

НАУКОВЕДЕНИЕ, МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

doi: 10.51639/2713-0576_2024_4_3_21

УДК 62-21

ГРНТИ 30.01.45

ВАК 1.2.1

**Различные инструменты расчета конструкции плоской,
статически определимой, геометрически неизменяемой фермы**

*Паршков Н.А., Федосеенко Н.И., Картыгин А.В.

*Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета
им. В.Г. Шухова (НФ БГТУ им. В.Г. Шухова), 353919, Россия,
г. Новороссийск, Мысхакское шоссе, дом 75*

e-mail: *parskovnikolaj83@gmail.com,
fedoseenko_natal@mail.ru, aleksandr-kartygin@yandex.ru

Аннотация

Проектирование машин в современном мире является сложным и многогранным процессом, включающим в себя создание новых механизмов, устройств и систем. Использование специализированных компьютерных программ повышает эффективность и точность проектирования, сделав его неотъемлемой частью современной инженерной деятельности. Изучение проектирования машин в специализированных компьютерных программах позволяет получить практические навыки работы с современными инженерными инструментами, повысить конкурентоспособность на рынке труда, развить креативное и аналитическое мышление, а также применить полученные знания в различных сферах инженерной деятельности.

Ключевые слова: проектирование машин, специализированные компьютерные программы, инженерная деятельность.

Введение

Проектирование машин в современном мире является сложным и многогранным процессом, включающим в себя создание новых механизмов, устройств и систем. Использование специализированных компьютерных программ повысило эффективность и точность проектирования, сделав его неотъемлемой частью современной инженерной деятельности. Применение специализированных программ позволяет создавать точные трехмерные модели проектируемых объектов, проводить виртуальные испытания и анализировать полученные результаты. Такой подход значительно сокращает время и затраты на создание прототипов, а также повышает точность и качество проектирования. Визуализация проектируемых объектов в трехмерном виде значительно упрощает коммуникацию между инженерами,

дизайнерами и заказчиками, позволяя более эффективно обсуждать и согласовывать проект. Основные типы программного обеспечения для проектирования машин:

- САПР (CAD, Computer-AidedDesign), программы для создания и редактирования трехмерных моделей;
- CAE (CAE, Computer-AidedEngineering), программы для проведения виртуальных испытаний и анализа прочности, динамики, теплообмена и других характеристик проектируемых объектов;
- CAM (CAM, Computer-AidedManufacturing), программы для планирования и управления производственным процессом;
- PLM (ProductLifecycleManagement), системы управления жизненным циклом продукта, обеспечивающие интеграцию всех этапов проектирования, производства, эксплуатации и утилизации продукции.

Изучение проектирования машин в специализированных компьютерных программах позволяет получить практические навыки работы с современными инженерными инструментами, повысить конкурентоспособность на рынке труда, развить креативное и аналитическое мышление, а также применить полученные знания в различных сферах инженерной деятельности.

При изучении дисциплины «Проектирование машин в среде специализированных компьютерных программ» необходимо освоение профессиональной компетенции ПК1.3 «Определяет и использует методики расчетов узлов наземных транспортно – технологических средств и их компонентов в среде специального программного обеспечения». Нами был разработан проект «Различные инструменты расчета конструкции плоской статически определимой геометрически неизменяемой фермы», в рамках которого был проведен расчет в различных онлайн калькуляторах предложенной фермы, а также опробован метод «вырезания узлов» из изученной ранее дисциплины «Теоретическая механика».

Сайт sopromatguru.ru

Данный онлайн калькулятор позволяет пользователю рассчитать рамные конструкции, методом конечных элементов. Он предлагает интуитивно понятный интерфейс, позволяющий пользователю создавать модели рам, задавать нагрузки и свойства материалов, а затем получать результаты расчета, включая усилия в элементах, деформации и напряжения.

Сайт представляет результаты расчета в виде таблиц и графиков, позволяя анализировать усилия в элементах рамы, определять напряжения и деформации в критических точках конструкции [1].

Недостатками сайта sopromatguru.ru является платный доступ к функционалу сайта, ограниченные возможности по моделированию сложных рамных конструкций (например, с нестандартной геометрией или многосвязными системами) и отсутствие возможности экспорта результатов расчета в стандартные форматы (например, DXF, STL). Также сайт не предоставляет возможности по моделированию нелинейных эффектов (например, учета пластических деформаций).

Несмотря на некоторые ограничения, сайт sopromatguru.ru является полезным инструментом для студентов, инженеров и других специалистов, занимающихся расчетом рамных

конструкций. Он может быть использован для быстрого получения предварительной оценки усилий в элементах рамы и определения критических зон конструкции.

Практическая часть.

Результаты расчета фермы с помощью инструментов сайта sopromatguru.ru представлены на рис. 1 – рис. 6 и в табл. 1, табл. 2.

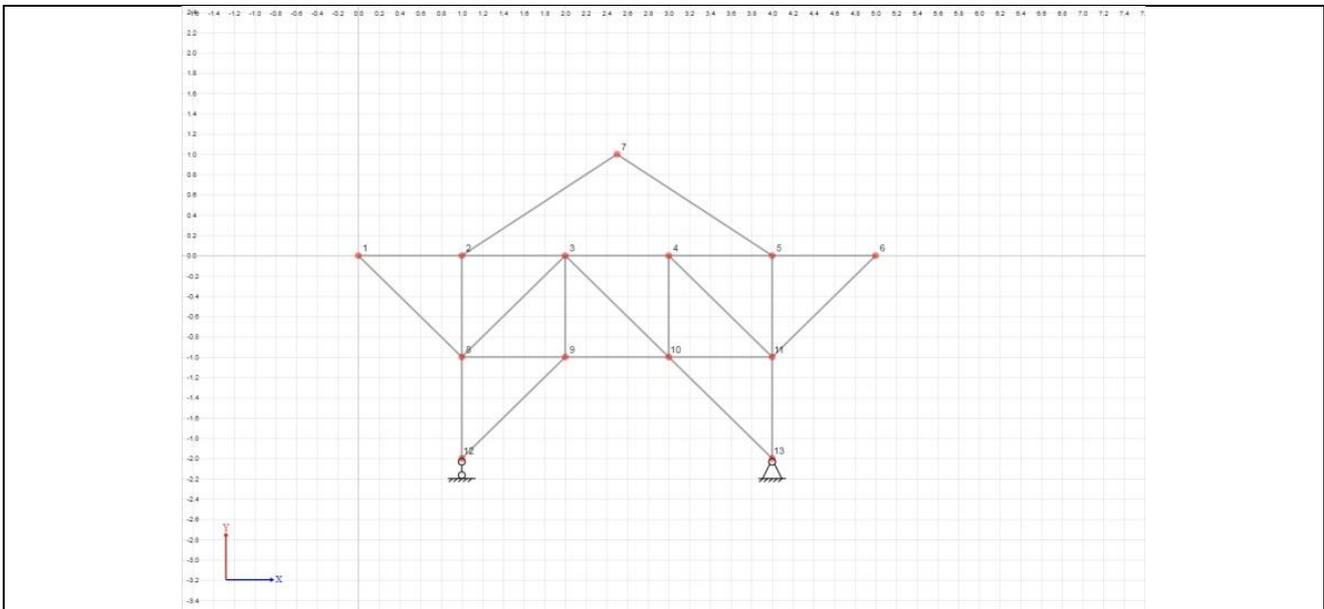


Рис. 1. Рассчитываемая ферма

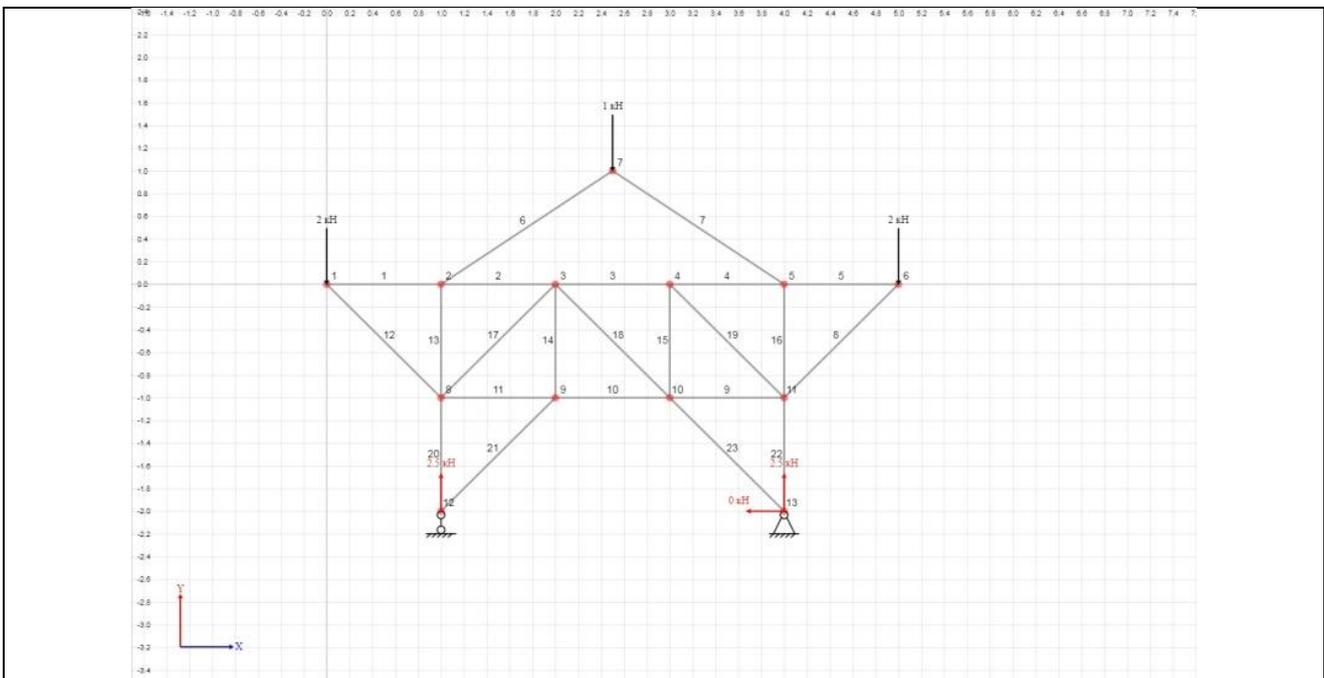


Рис.2. Опорные реакции

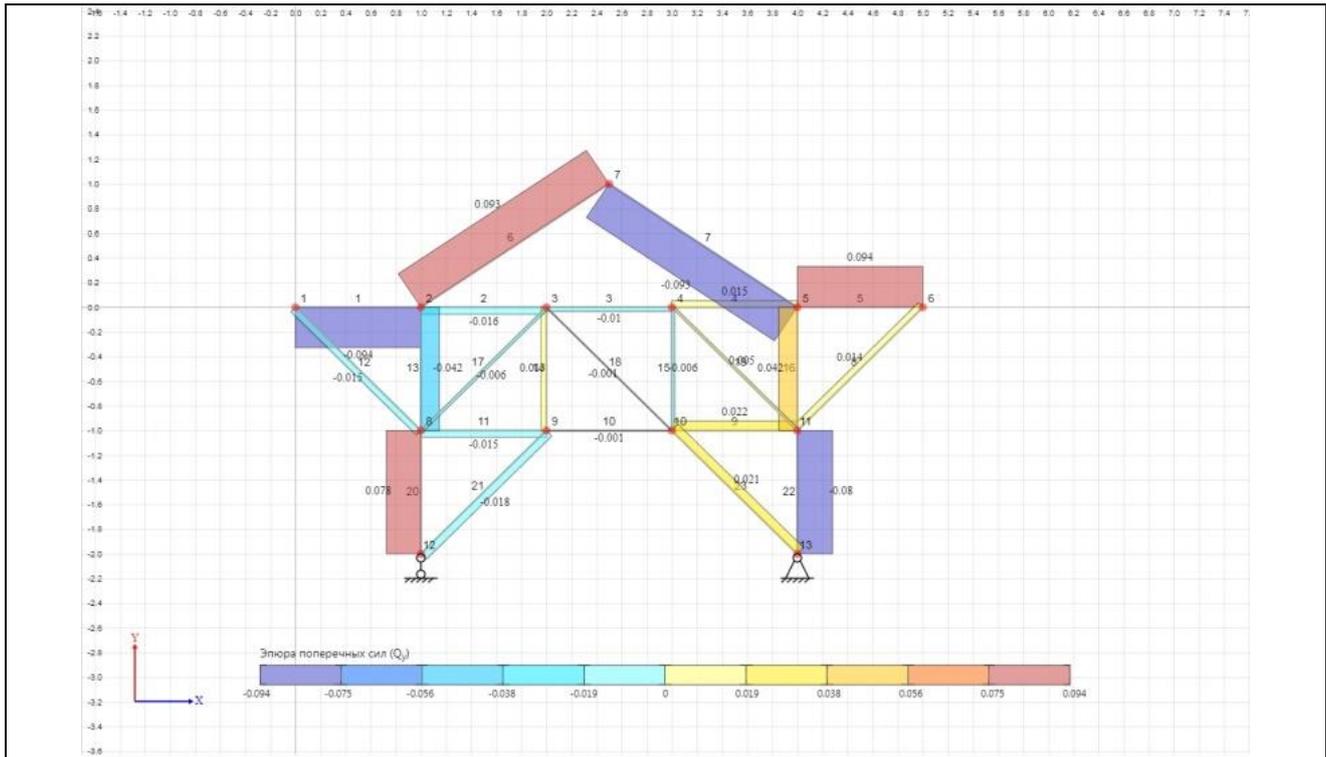


Рис. 3. Эпюра поперечных сил

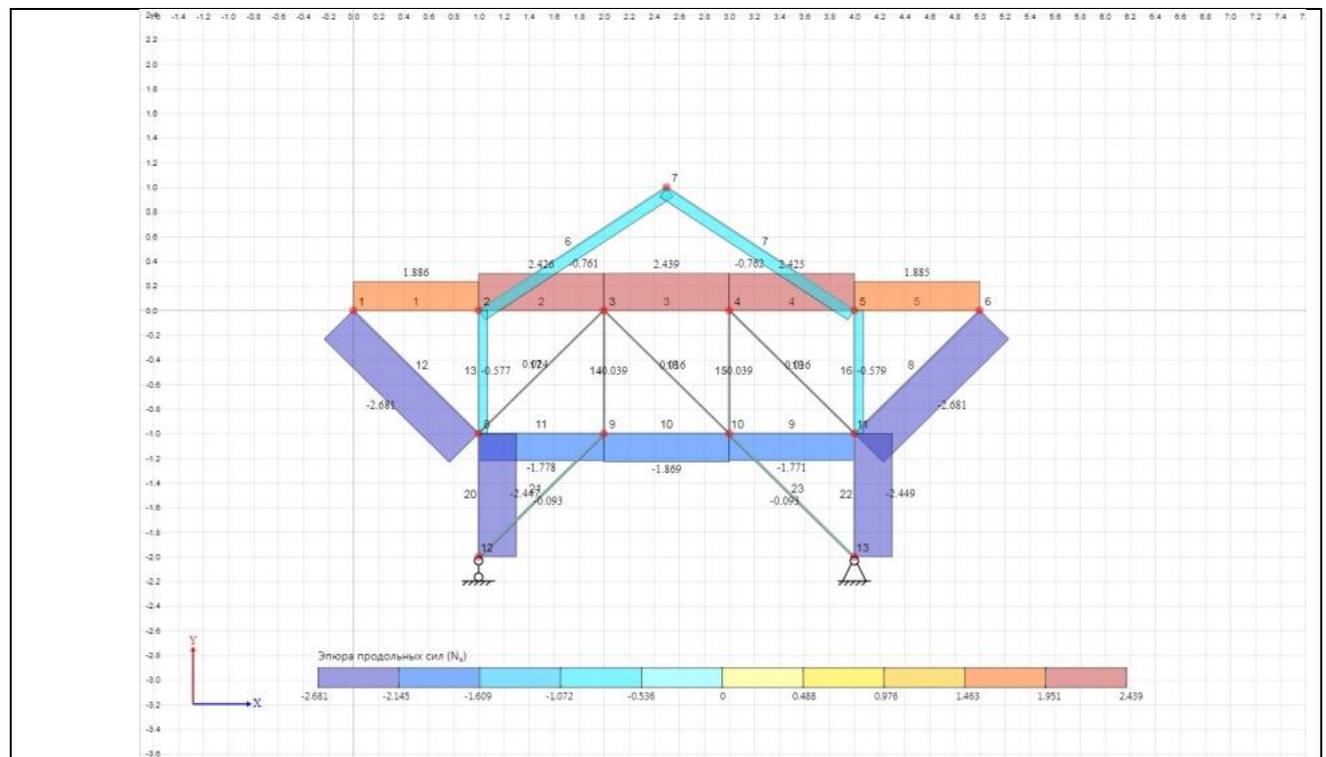


Рис. 4. Эпюра продольных сил

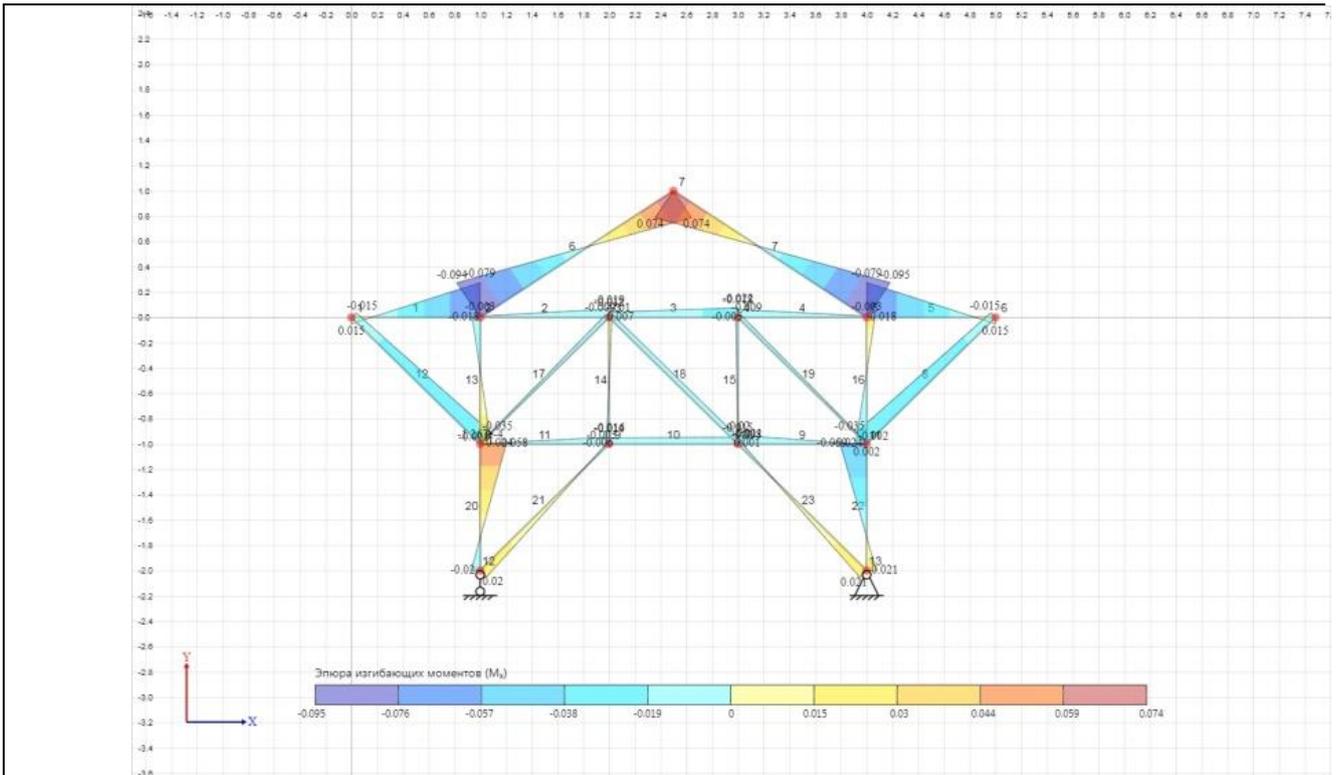


Рис. 5. Эпюра изгибающих моментов

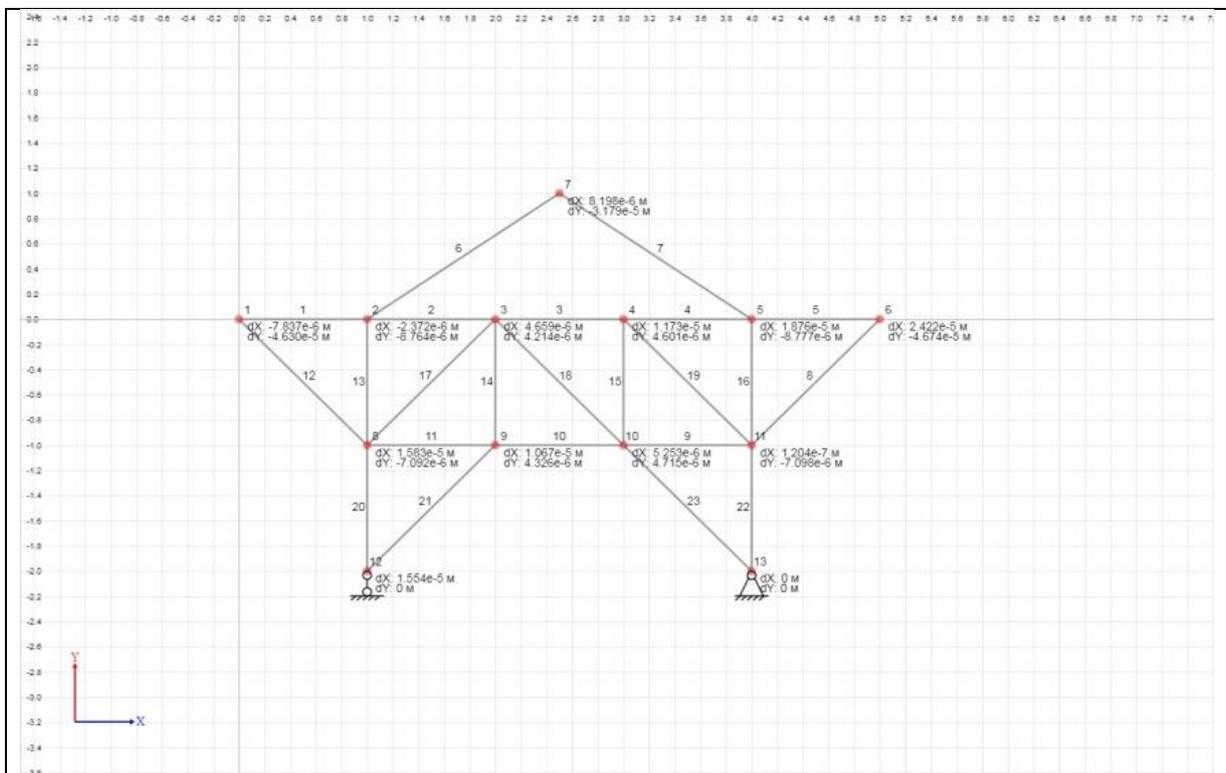


Рис. 6. Деформированная схема

Таблица № 1

Значения опорных реакций

№ узла	Тип опорного закрепления	Значения
12	Шарнир подвижной опоры	$R_{12} = 2.5$ (кН), $H_{12} = 0$ (кН), $M_{12} = 0$ (кН·м)
13	Шарнир неподвижной опоры	$R_{13} = 2.5$ (кН), $H_{13} = 0$ (кН), $M_{13} = 0$ (кН·м)

где, R – вертикальная составляющая опорной реакции, Н;
 Н – горизонтальная составляющая опорной реакции, Н;
 М – изгибающий момент, Нм.

Таблица № 2

Значения внутренних усилий в стержнях

№ стержня	Q, начало (кН)	Q, конец (кН)	Q, max (кН)	N, начало (кН)	N, конец (кН)	N, max (кН)	M, начало (кН*м)	M, конец (кН*м)	M, max (кН*м)
1	-0.094	-0.094	0.094	1.886	1.886	1.886	0.015	-0.079	0.079
2	-0.016	-0.016	0.016	2.426	2.426	2.426	-0.003	-0.019	0.019
3	-0.01	-0.01	0.01	2.439	2.439	2.439	-0.012	-0.022	0.022
4	0.015	0.015	0.015	2.425	2.425	2.425	-0.018	-0.003	0.018
5	0.094	0.094	0.094	1.885	1.885	1.885	-0.079	0.015	0.079
6	0.093	0.093	0.093	-0.761	-0.761	0.761	-0.094	0.074	0.094
7	-0.093	-0.093	0.093	-0.762	-0.762	0.762	0.074	-0.095	0.095
8	0.014	0.014	0.014	-2.681	-2.681	2.681	-0.035	-0.015	0.035
9	0.022	0.022	0.022	-1.771	-1.771	1.771	-0.02	0.002	0.02
10	-0.001	-0.001	0.001	-1.869	-1.869	1.869	-0.014	-0.015	0.015
11	-0.015	-0.015	0.015	-1.778	-1.778	1.778	-1.267E-004	-0.016	0.016
12	-0.015	-0.015	0.015	-2.681	-2.681	2.681	-0.015	-0.035	0.035
13	-0.042	-0.042	0.042	-0.577	-0.577	0.577	0.024	-0.018	0.024
14	0.013	0.013	0.013	-0.039	-0.039	0.039	-0.006	0.007	0.007
15	-0.006	-0.006	0.006	-0.039	-0.039	0.039	0.001	-0.005	0.005
16	0.042	0.042	0.042	-0.579	-0.579	0.579	-0.024	0.018	0.024
17	-0.006	-0.006	0.006	0.024	0.024	0.024	-0.001	-0.009	0.009
18	-0.001	-0.001	0.001	0.016	0.016	0.016	-0.01	-0.011	0.011
19	0.005	0.005	0.005	0.016	0.016	0.016	-0.009	-0.002	0.009
20	0.078	0.078	0.078	-2.447	-2.447	2.447	-0.02	0.058	0.058
21	-0.018	-0.018	0.018	-0.093	-0.093	0.093	0.02	-0.005	0.02
22	-0.08	-0.08	0.08	-2.449	-2.449	2.449	0.021	-0.059	0.059
23	0.021	0.021	0.021	-0.093	-0.093	0.093	-0.008	0.021	0.021

Лира САПР.

ЛИРА САПР: комплексная система автоматизированного проектирования в строительной и машиностроительной сфере.

ЛИРА САПР — это одна из составляющих программ программного комплекса для расчета конструкций, предназначенная для моделирования, расчета, анализа и визуализации различных инженерных объектов, преимущественно в строительной сфере [2,3].

Основные возможности ЛИРА САПР:

Моделирование: Позволяет создавать трехмерные модели зданий, сооружений, мостов, машин и механизмов с учетом их геометрии, материалов и конструктивных особенностей.

Расчет: Проводит расчет прочности, устойчивости, деформации и динамических характеристик конструкций по методу конечных элементов.

Анализ: Позволяет анализировать результаты расчета, определять критические зоны конструкции и оценивать безопасность и эффективность проекта.

Визуализация: Предоставляет различные способы визуализации результатов расчета, включая изображения с напряжениями, деформациями и смещениями, а также графики, диаграммы и анимации.

Документирование: Позволяет создавать техническую документацию, чертежи и отчеты по результатам проектирования.

Преимущества ЛИРА САПР:

Комплексный подход: Объединяет в себе все необходимые инструменты для проектирования, от моделирования до документирования.

Мощный функционал: Программа обладает широким функционалом для решения сложных задач проектирования.

Гибкость и настройка: Позволяет настраивать параметры расчета, анализа и визуализации в соответствии с требованиями проекта.

Поддержка российских стандартов: Программа поддерживает российские стандарты и нормативные документы.

Интеграция с другими программами: Программа может интегрироваться с другими программами для проектирования и расчета конструкций.

Недостатки ЛИРА САПР:

Сложный интерфейс: Программа имеет сложный интерфейс, который может быть неудобен для новичков.

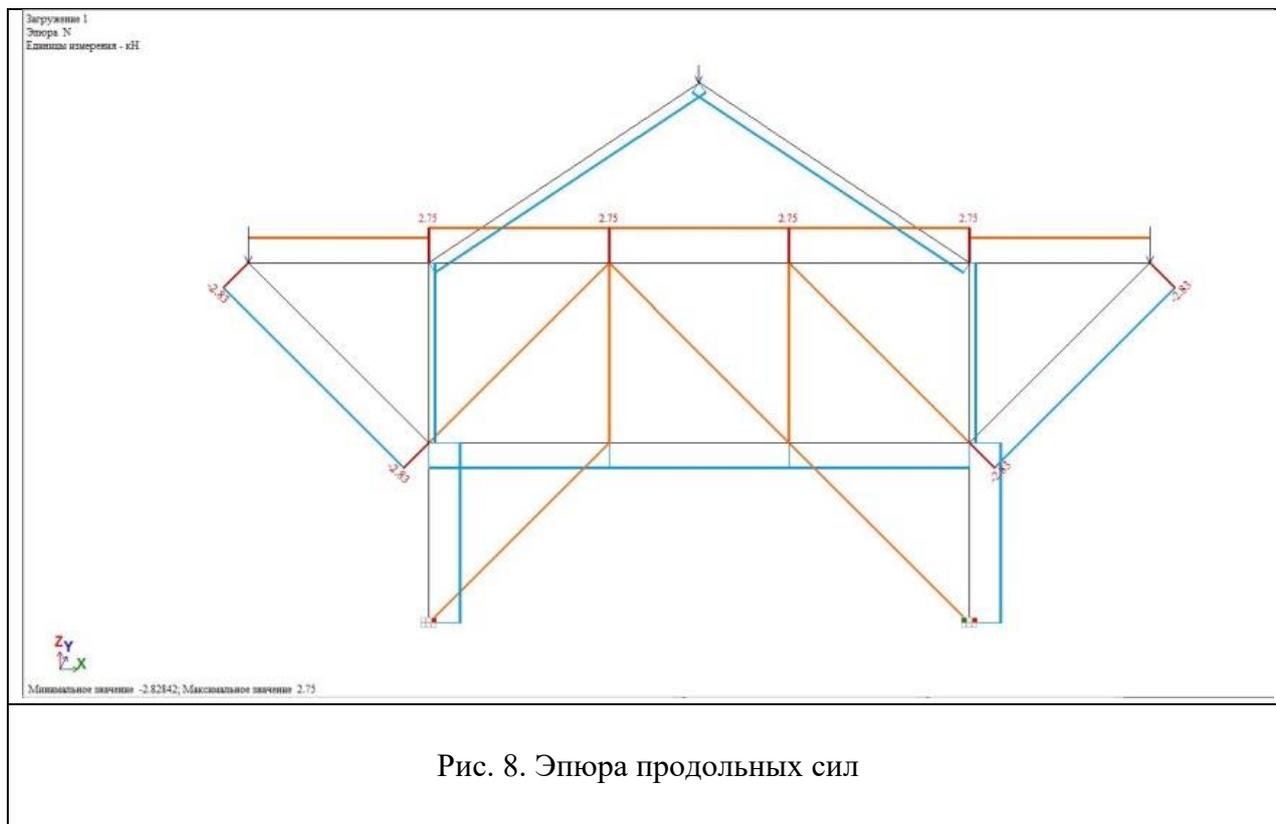
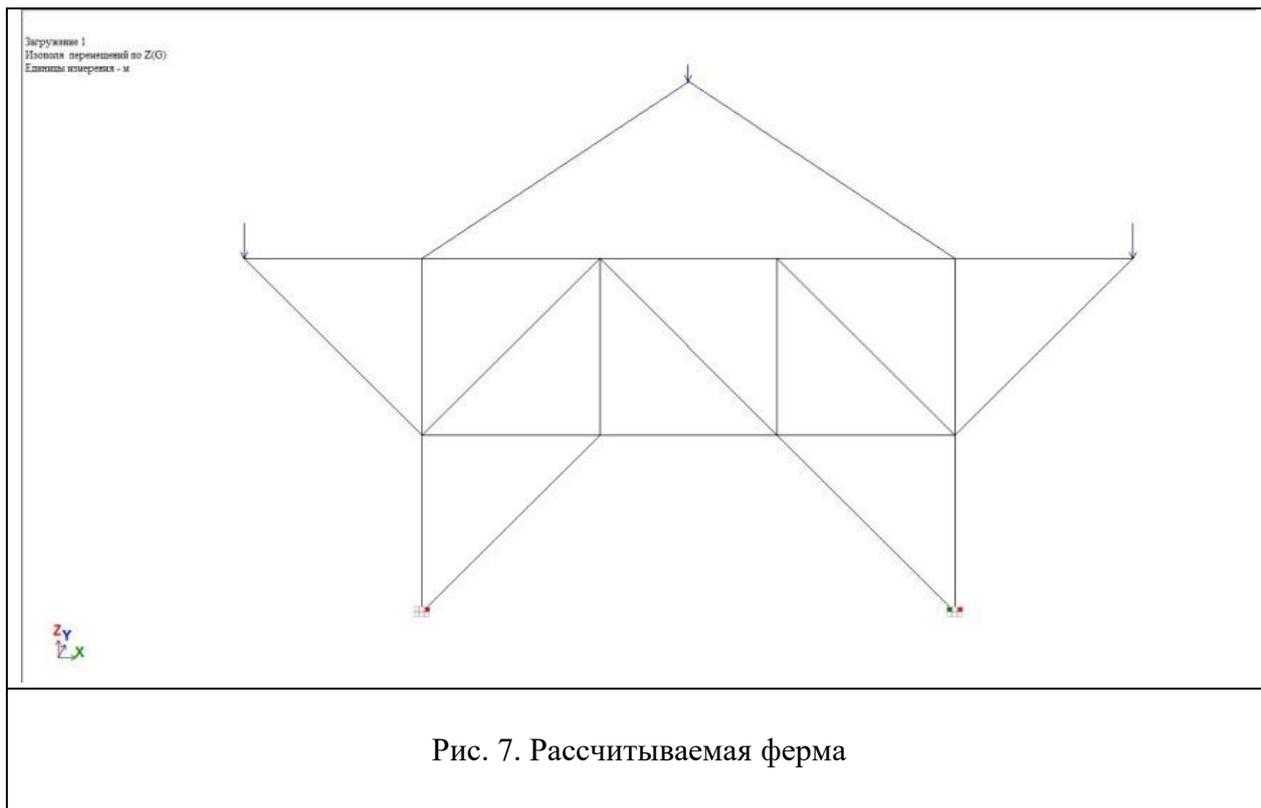
Высокие требования к компьютеру: Программа требует достаточно мощный компьютер для эффективной работы.

Ограниченное количество обучающих материалов: существует относительно мало обучающих материалов по работе с программой.

Высокая стоимость: Программа платная, причём стоимость лицензии может быть достаточно высокой.

Практическая часть.

Результаты расчета фермы с помощью программы ЛИРА САПР представлены на рис. 7 – рис. 9 и в табл. 3.



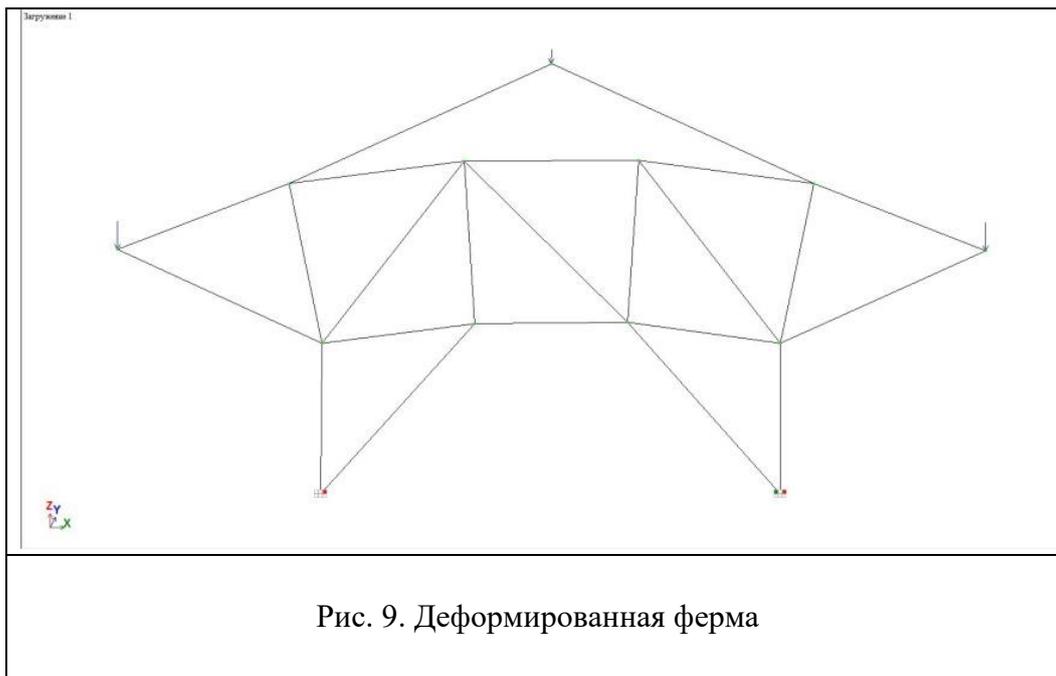


Рис. 9. Деформированная ферма

Таблица № 3

Значения внутренних усилий в стержнях

ЭЛЕМ	СЕЧ	N, кН	ЭЛЕМ	СЕЧ	N, кН
1	1	1.999998	12	2	0.0
1	2	1.999998	13	1	0.0
2	1	2.750000	13	2	0.0
2	2	2.750000	14	1	-.500002
3	1	2.750000	14	2	-.500002
3	2	2.750000	15	1	0.0
4	1	2.750000	15	2	0.0
4	2	2.750000	16	1	0.0
5	1	1.999998	16	2	0.0
5	2	1.999998	17	1	0.0
6	1	-2.828424	17	2	0.0
6	2	-2.828424	18	1	-2.500000
7	1	-1.999998	18	2	-2.500000
7	2	-1.999998	19	1	0.0
8	1	-1.999998	19	2	0.0
8	2	-1.999998	20	1	-2.500000
9	1	-1.999998	20	2	-2.500000
9	2	-1.999998	21	1	0.0
10	1	-2.828424	21	2	0.0
10	2	-2.828424	22	1	-.901391
11	1	-.500002	22	2	-.901391
11	2	-.500002	23	1	-.901391
12	1	0.0	23	2	-.901391

Приложение SWFEA 2DFrame.

SW FEA 2D Frame: инструмент для анализа конечных элементов двумерных рамных конструкций в SolidWorks.

SW FEA 2D Frame — это приложение, интегрированное с SolidWorks, предназначенное для проведения анализа конечных элементов (FEA) двумерных рамных конструкций. Оно предоставляет удобный инструмент для моделирования и анализа поведения рам, таких как балки, колонны, фермы и других конструкций, работающих в плоскости [4].

Основные возможности приложения:

Создание рамных моделей: Приложение позволяет создавать модели рам из различных материалов, используя библиотеку стандартных профилей (балки, колонны).

Придание нагрузок и граничных условий: При помощи SW FEA 2D Frame можно применять различные типы нагрузок, такие как концентрации напряжения, распределенные нагрузки, моменты, а также задавать граничные условия (закрепления, опоры).

Анализ методом конечных элементов: Приложение проводит анализ FEA, рассчитывая напряжения, деформации, смещения и другие характеристики рамной конструкции.

Визуализация результатов: SW FEA 2D Frame предлагает различные способы визуализации результатов анализа, что позволяет легко оценить поведение конструкции.

Оптимизация конструкции: Приложение позволяет проводить оптимизацию конструкции с учетом нагрузок и граничных условий.

Преимущества SW FEA 2D Frame:

Интеграция с SolidWorks: Это основное преимущество приложения. SW FEA 2D Frame тесно интегрирован с SolidWorks, что позволяет легко импортировать геометрию и материалы из модели SolidWorks.

Простота использования: Приложение обладает интуитивно понятным интерфейсом, что делает его доступным для инженеров с различным уровнем опыта в FEA.

Быстрый анализ: Приложение оптимизировано для быстрого анализа рамных конструкций.

Доступные результаты: SW FEA 2D Frame предоставляет четкие и понятные результаты анализа, что позволяет легко оценить поведение конструкции.

Недостатки SW FEA 2D Frame:

Ограничения для сложных конфигураций: Приложение предназначено прежде всего для анализа простых рамных конструкций. В случае сложных конфигураций, может потребоваться использование более мощных FEA программ.

Ограниченный функционал: Приложение имеет ограниченный функционал по сравнению с более профессиональными FEA программами.

Недостаточная точность для определенных задач: В случае требований к высокой точности, может потребоваться использование более мощных FEA программ.

SW FEA 2D Frame — это удобный и доступный инструмент для проведения анализа FEA рамных конструкций в SolidWorks. Он оптимально подходит для моделирования и анализа простых рамных конструкций, и является хорошим введением в FEA для инженеров, не имеющих опыта в этой области. Однако, для более сложных задач может потребоваться использование более мощных FEA программ.

Практическая часть.

Результаты расчета фермы с помощью данного приложения представлены на рис. 10 – рис. 12.

Метод вырезания узлов.

Метод вырезания узлов — это эффективный инструмент в теоретической механике, который позволяет упростить анализ сложных механизмов путем разбиения их на отдельные звенья, свободные от внешних связей. Суть метода заключается в устранении узла (точки соединения звеньев), заменяя его силами, которые действовали на узел со стороны устраненных звеньев. Полученные силы называются силами реакции узла.

При использовании метода вырезания узлов необходимо учесть следующие факторы:

Тип узла (шарнирный, кулачковый, винтовой и т.д.) и его свойства.

Количество звеньев, сходящихся в узле.

Направления и величины сил, действующих на узел.

Метод вырезания узлов позволяет упростить систему уравнений, описывающую движение механизма, и получить более простые уравнения для определения сил в звеньях и движения механизма. Однако необходимо учитывать, что при вырезании узла из системы уравнений исчезают уравнения связей, которые описывали движение узла. Поэтому при вырезании узла необходимо ввести в систему новые уравнения, которые учитывают свойства и связи устраненного узла.

Метод вырезания узлов широко применяется при анализе движения планетарных механизмов, механизмов с кулачками, винтовых механизмов и других сложных систем.

Преимущества метода вырезания узлов:

- упрощение анализа сложных механизмов;
- получение более простых уравнений движения;
- возможность изучения движения отдельных звеньев;
- повышение точности расчетов при учете свойств узлов.

Недостатки метода вырезания узлов:

- необходимость введения новых уравнений, учитывающих свойства устраненного узла;
- сложность расчета сил реакции узла в некоторых случаях;
- увеличение количества уравнений в системе при вырезании нескольких узлов.

Практическая часть:

Для произведения корректных расчётов необходимо убедиться, что представленная к расчету конструкция фермы: статически определима. Статически определимой называется система, внутренние усилия которой можно определить только из уравнений статики (равновесия). Расчет любой статически определимой системы приводит к решению системы n линейных уравнений с n неизвестными. Если определитель полученной системы уравнений отличен от нуля, внутренние усилия будут конечными величинами. Если же определитель равняется нулю, то внутренние усилия определить нельзя. В этом случае система является мгновенно изменяемой [5]. Для любого узла можно составить два уравнения - равенства нулю суммы проекций всех сил, например, на вертикальную и горизонтальную оси $\Sigma F_x=0$ и $\Sigma F_y=0$. Очевидно, если в узле сходятся два стержня, то из этих уравнений могут быть найдены усилия в обоих из них. Если узел соединяет три стержня, но усилие в одном из них уже найдено из рассмотрения равновесия другого узла или использованием способа сечений, то из этих двух уравнений могут быть найдены усилия в двух оставшихся стержнях [6]. После этого можно вырезать следующий узел и продолжить расчет.

Результаты расчета фермы с помощью метода вырезания узлов представлены на рис. 13 – рис. 18.

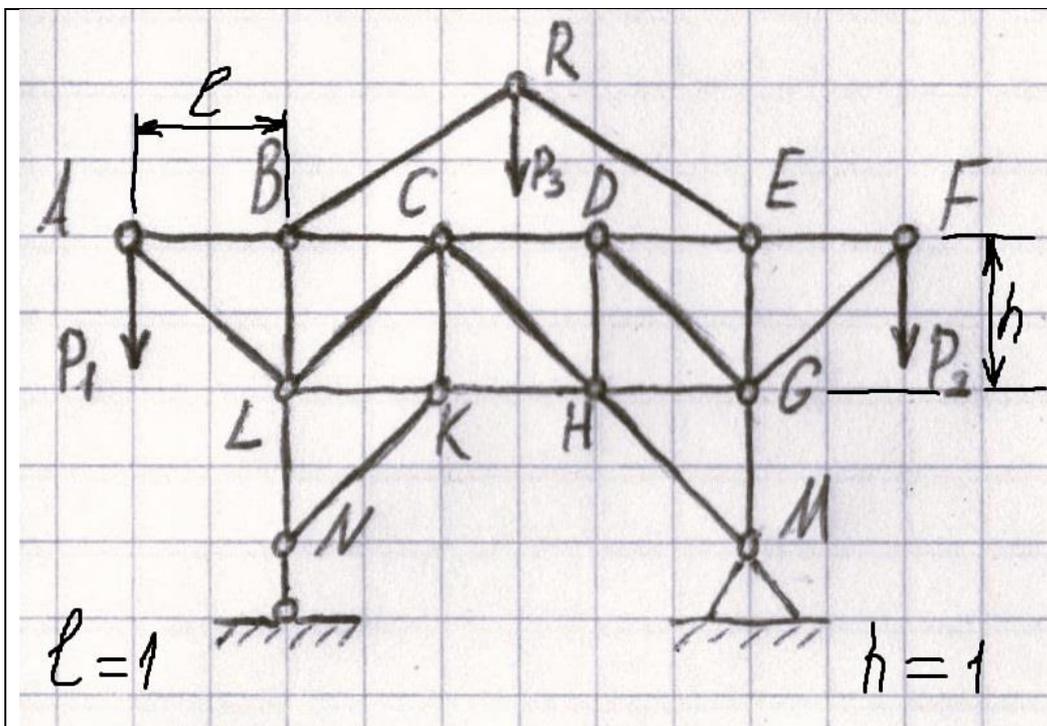


Рис. 13. Рассчитываемая ферма

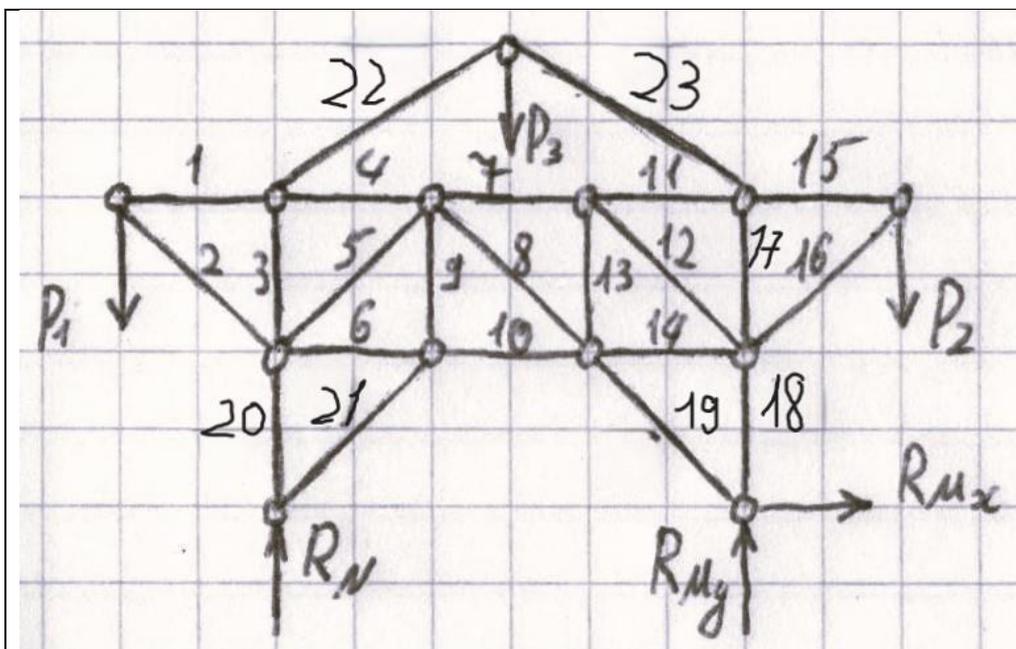
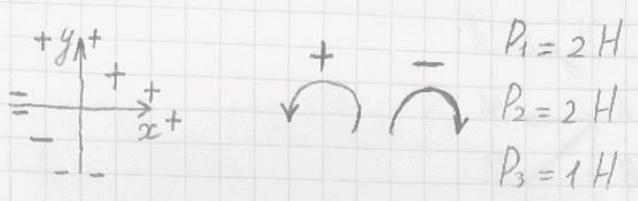


Рис. 14. Расчётная схема фермы

$$\begin{cases} \sum X = 0, \\ \sum Y = 0, \\ \sum M_i = 0, \end{cases}$$


$$\begin{aligned} \sum X &= 0 \\ P_1 \cdot \cos 90^\circ + P_3 \cdot \cos 90^\circ + P_2 \cdot \cos 90^\circ + R_{Mx} \cdot \cos 0^\circ + R_{My} \cdot \cos 90^\circ + R_N \cdot \cos 90^\circ &= 0 \\ R_{Mx} &= 0 \\ \sum Y &= 0 \\ -P_1 \cdot \cos 0^\circ - P_3 \cdot \cos 0^\circ - P_2 \cdot \cos 0^\circ + R_{Mx} \cdot \cos 90^\circ + R_{My} \cdot \cos 0^\circ + R_N \cdot \cos 0^\circ &= 0 \\ R_N &= 5 - R_{My} \\ \sum M_N &= 0 \\ R_N \cdot 0 + R_{Mx} \cdot 0 + R_{My} \cdot 3 - P_2 \cdot 4 - P_3 \cdot 1,5 + P_1 \cdot 1 &= 0 \\ 3R_{My} &= 4P_2 + 1,5P_3 - P_1 \\ 3R_{My} &= 8 + 1,5 - 2 \\ 3R_{My} &= 7,5 \\ R_{My} &= 2,5 \text{ H} \\ R_N &= 5 - 2,5 \\ R_N &= 2,5 \text{ H} \end{aligned}$$

Рис. 15. Расчёт опорных реакций

$$\begin{aligned} R_N &= 2,5 \text{ H} \\ R_{My} &= 2,5 \text{ H} \\ R_{Mx} &= 0 \end{aligned}$$

Рис. 16. Величина опорных реакций

Узел А:



$$\sum X = 0$$

$$P_1 \cdot \cos 90 + N_2 \cdot \cos 45 + N_1 = 0$$

$$N_1 = -0,71 N_2$$

$$\sum Y = 0$$

$$-P_1 - N_2 \cdot \cos 45 + N_1 \cdot \cos 90 = 0$$

$$0,71 N_2 = -P_1$$

$$N_2 = -2/0,71$$

$$N_2 = -2,82 \text{ H}$$

$$N_1 = 2 \text{ H}$$

Рис. 17. Расчёт узла А

N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	N_{12}
+	-	+	+	-	-	+	+		-	+	-
2	2,82	1	2,58	2,11	0,5	0,58	2,11	0	0,5	2,58	2,11
N_{13}	N_{14}	N_{15}	N_{16}	N_{17}	N_{18}	N_{19}	N_{20}	N_{21}	N_{22}	N_{23}	
+	-	+	-	+	-		-		-	-	
2	0,5	2	2,82	1	2,5	0	2,5	0	1,15	1,15	

Рис. 18. Значения внутренних усилий в стержнях

Заключение

Изучение проектирования машин в специализированных компьютерных программах позволяет получить практические навыки работы с современными инженерными инструментами, повысить конкурентоспособность на рынке труда, развить креативное и аналитическое мышление, а также применить полученные знания в различных сферах инженерной деятельности.

Мы рассмотрели несколько важных аспектов инженерной деятельности и современных инструментов, которые используются в этой области. Мы познакомились с методом вырезания узлов в теоретической механике, узнали о его преимуществах и недостатках. Также мы проанализировали сайт sopromatguru.ru, как инструмент для расчета ферменных конструкций, оценив его возможности и ограничения. И, наконец, мы рассмотрели ЛИРА САПР, как комплексный программный пакет для проектирования в строительной и машиностроительной сферах, уделив внимание его функционалу, преимуществам и недостаткам.

Важно отметить, что все рассмотренные инструменты имеют как плюсы, так и минусы. Выбор конкретного инструмента зависит от конкретных задач и требований проекта. Например, метод вырезания узлов может быть эффективен для анализа простых механизмов, но для более сложных систем могут потребоваться другие подходы.

Сайт sopromatguru.ru хорош для быстрого расчета простых рамных конструкций, но для более сложных задач может потребоваться более мощное программное обеспечение.

ЛИРА САПР — это мощный инструмент для проектирования, но он требует значительных инвестиций и опыта в работе.

В целом, современные инженерные инструменты позволяют значительно упростить и ускорить процесс проектирования и анализа. Однако необходимо выбирать инструменты, которые оптимально подходят для конкретных задач и условий проекта.

Важно также постоянно совершенствовать свои знания и навыки, чтобы эффективно использовать современные инструменты и решать сложные инженерные задачи.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что на момент подачи статьи в редакцию, у них нет возможного конфликта интересов с третьими лицами.

Список источников

1. СОПРОМАТ ГУРУ. Расчет балки онлайн. Построение эпюр // sopromatguru.ru: [сайт] – URL: <https://sopromatguru.ru/?ysclid=lxioen6vnx578687846> // (дата обращения 16.12.2024). – Текст: электронный.
2. М.С. Барабаш, М.А. Ромашкина – Проектирование конструкций рабочей площадки в ПК ЛИРА-САПР.-М: АСВ (2019) – 148 с.
3. Бесплатные версии ЛИРА-САПР и САПФИР // liraserv.com: [сайт] – URL: <https://liraserv.com/products/lirasapr/> // (дата обращения 15.12.2024). – Текст: электронный.

4. SWFEA 2DFrameAnalysis // play.google.com: [сайт] – URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=np.com.softwel.swframe2d&pli=1> // (дата обращения 17.12.2024). – Текст: электронный.
5. Шакирзянов Р.А., Шакирзянов Ф.Р. Курс лекций по строительной механике: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – Казань: КГАСУ, 2014. – 144 с.
6. Статический расчет фермы. Метод вырезания узлов // stroitmeh.ru [сайт] – URL: <https://stroitmeh.ru/lect8.htm> // (дата обращения 17.12.2024). – Текст: электронный.

Project "Various tools for calculating the design of a flat, statically definable, geometrically immutable truss"

Parshkov N.A., Fedoseenko N.I., Kartygin A.V.

Novorossiysk branch of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (NF BSTU named after V.G. Shukhov), 353919, Russia, Novorossiysk, Myshakskoe highway, house 75

email: parskovnikolaj83@gmail.com;
fedoseenko_natal@mail.ru; aleksandr-kartygin@yandex.ru

Abstract

Designing machines in the modern world is a complex and multifaceted process, including the creation of new mechanisms, devices and systems. The use of specialized computer programs increases the efficiency and accuracy of design, making it an integral part of modern engineering activities. Studying machine design in specialized computer programs allows you to gain practical skills in working with modern engineering tools, increase competitiveness in the labor market, develop creative and analytical thinking, and apply the knowledge gained in various fields of engineering.

Keywords: machine design, specialized computer programs, engineering activities.

References

1. SOPROMAT GURU. Beam analysis online. Plotting // sopromatguru.ru: [website] – URL: <https://sopromatguru.ru/?ysclid=lxioen6vnx578687846> // (date of access 16.12.2024). – Text: electronic.
2. M.S. Barabash, M.A. Romashkina – Design of work site structures in the LIRA-CAD PC.-M: DIA(2019) – 148 p.
3. Free versions of LIRA-CAD and SAPPHIRE // liraserv.com: [website] – URL: <https://liraserv.com/products/lirasapr/> // (date of access 15.12.2024). – Text: electronic.
4. SW FEA 2D Frame Analysis // play.google.com: [website] – URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=np.com.softwel.swframe2d&pli=1> // (date of access 17.12.2024). – Text: electronic.

Молодёжный вестник ИФ БГТУ. 2024. Том 04. № 04 (16)

<https://rio-nb-bstu.science>

5. Shakirzyanov R.A., Shakirzyanov F.R. A course of lectures on structural mechanics: A textbook. 2nd ed., rev. and expanded – Kazan: KGASU, 2014. – 144 p.

6. Static truss analysis. The joint resolution method // stroitmeh.ru: [website] – URL: <https://stroitmeh.ru/lect8.htm> // (date of access 17.12.2024). – Text: electronic.