a = L / (4n)$ от числа панелей представлен на рис. 4.

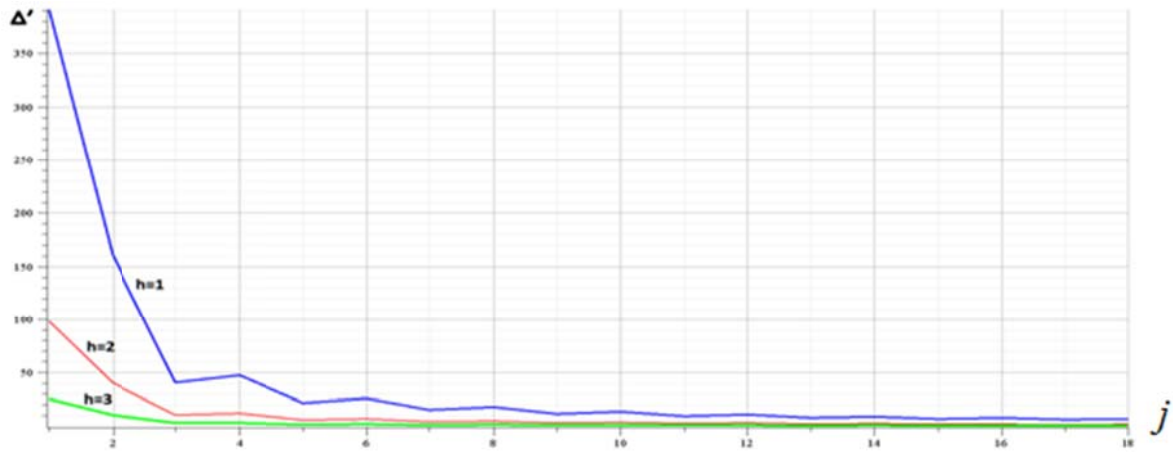


Рис. 4. График зависимости прогиба фермы от числа панелей, $L=100\text{м}$

2. Аналогично, рассчитаем в (1) коэффициенты от нагрузки по *верхнему* поясу (рис. 5).

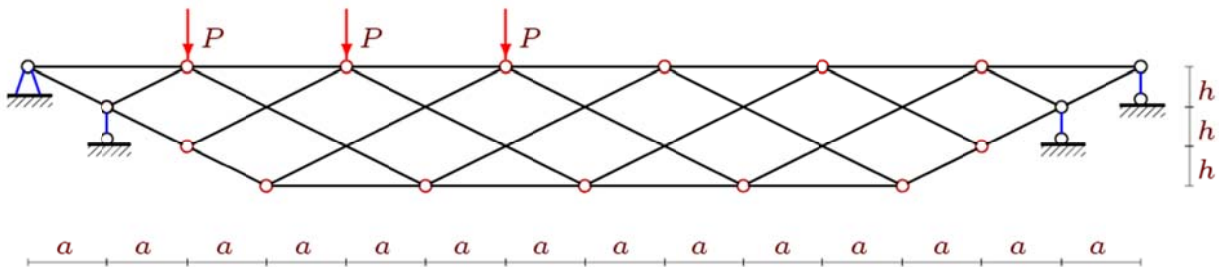


Рис. 5. Ферма с нагрузкой по верхнему поясу $n=4$

Стоит отметить, что расчет проводился отдельно для узлов фермы с четными и нечетными по счету порядковыми номерами соответственно.

2.1. Методом индукции при нагрузке в узлах фермы с *четными* порядковыми номерами (с 2-го до 20-го) получено:

$$A_j = 32j^4 + 64j^3 - 12j^2 - 44j + 15,$$

$$C_j = (4j^2 + 4j - 3) / 3.$$

Для этого из решений для ферм с числом панелей от 1 до 14 были выявлены последовательности коэффициентов перед кубами линейных размеров a и c :

- Для размера a : 55, 903, 4095, 11935, 27495, 54615, 97903, 162735, 255255, 382375;
- Для размера c : 15, 63, 135, 231, 351, 495, 663, 855, 1071, 1311

Оператор **rgf_findrecur** из пакета **genfunc** системы Maple по этим данным дал рекуррентные уравнения, которым удовлетворяют члены последовательностей:

$$A_j = 5A_{j-1} - 10A_{j-2} + 10A_{j-3} - 5A_{j-4} + A_{j-5}$$

$$C_j = 3C_{j-1} - 3C_{j-2} + C_{j-3}.$$

Отметим, что в данном случае общая формула расчета прогиба имеет вид:

$$EF\Delta = P(A_j a^3 + C_j c^3) / ((2h^2)(j+1))$$

График зависимости прогиба фермы от числа панелей в данном случае при $a = L / (4n)$, $\Delta' = \Delta EF / (P_0 L)$, представлен на рис. 6.

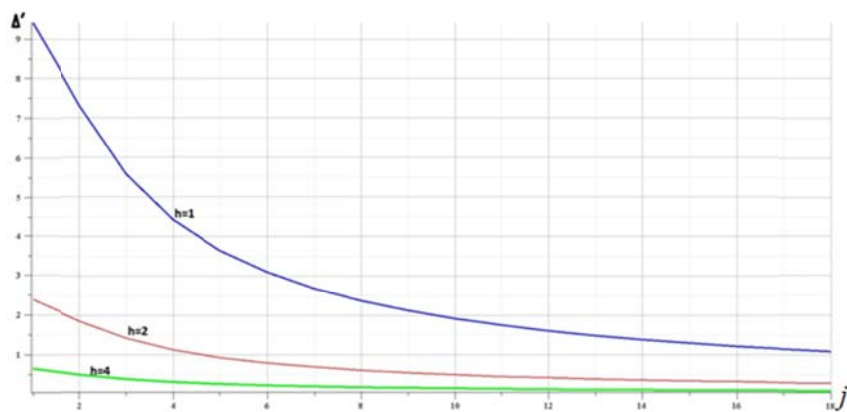


Рис. 6. График зависимости прогиба фермы от числа панелей, $L=100$ м

2.2. Аналогично, методом индукции при нагрузке в узлах фермы с *нечетными* порядковыми номерами (с 3-го до 19-го) получено:

$$A_j = 64j^5 + 160j^4 + 40j^3 - 92j^2 - 6j + 25,$$

$$C_j = 24j^3 + 44j^2 + 2j + 1.$$

Для этого из решений для ферм с числом панелей от 1 до 14 были выявлены последовательности коэффициентов перед кубами линейных размеров a и c :

- Для размера a : 191, 4573, 28771, 107585, 302695, 710341, 1469003, 2767081, 4850575, 8030765, 12691891, 19298833, 28404791, 40658965;
- Для размера c : 71, 373, 1051, 2249, 4111, 6781, 10403, 15121, 21079, 28421, 37291, 47833, 60191, 74509.

Оператор `rgf_findrecur` из пакета `genfunc` системы Maple по этим данным дал рекуррентные уравнения, которым удовлетворяют члены последовательностей:

$$A_j = 6A_{j-1} - 15A_{j-2} + 20A_{j-3} - 15A_{j-4} + 6A_{j-5} - A_{j-6}$$

$$C_j = 4C_{j-1} - 6C_{j-2} + 4C_{j-3} - C_{j-4}.$$

Формула расчета прогиба для данного случая имеет следующий вид:

$$EF\Delta = P(A_j a^3 + C_j c^3) / ((2h^2)(2j+1)^2)$$

График зависимости прогиба фермы от числа панелей в данном случае при $a = L / (4n)$, $\Delta' = \Delta EF / (P_0 L)$, представлен на рис. 7.

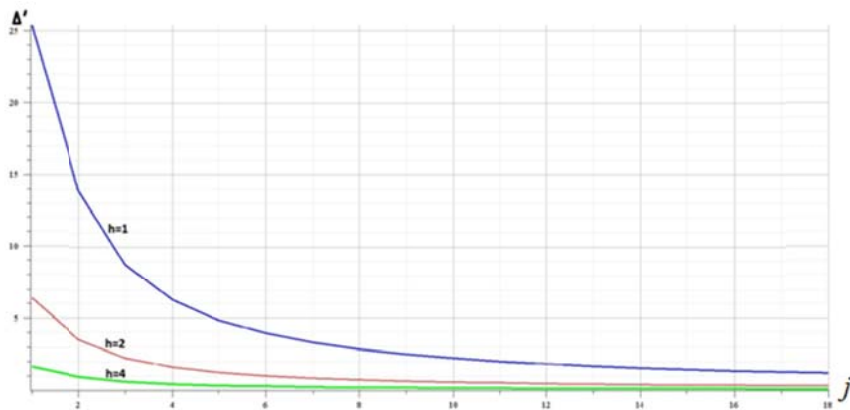


Рис. 7. График зависимости прогиба фермы от числа панелей, $L=100$ м

Выводы

Получены аналитические выражения для зависимости прогиба от числа панелей при несимметричном нагружении фермы. Подобное решение для простой балочной фермы с использованием метода двойной индукции было получено ранее Рахматулиной А. и Смирновой А. [6]. Здесь же решена более сложная задача о ферме, допускающей кинематическую изменяемость. Основная трудность возникла из-за невозможности в отдельных случаях получить искомые зависимости в общем случае. Потребовалось разделить задачу на две — отдельно получено для четного числа, связанного с числом панелей, отдельно — для нечетного.

Обзор работ, использующих метод индукции для вывода аналитических зависимостей для плоских ферм, дан в [43].

Библиографический список

6. Кирсанов М.Н. О влиянии наклона подвижной опоры на жесткость балочной фермы // Вестник МГСУ. 2016. № 10. С. 35-44.
7. Кирсанов М.Н. Индуктивный анализ влияния погрешности монтажа на жесткость и прочность плоской фермы // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 5 (31). С. 38-42.
8. Кирсанов М.Н. Аналитический расчет прогиба двухпролетной плоской фермы // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 5. С. 35-38.
9. Kirsanov M.N. Analytical calculation, marginal and comparative analysis of a flat girder // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2016. № 1 (29). С. 84-105.
10. Voropay R.A., Domanov E.V. The formula for the dependence of the deflection of a truss with an asymmetric lattice on the number of panels // Postulat. 2018. No. 6
11. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. The formula for the deflection of a truss loaded at half-span by a uniform load // Postulat. 2018. №. 3. 22.
12. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. Two-parameter derivation of the formula for deflection of the console truss // Postulat. 2018. No. 5.
13. Kitaev S.S. Derivation of the formula for the deflection of a cantilevered truss with a rectangular diagonal grid in the computer mathematics system Maple// Postulat. 2018. No. 5
14. Domanov E.V. The dependence of the deflection of the cantilever truss on the number of panels obtained in the system Maple // Строительная механика и конструкции. 2018. №.2 17. С. 80-86.
15. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. Analytical calculation and analysis of planar springel truss // Строительная механика и конструкции. 2018. № 2 (17). С. 72-79.
16. Кирсанов М.Н. Вывод формулы для прогиба решетчатой фермы, имеющей случаи кинематической изменяемости // Строительная механика и конструкции. 2017. Т. 1. № 14. С. 27-30.
17. Кирсанов М.Н. К выбору решетки балочной фермы// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 3. С. 23-27.
18. Кирсанов М.Н. Формулы для расчета прогиба и усилий в решетчатой ферме//Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 4. С. 20-23.
19. Кирсанов М.Н. Аналитический расчет балочной фермы с решеткой типа "butterfly"//Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 4 (267). С. 2-5.
20. Кирсанов М.Н. Аналитический расчет балочной фермы со сложной решеткой // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 3 (260). С. 7-12.
21. Кирсанов М.Н. Аналитический метод расчета прогиба плоской фермы со сложной решеткой шпренгельного типа // Транспортное строительство. 2017. № 5. С. 11-13.
22. Kirsanov M.N. A precise solution of the task of a bend in a lattice girder with a random number of panels // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2018. № 1 (37). С. 92-99.
23. Кирсанов М.Н. Зависимость прогиба плоской решетчатой фермы от числа панелей // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 10. С. 24-27.
24. Кирсанов М.Н. Аналитический расчет многорешетчатой фермы // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 6 (257). С. 2-6.

25. Kazmiruk I.Yu. On the arch truss deformation under the action of lateral load //Science Almanac. 2016. No. 3-3(17). Pp. 75-78. DOI: 10.17117/na.2016.03.03.075
26. 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. N 2-3(28). С. 268-271. https://elibrary.ru/download/elibrary_28913798_61471993.pdf
27. Кирсанов М.Н., Степанов А.С. О зависимости деформаций плоской арочной фермы от числа панелей // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 5 (274). С. 9-14.
28. Кирсанов М.Н. Формулы для расчета прогиба арочной фермы // Строительная механика и конструкции. 2018. Т. 1. № 16. С. 7-11.
29. Кирсанов М.Н. Аналитическое исследование деформаций плоской фермы арочного типа // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 3 (31). С. 42-48.
30. Кирсанов М.Н. Индуктивный анализ деформации арочной фермы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Т. 14. № 1. С. 64-70.
31. Кирсанов М.Н. Аналитическая оценка прогиба и усилий в критических стержнях арочной фермы // Транспортное строительство. 2017. № 9. С. 8-10.
32. Кирсанов М.Н. Сравнительный анализ жесткости двух схем арочной фермы // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 9 (36). С. 44-55.
33. Кирсанов М.Н. Статический расчет и анализ пространственной стержневой системы// Инженерно-строительный журнал. 2011. № 6 (24). С. 28-34.
34. Кирсанов М.Н. Аналитический расчет и оптимизация пространственной балочной фермы//Вестник Московского энергетического института. 2012. № 5. С. 5-8.
35. Кирсанов М.Н. Аналитический расчет пространственной стержневой системы // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 1. С. 49-53.
36. Кирсанов М.Н. Расчет пространственной стержневой системы, допускающей мгновенную изменяемость//Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 3 (242). С. 48-51.
37. Леонов П.Г., Кирсанов М.Н. Аналитический расчет и анализ пространственной стержневой конструкции в системе maple // В сборнике: Информатизация инженерного образования ИН-ФОРИНО-2014 Труды международной научно-методической конференции. 2014. С. 239-242.
38. 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
39. Доманов Е. В. Аналитическая зависимость прогиба пространственной консоли треугольного профиля от числа панелей//Научный альманах. 2016. №6-2 (19). С. 214-217. DOI: 10.17117/na.2016.06.02.214
40. Кирсанов М.Н. Оценка прогиба и устойчивости пространственной балочной фермы // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 5 (268). С. 19-22.
41. Domanov E.V. The formula for the dependence of the deflection of an externally statically indeterminate truss on the number of panels // Postulat. 2018. №. 6
42. Arutyunyan V.B. Calculation of the deflection of a statically indeterminate beam truss // Postulat 2018. №. 6.
43. Качурин В.К. О прогибе мостовых ферм. –М.: сб.17, НТК НКПС, 1928.
44. Игнатъев В.А. Расчет регулярных стержневых систем/ В.А. Игнатъев. – Саратов: Саратовское высшее военно-химическое военное училище, 1973. – 433 с.
45. Кирсанов М. Н. Maple и MapleT. Решения задач механики. СПб.: Изд-во Лань, 2012. 512 с.
46. Voropay R.A. Derivation of the formula for the deflection of the truss with additional horizontal struts // Postulat. 2018. No. 6.
47. Domanov E.V. An analytical solution of the problem of the externally statically indeterminate truss deflection with an arbitrary number of panels // Postulat. 2017. №. 7.
48. Осадченко Н.В. Аналитические решения задач о прогибе плоских ферм арочного типа // Строительная механика и конструкции. 2018. Т. 1. № 16. С. 12–33.

References

6. Kirsanov M.N. On the influence of the inclination of a mobile support on the rigidity of a beam truss, *Vestnik MGSU*, 2016, no. 10, pp. 35-44.
7. Kirsanov M.N. Inductive analysis of the effect of the installation error on the stiffness and strength of a flat truss, *Engineering and Construction Journal*, 2012, no. 5(31), pp. 38-42.
8. Kirsanov M.N. Analytical calculation of the deflection of a two-span flat truss, *Mechanization of construction*, 2017, 78. no. 5, pp. 35-38.
9. Kirsanov M.N. Analytical calculation, marginal and comparative analysis of a flat girder. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2016, no. 1(29), pp. 84-105.
10. Voropay R.A., Domanov E.V. The formula for the dependence of the deflection of a truss with an asymmetric lattice on the number of panels, *Postulat*, 2018, no. 6.
11. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. The formula for the deflection of a truss is loaded at half-span by a uniform load, *Postulat*, 2018, no. 3, 22.
12. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A. Two-parameter derivation of the formula for deflection of the console truss, *Postulat*, 2018, no. 5.
13. Kitaev S.S. Derivation of the formula for the deflection of a cantilevered truss with a rectangular diagonal grid in the computer mathematics system Maple, *Postulat*, 2018, no. 5.
14. Domanov E.V. *Stroitel'naya mekhanika i konstrukcii* [Structural Mechanics and Structures], 2018, no. 2(17), pp. 80-86.
15. Rakhmatulina A.R., Smirnova A.A., Analytical calculation and analysis of planar springel truss *Stroitel'naya mekhanika i konstrukcii* [Structural Mechanics and Structures], 2018, no. 2(17), pp. 72-79.
16. Kirsanov M.N. Derivation of the formula for the deflection of a lattice truss, which has cases of kinematic variability *Stroitel'naya mekhanika i konstrukcii* [Structural Mechanics and Structures], 2017, vol. 1, no. 14, pp. 27-30.
17. Kirsanov M.N. To the choice of the lattice of the beam truss, *Construction mechanics of engineering structures and structures*, 2017, no. 3, pp. 23-27.
18. Kirsanov M.N. Formulas for the calculation of deflection and effort in the lattice farm, *Mechanization of construction*, 2017, no.4, pp. 20-23.
19. Kirsanov M.N. Analytical calculation of a beam truss with a "butterfly" type grating, *Construction mechanics and calculation of structures*, 2016, no. 4(267), pp. 2-5.
20. Kirsanov M.N. Analytic calculation of a beam truss with a complex lattice, *Construction mechanics and calculation of structures*, 2015, no. 3(260), pp. 7-12.
21. Kirsanov M.N. Analytical method for calculating the deflection of a flat truss with a complex grid of a spiral type, *Transport construction*, 2017, no. 5, pp. 11-13.
22. Kirsanov M.N. A precise solution of the problem of a bend in a lattice girder with a random number of panels, *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2018, no. 1, (37). pp. 92-99.
23. Kirsanov M.N. Dependence of the deflection of a flat lattice truss on the number of panels, *Mechanization of construction*, 2017, no. 10, pp. 24-27.
24. Kirsanov M.N. Analytical calculation of multi-lattice truss, *Construction mechanics and calculation of structures*, 2014, no. 6(257), pp. 2-6.
25. Kazmiruk I.Yu. On the arch truss deformation under the action of lateral load, *Science Almanac*. 2016. no. 3-3 (17). pp. 75-78. DOI: 10.17117 / na.2016.03.03.075
26. 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, *Science almanac*, 2017. no.2-3(28), pp. 268-271. https://library.ru/download/elibrary_28913798_61471993.pdf
27. Kirsanov M.N., Stepanov A.S. On the Dependence of the Deformations of a Flat Arched Truss on the Number of Panels, *Construction Mechanics and Calculation of Structures*, 2017, no. 5(274), pp. 9-14.
28. Kirsanov M.N. Formulas for calculating arch truss deflection, *Construction mechanics and structures*, 2018, vol. 1, no. 16. pp. 7-11.

29. Kirsanov M.N. Analytical study of the deformations of a flat truss of an arched type, *Vestnik of the State University of Marine and River Fleet them. Admiral S.O. Makarov*, 2015, no. 3(31), pp. 42-48.
30. Kirsanov M.N. Inductive analysis of arched truss deformation. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2018, no. 1, pp. 64-70.
31. Kirsanov M.N. Analytic evaluation of deflection and forces in critical arched trusses, *Transport construction*, 2017, no.9, pp. 8-10.
32. Kirsanov M.N. Comparative analysis of the rigidity of two schemes of an arch farm, *Building of unique buildings and structures*, 2015, no. 9(36), pp. 44-55.
33. Kirsanov M.N. Static calculation and analysis of the spatial core system, *Engineering and construction journal*, 2011, no.6(24), pp. 28-34.
34. Kirsanov M.N. Analytical calculation and optimization of a spatial beam farm, *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*, 2012, no.5, pp. 5-8.
35. Kirsanov M.N. Analytical calculation of the spatial bar system, *Construction mechanics of engineering structures and structures*, 2012, no.1, pp. 49-53.
36. Kirsanov M.N. Calculation of a three-dimensional bar system permitting instantaneous variability, *Construction mechanics and design of structures*, 2012, no.3(242), pp. 48-51.
37. Leonov PG, Kirsanov M.N. Analytical calculation and analysis of the spatial core structure in the maple system, In the collection: *Informatization of engineering education INFORMINO-2014 Proceedings of the International Scientific and Methodical Conference*, 2014, pp. 239-242.
38. Larichev S.A. Inductive Analysis of the Influence of the Building Rise on the Stiffness of a Spatial Beam Farm, *Trends in Applied Mechanics and Mechatronics*. M: Infra-M, 2015, vol. 1. pp. 4-8.
39. Domanov E.V. Analytic dependence of the deflection of the spatial console of a triangular profile on the number of panels, *Science Almanac*, 2016, no. 6-2(19), pp. 214-217. DOI: 10.17117 / na.2016.06.02.214
40. Kirsanov M.N. Evaluation of the deflection and stability of a spatial beam truss, *Construction mechanics and calculation of structures*, 2016, no.5(268). pp. 19-22.
41. Domanov E.V. The formula for the dependence of the deflection of an externally statically indeterminate truss on the number of panels, *Postulat*. 2018. no. 6
42. Arutyunyan V.B. Calculation of the deflection of a statically indeterminate beam truss, *Postulat*, 2018, no. 6.
43. Kachurin, V.K. On the deflection of bridge trusses. Moscow. Collection 17, NTK NKPS, 1928.
44. Ignatiev V.A. Calculation of regular rod systems. Saratov: Saratov Higher Military-Chemical Military School, 1973, 433 p.
45. Kirsanov M. N. Maple and Maplet. Solutions of mechanics problems. SP.: Publishing house LAN, 2012. 512 p.
46. Voropay R.A. Derivation of the formula for the deflection of the truss with additional horizontal struts, *Postulat*, 2018, no. 6.
47. Domanov E.V. An analytical solution of the problem of the externally statically indeterminate truss deflection with an arbitrary number of panels, *Postulat*, 2017, no. 7.
48. Osadchenko N.V. Analytical solutions of problems on the deflection of planar trusses of arch type. *Stroitel'naya mekhanika i konstrukcii* [Structural Mechanics and Structures], 2018, vol. 1. no.16. pp. 12–33.