

ФИЗИКА. МЕХАНИКА. ХИМИЯ

doi: 10.51639/2713-0576_2023_3_2_62

УДК 621.01:624.072.23

ГРНТИ 30.19.33

ВАК 05.02.18

**Неподвижные механические системы при синтезе стержневых конструкций
строительного назначения**

* Баклушина И. С., Зенков И. Д., Тимофеев Д. С.

*Сибирский Государственный Индустриальный Университет
654080, г. Новокузнецк, ул. Кирова 42*email: * baklushina-is@mail.ru, vanya.zenkov@mail.ru, timofeev_2k@mail.ru

Данная статья посвящена вопросу структурного синтеза неподвижных механических систем. Отсутствие в строительной механике алгоритмичного решения к задачам создания стержневых плоских ферм сложного типа определяет актуальность проблемы. Установленная органическая связь между кинематическими цепями с нулевой степенью подвижности и ферменных конструкций предполагает применение методов теории машин к решению задач синтеза стержневых жестких систем. Рассматриваются этапы построения сложных двухопорных конструкций с использованием способа создания конструктивных схем строительных ферм. Показаны примеры организации сложных девятистержневых ферм симметричного исполнения при проведении процедур связки, развязки и перевязки узлов фермы и одноподвижных кинематических пар группы Ассура. В статье приводятся некоторые варианты новых структурных схем, полученных авторами в результате научной работы, подтверждающие новизну исследований. Конструктивные схемы ферм представляют практический интерес для инженеров строительного направления.

Ключевые слова: группа Ассура, одноподвижные кинематические пары, структурный синтез, стержневая сложная ферма, неподвижные механические системы.

Теория структуры кинематических цепей профессора Л. Т. Дворникова и способ создания конструктивных схем строительных ферм

В данной работе рассматривается вопрос создания стержневых строительных конструкций, в частности, двухопорных плоских ферм сложного типа. Речь идёт о структурном синтезе таких конструктивных схем строительных ферм, к которым нельзя применить метод наращивания узлов с двумя стержнями. Актуальность проблемы обусловлена отсутствием в курсе строительной механики [1] единого алгоритма при соблюдении определённой последовательности действия которого, приводило бы к получению сложной жёсткой системы. Широко известная стержневая ферма, так называемая ферма В. Г. Шухова сетчатого покрытия, также не имеет описания метода построения схемы и является частным оригинальным решением инженера-учёного.

В 1994 г. профессором Л. Т. Дворниковым разработана и опубликована теория структуры кинематических цепей любой сложности. Им, как основателем научной школы Сибирского государственного индустриального университета, с 1998 г. было создано научно-исследовательское направление по теории стержневых систем строительного назначения, где

впервые решались задачи структурного синтеза плоских двухопорных ферм сложного типа. В основу способа создания конструктивных схем строительных ферм [3] положена теория строения кинематических цепей, а именно групп Ассура.

Известно, что группами Ассура называются плоские кинематические цепи с одноподвижными парами, обладающие нулевой степенью подвижности. При закреплении свободных пар группы на стойку получается неподвижная механическая система, в которой отсутствуют какие-либо относительные движения звеньев цепи. Ферменные конструкции представляют собой геометрически неизменяемые и статически определимыми жёсткие системы, стержни, которых соединены узлами. Узлы выполняются шарнирными, что даёт возможность соблюдать основные требования строительной механики к ферме, как несущей конструкции. Тогда, согласно [4] „...любой момент, возникающий между стержнями, реализуется относительным смещением стержней в шарнире...”, и линейные элементы конструкций будут работать только на растяжение и сжатие. Тесная органическая связь между группами Ассура и стержневыми ферменными конструкциями позволила применить методы теории машин к созданию сложных строительных ферм. Другими словами, неподвижная механическая система является прямым объектом структурного исследования стержневых конструкций строительного назначения.

Покажем решение задачи структурного синтеза девятизвенных двухопорных ферм сложного типа. На начальном этапе необходимо определиться с исходными параметрами, необходимых и достаточных при создании групп Ассура. Второй шаг заключается в определении величин и установление границ диапазонов существующих значений параметров, характеризующих получение кинематических цепей с нулевой степенью подвижности. Затем проводится непосредственное построение структурной схемы группы, начиная с базисного звена (τ), как наиболее геометрически сложного звена цепи. Применение метода связки кинематических пар группы Ассура в узлы строительной конструкции, тем самым превращая каждое звено в линейный стержень, позволяет осуществить организацию структурной схемы сложной фермы. Последующее чередование процедур развязки и перевязки узлов даёт иные конфигурации структур неподвижной механической системы. На рис. 1 помещены все пять основных этапов решения задачи с указанием их последовательности выполняемых действий.



Кратко остановимся на аналитических решениях, включающих первые два этапа метода синтеза структур кинематических цепей. К независимым параметрам на первом этапе относятся:

- 1) число наложенных связей $m = 3$, т.к. рассматриваются плоские цепи;
- 2) нулевая степень подвижности $W = 0$ для групп Ассура;
- 3) одноподвижные вращательные кинематические пары p_5 .

Начальными параметрами являются общее количество шарниров, число нереализованных кинематических пар, которые будут соединяться с опорами в строительной конструкции и число линейных элементов, оставляющих неподвижную систему. Для десятизвенной плоской цепи с нулевой степенью подвижности по известной в теории механизмов и машин

формуле П. Л. Чебышева имеем, что $p_5 = 3n/2 = 15$. В контексте поставленной задачи создаются двухопорные жёсткие системы, следовательно, число свободных выходов группы, т.е. нереализованных пар должно равняться двум $\delta = 2$. Разность между количеством звеньев группы ($n_{гр}$) и числом стержней фермы (n_{ϕ}) составляет единицу, т.к. одно из звеньев, имеющим свободный выход, при организации конструкции переходит в подвижную опору, тогда $n_{гр} = n_{\phi} + 1$. Таким образом, при синтезе девятистержневой фермы необходимо будет построить десятизвенную группу ($n = 10$).

На втором этапе, основанном на теории структуры механических систем профессора Л. Т. Дворникова [2], определяются независимые параметры и их возможные значения.

- 1) Базисное звено τ , определяемое количеством кинематических пар, считается самым геометрически сложным звеном группы, значения которого в зависимости от количества звеньев цепи принадлежит интервалу

$$3 \leq \tau \leq n/2 + 1, \quad (1)$$

т.е. может быть трёх-, четырёх-, пяти- и шестипарным.

- 2) Решения универсальной структурной системы (2) дают количественную и качественную характеристики составляющих звеньев n_i , которые, будучи введёнными в цепь, добавляют по i – кинематических пар.

$$\begin{cases} p_5 = \tau + (\tau - 1) \cdot n_{\tau-1} + \dots + i \cdot n_i + \dots + 2n_2 + n_1; \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1. \end{cases} \quad (2)$$

- 3) Замкнутые изменяемые контуры, появляющиеся в цепи, имеют связь s , так называемым параметром – γ , величина которого показывает количество свободных выходов открытой группы и определяется разностью между общим числом кинематических пар и количеством нереализованных шарниров. Очевидно, что с образованием в группе замкнутых изменяемых контуров величина параметра – γ уменьшается и будет представлять сумму числа оставшихся свободных выходов (δ) и количества этих контуров (α).

$$\gamma = p_5 - (n - 1) \text{ и } \gamma = \alpha + \delta. \quad (3)$$

Тогда справедлива зависимость

$$\alpha = \gamma - \delta. \quad (4)$$

Таким образом, по формуле (4) при синтезе двухопорных неподвижных механических систем структурные схемы будут иметь в своем составе четыре замкнутых изменяемых контура ($\alpha = 4$).

- 4) Еще одним важным параметром является общее количество сторон цепи (λ), определяемое сложностью базисного звена и в случае открытой, т.е. «нормальной по Ассуру» группы, может быть подсчитана как

$$\lambda = \tau + \sum_{i=1}^{\tau-1} i \cdot n_{(\tau-1)}. \quad (5a)$$

С появлением в цепи замкнутых изменяемых контуров общее количество сторон цепи увеличивается на их количество и представляет собой сумму наружных (λ_H) и внутренних (λ_B) сторон группы.

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda + \alpha = \lambda_H + \lambda_B. \quad (5b)$$

Установка границ существующих значений параметров наружных ($\lambda_{Hmin} \leq \lambda_H \leq \lambda_{Hmax}$) и внутренних ($\lambda_{Bmin} \leq \lambda_B \leq \lambda_{Bmax}$) сторон происходит с учетом двух условий:

- наличия в группе двух свободных выходов, тогда $\lambda_{Hmin} = 7$ и представлена суммой 3+4;
- присутствие четырёх замкнутых изменяемых контуров $\lambda_{Bmin} = 4\alpha = 16$, представляющей минимальную комбинацию 4 + 4 + 4 + 4.

Максимальные значения наружных и внутренних сторон определяются соответствующими зависимостями (6)

$$\lambda_{Hmax} = \lambda_{\Sigma} - \lambda_{Bmin} \text{ и } \lambda_{Bmax} = \lambda_{\Sigma} - \lambda_{Hmin}. \quad (6)$$

В [5] был разработан метод структурного синтеза многозвенных групп Ассура и аналитически получены все структурные решения десятизвенных плоских кинематических

цепей. В данной статье решается задача синтеза неподвижной механической системы, представляющей собой плоскую двухопорную ферму сложного типа. Будем строить группу, имеющую два свободных выхода и, согласно одному из решений, следующие параметры:

- десятизвенная группа Ассура ($n = 10$);
- четырёхугольное базисное звено $\tau = 4$;
- одно звено, добавляющее в цепь три одноподвижные кинематические пары ($n_3 = 1$);
- восемь звеньев, добавляющих по одной паре ($n_1 = 8$);
- расстояния между свободными выходами группы, т.е. число наружных сторон

$$\lambda_n = 9 (4+5);$$
- четыре замкнутых изменяемых контуров, т.е. число внутренних сторон

$$\lambda_b = 19 \cdot (4 + 5 + 5 + 5).$$

Построение десятизвенной группы Ассура (рис. 2) проводится в следующей последовательности: к четырёхугольному базисному звену 1(τ)-ABCD посредством шарнира D осуществляется связь со звеном 2(n_3), добавляющим в цепь три кинематические пары E,F,G. К свободным шарнирам базисного звена B,C и звена 2E,F,G присоединяем пять линейных звеньев 3(n_1), 4(n_1), 5(n_1), 6(n_1) и 7(n_1), которые вводят по одной паре H, I, J, K, L соответственно. Звеном 8(n_1) реализуется шарнирная связь с 3,4 и 5 звеньями с добавлением в группу одной пары M, что организует два замкнутых изменяемых контура: четырёхугольный α_4 (CBHI) и пятиугольный α_5 (DCIJG). Далее, соединя шарниры M и K звеном 9(n_1), добавляющим пару N, образуется в цепи пятиугольный замкнутый изменяемый контур α_5 (JMKFG). Звено 10(n_1) замыкает пятиугольный контур α_5 (FKNLE), присоединяясь шарнирами N и L, и, вводя в цепь пару O, завершает построение.

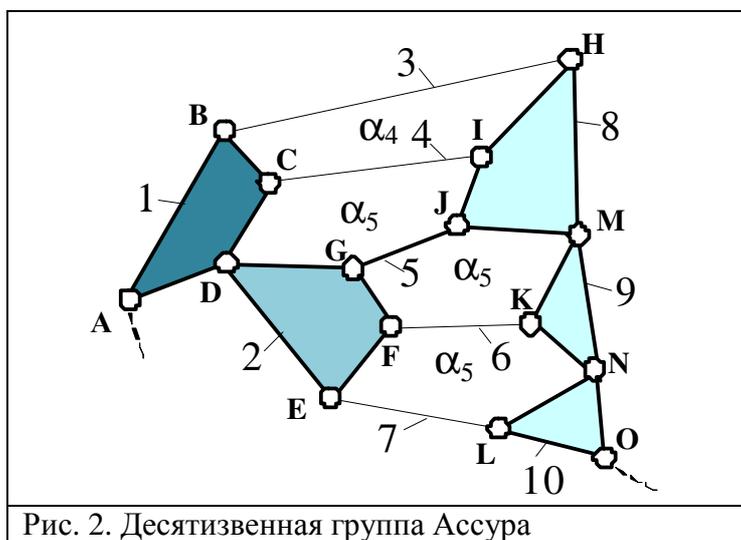


Рис. 2. Десятизвенная группа Ассура

Для создания неподвижной механической системы используем метод связки кинематических пар группы в узлы фермы. На рис. 3 стрелками показано совмещение шарниров таким образом, чтобы каждое звено цепи стало линейным стержнем конструкции. Очевидно, что треугольные звенья 9 и 10 требуют одну связку, а четырёхугольные звенья 1, 2 и 8 – два варианта связки. В процессе построения имеем, что четырёхугольные звенья организованы в стержни следующим образом: звено 1 представлено стержнем CBA – D, звено 2 – стержнем ED – FG и звено 8 – стержнем IJ – HM. Переход звена 9 образует стержень M – KN, а замыкающее звено 10, имеющее связку LN, представляет собой подвижную опору при соединении шарнира O со стойкой. Линейные звенья 2, 4, 5, 6 и 7 остаются в первоначальном исполнении. Полученная конструктивная схема представляет собой известную сложную ферму Шухова.

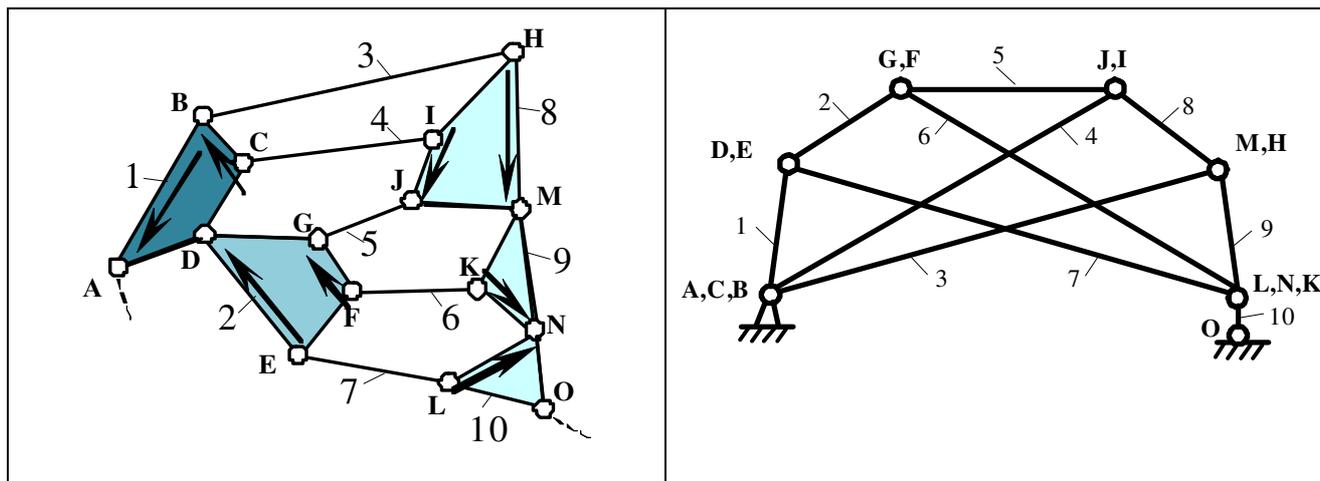


Рис. 3. Организация сложной фермы В. Г. Шухова

Теперь покажем построение других вариаций схем ферменных конструкций, используя ту же десятизвенную группу, применяя процедуры развязки и перевязки узлов. После развязки узлов, т.е. осуществления возврата к десятизвенной группе, на рис. 4,а перевязка применена к двум звеньям. В этом случае получается, что звено 1 преобразуется в стержень ВА – CD, а звено 9 – в стержень KM – N. Построенная схема имеет иную комбинацию шарнирного соединения стержней, составляющих ферменную конструкцию.

Демонстрация применения другой вариации связки, как и последующая организация строительной фермы, проиллюстрирована на рис. 4,б.

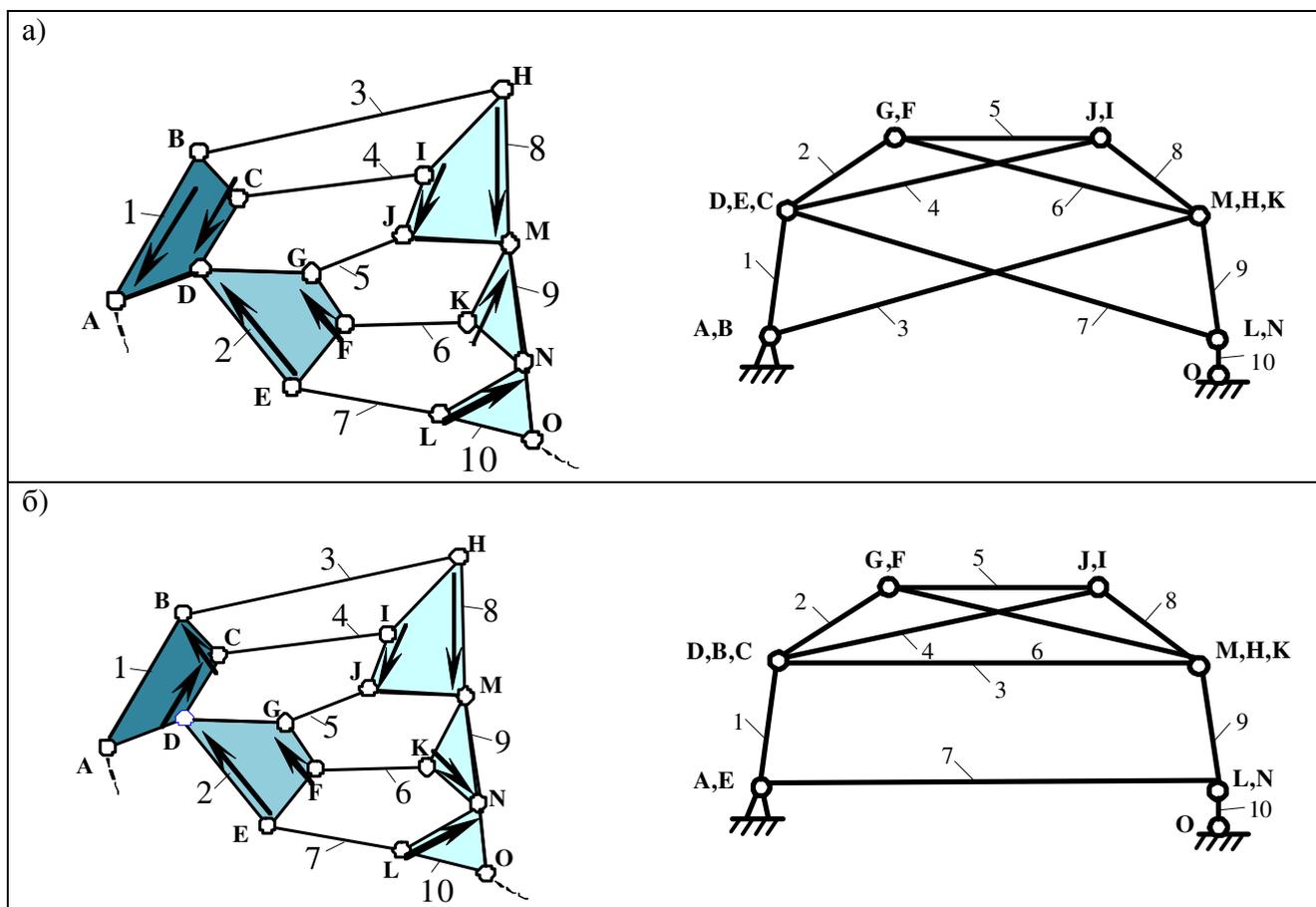


Рис. 4. Схемы девятистержневых ферм разных вариантов связки

На рис. 5 приведены некоторые примеры новых конструктивных схем девятистержневых ферм строительного назначения и симметричного исполнения, полученные авторами в результате структурного исследования неподвижных механических систем.

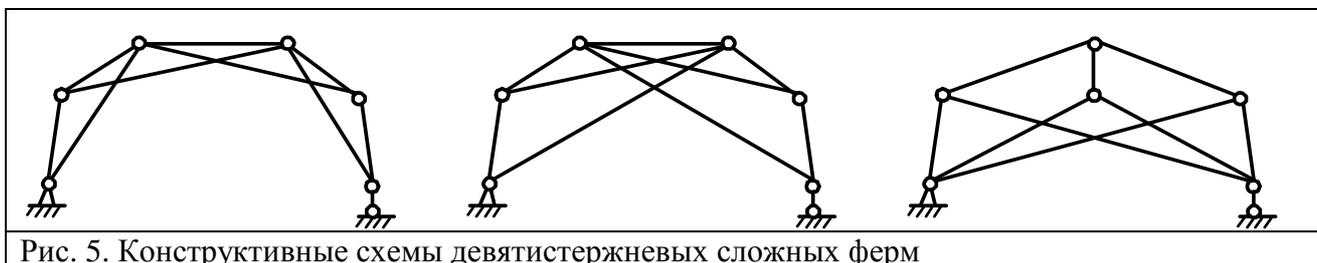


Рис. 5. Конструктивные схемы девятистержневых сложных ферм

Таким образом, задача структурного синтеза неподвижных механических систем вполне разрешима и может быть применена к более сложным конструктивным схемам. Следует отметить, что применение программного обеспечения существенно облегчит работу по нахождению всего многообразия отличающихся друг от друга структур и, параллельно проводя отбраковку идентичных и зеркально построенных схем, позволит создать полный каталог сложных двухопорных ферм. Результаты исследований имеют практическую значимость в строительстве при создании жёстких стержневых сооружений.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Дарков А. В., Шапошников Н. Н. Строительная механика. / М. Изд-во «Высшая школа» 1986.- 602с.
2. Дворников Л. Т. Начало структуры механизмов. / Учебное пособие. Новокузнецк,1994.- 102с.
3. Дворников Л. Т, Климова И. С (Баклушина И. С), патент РФ №2148133. Способ создания конструктивных схем строительных ферм. Оpubл. 27.04.2000г БИ№12.
4. Дворников Л. Т Об использовании методов создания многозвенных групп Ассура к задачам структурного синтеза ферм. / Материалы седьмой научно-практической конференций по проблемам машиностроения, металлургических и горных машин. Новокузнецк,1998.
5. Баклушина И. С. Разработка метода синтеза структур многозвенных плоских групп Ассура. / Монография. Омск, 2003 - 150с.

Fixed mechanical systems in the synthesis of bar structures for building purposes

Baklushina I. S., Zenkov I. D., Timofeev D. S.

Siberian State Industrial University, 654080, Novokuznetsk, st. Kirova 42

This article is devoted to the issue of structural synthesis of fixed mechanical systems. The absence in structural mechanics of an algorithmic solution to the problems of creating bar flat trusses of a complex type determines the relevance of the problem. The established organic connection between

kinematic chains with a zero degree of mobility and truss structures suggests the application of the methods of machine theory to solving the problems of synthesis of rigid rod systems. The stages of building complex two-support structures using the method of creating structural diagrams of building trusses are considered. Examples of the organization of complex nine-rod trusses of symmetrical execution are shown when carrying out procedures for tying, decoupling and ligation of truss nodes and single-moving kinematic pairs of the Assur group. The article presents some variants of new structural diagrams obtained by the authors as a result of scientific work, confirming the novelty of the research. Structural diagrams of trusses are of practical interest to civil engineers.

Key words: Assur group, single-movable kinematic pairs, structural synthesis, complex rod truss, immobile mechanical systems.