

Решение задачи оптимизации рамных конструкций с помощью программного комплекса «AUTODESK INVENTOR»

С. В. Трескин✉, Н. Н. Новиков, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ sergei.treskin@yandex.ru

Резюме

В статье рассматриваются вопросы оптимизации конструкций из стандартных профилей путем применения программных пакетов, позволяющих проектировать детали, узлы и конструкции в полном цикле. Анализируется цикл современного проектирования, частью которого является обязательная оптимизация и его основные этапы. После осуществления перечисленных этапов проектирования производится переход к опытному конструированию и натурным испытаниям полученной конструкции или детали. Имеющееся на рынке программное обеспечение в основном не позволяет реализовывать все этапы проектирования. Однако некоторые программные продукты, первоначально разработанные для создания 3D-моделей и конструкторской документации в рамках реализации первого этапа проектирования («Компас», «AutoCAD» и «Autodesk Inventor»), начали расширять функционал для осуществления стандартных задач следующих этапов проектирования, включая функции по расчетам прочности конструкции и ее оптимизации. В работе исследуется часть цикла проектирования конструкции с расчетом нагрузок и ее оптимизация в программе «Autodesk Inventor». Рассмотрено решение этого вопроса на примере конструкции барабана экспериментальной установки, изготовленного из металлического стандартного профиля, а также проанализирована методика определения оптимальной конструкции. Перед проведением исследовательской работы были установлены задачи оптимизации. Они подразумевают определение математически вычисленной оптимальной толщины и длины элементов конструкции. Описывается ход проведения исследования в пакете инженерного анализа «Autodesk Inventor». Это исследование заключается в проведении статического анализа в «Autodesk Inventor» и последующем сравнении получившегося коэффициента запаса прочности с рекомендованным. Основным результатом исследовательских работ в подобных программных комплексах является облегчение конструкции без потери необходимого уровня прочности, что положительно сказывается на технологичности и экономической эффективности конструкций и сооружений, создаваемых из стандартных профилей.

Ключевые слова

оптимизация конструкции, цикл современного проектирования, этапы проектирования, программа «Autodesk Inventor», пакет инженерного анализа, коэффициент запаса прочности, задачи оптимизации, статический анализ

Для цитирования

Трескин С. В. Решение задачи оптимизации рамных конструкций с помощью программного комплекса «AUTODESK INVENTOR» / С. В. Трескин, Н. Н. Новиков, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 10–17. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).10-17

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.04.2021, поступила после рецензирования: 10.05.2021, принята к публикации: 19.05.2021

Solving the problem of optimizing frame structures using the “AUTODESK INVENTOR” software package

S. V. Treskin✉, N. N. Novikov, E. Yu. Dul'skii, P. Yu. Ivanov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ sergei.treskin@yandex.ru

Abstract

The article deals with the optimization of structures made of standard profiles by using software packages that allow one to design parts, assemblies and structures in a full cycle. The article analyzes the cycle of modern design, a part of which includes mandatory optimization and its mandatory stages. After the implementation of the above design stages, the transition to experimental design and field tests of the resulting structure or part is carried out. The software available on the market usually doesn't make it possible to implement all design stages. However, some software products originally developed to create 3D-models and design documentation as part of the implementation of the first design stage (for example, “Compass”, “AutoCAD” and “Autodesk Inventor”), began to expand the functionality to implement standard tasks of the next design stages, in particular, including functions for calculating the strength of the structure and its optimization. This article describes a part of the design cycle of the structure with the calculation of loads and its optimization in the program “Autodesk Inventor”. The solution of this problem is considered on the basis of the design of the drum of the experimental installation made of a standard metal profile, and the meth-

of determining the optimal design is analyzed. Before conducting the research work, optimization tasks were defined. Optimization tasks involve determining the mathematically calculated optimal thickness and length of structural elements. The course of the research in the engineering analysis package “Autodesk Inventor” is described. This study consists of conducting a static analysis in “Autodesk Inventor” and then comparing the resulting safety factor with the recommended one. The main result of research work in such software packages is the simplification of the structure without losing the required level of strength, which has a positive effect on the manufacturability and cost-effectiveness of structures and structures created from standard profiles.

Keywords

design optimization, modern design cycle, design stages, “Autodesk Inventor” program, engineering analysis package, safety factor, optimization problems, static analysis

For citation

Treskin S. V., Novikov N. N., Dul'skii E. Yu., Ivanov P. Yu. Reshenie zadachi optimizatsii ramnykh konstruktiv s pomoshch'yu programmnoy kompleksa “Autodesk Inventor” [Solving the problem of optimizing frame structures with the help of the “Autodesk Inventor” software package]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 10–17. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).10-17

Article Info

Received: 16.04.2021, Revised: 10.05.2021, Accepted: 19.05.2021

Введение

В последнее десятилетие наблюдается активный рост мировой экономики, производства товаров и уровня потребления. Актуальным становится вопрос снижения потребления ресурсов при изготовлении продукции. Необходимо решить это таким образом, чтобы с одной стороны затраты на производство были минимальными, а с другой – выпускаемая продукция отвечала всем поставленным требованиям по прочности, габаритам, массе и т. д. Вопрос оптимизации конструкции остается острым со времен зарождения конструкторской деятельности, по этой причине существуют множественные наработки в машиностроительной отрасли как классические, так и инновационные. На сегодняшний день динамично развиваются цифровые технологии как в части роста производительности вычислительной техники, так и в части расширения функционала и развития интерфейса программного обеспечения. Цифровые технологии проникают во все отрасли экономики, в том числе и в машиностроение. На современном этапе существует ряд программных пакетов, позволяющих проектировать детали, узлы и конструкции в полном цикле.

Цикл современного проектирования, частью которого является обязательная оптимизация, как правило состоит из следующих этапов:

1. Первичное проектирование, при котором учитываются основные требования технического задания на конструкцию или деталь, например, габариты, материал, приблизительная прочность, форма, требования к стандартам используемых материалов, функции и т. д.

2. Испытания полученной конструкции или детали на прочность и деформации, т. е. приложение расчетных нагрузок к полученной конструкции, измерение значений запаса прочности конструкции относительно приложенных нагрузок.

3. Оптимизация конструкции с учетом полученных результатов при измерении запаса прочности, которая подразумевает снижение использования материалов при чрезмерно большом запасе прочности, и добавление усиления в местах, имеющих недостаточную прочность.

4. Конечный прочностной расчет, подтверждающий требуемые свойства конструкции согласно техническому заданию.

После осуществления перечисленных этапов проектирования производится переход к опытному конструированию и натурным испытаниям полученной конструкции или детали. Имеющееся на рынке программное обеспечение позволяет реализовать только некоторые этапы проектирования. Одни программы предназначены для создания 3D-моделей и чертежей, другие для расчета прочности и деформаций от расчетных нагрузок, есть программы, позволяющие осуществлять оптимизацию конструкции. Многообразие программного обеспечения для проектирования и инженерного анализа вызывает некоторые проблемы, связанные с экспортом моделей и их свойств из одних программных продуктов в другие, что в конечном счете приводит к потере времени, а иногда и качества результата. Наряду с этим встает вопрос о необходимости наличия лицензий на использование каждого из программных продуктов, что, несомненно, приводит к удорожанию процесса проектирования. Как правило использование специализированного программного обеспечения на каждом этапе требуется для решения задач со сложными граничными условиями, уникальными свойствами материалов, сложными переменными нагрузками или сочетанием тепловых и механических нагрузок и т. д.

Однако проектирование в большинстве случаев осуществляется для неких стандартных условий и не требует широкого ряда настроек рассчитываемого объекта. По этой причине некоторые программ-

ные продукты, первоначально разработанные для создания 3D-моделей и конструкторской документации в рамках реализации первого этапа проектирования («Компас», «AutoCAD» и «Autodesk Inventor»), начали расширять функционал для осуществления стандартных задач следующих этапов проектирования, включая функции по расчетам прочности конструкции и ее оптимизации [1]. В данной статье исследуется часть цикла проектирования конструкции с расчетом нагрузок и ее оптимизация в программе «Autodesk Inventor».

Рассмотрим решение этого вопроса на примере конструкции барабана экспериментальной установки, изготовленного из металлического стандартного профиля. При ее производстве необходимо использовать как можно меньше материала, но при этом конструкция должна отвечать прочностным требованиям. Наряду с прочностью нужно рассматривать вопросы технологичности оптимизированных конструкций. Данному направлению посвящено множество работ и часто решение этой проблемы возможно с помощью пакетов цифрового инженерного анализа. На сегодняшний день существует множество таких пакетов.

В данной статье рассмотрена методика определения оптимальной конструкции барабана экспериментальной установки для сушки главных полюсов тяговых электродвигателей инфракрасным излучением, которая в настоящее время планируется к изготовлению в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (рис. 1) [1–4]. Барабан предназначен для размещения на нем шести полюсов тяговых электродвигателей массой 37 кг каждый. В процессе сушки полюсов барабан равномерно вращается.

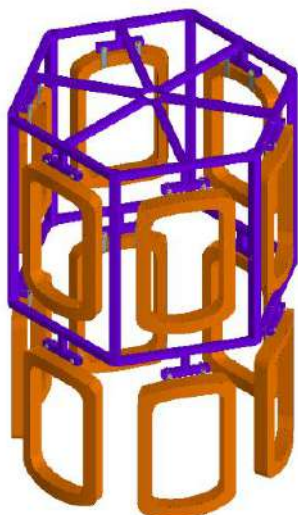


Рис. 1. Исходная модель барабана экспериментальной сушильной установки
Fig. 1. The reference model of the drum of the experimental drying installation

Прежде всего необходимо установить задачи оптимизации [5]. Из всего множества существующих в настоящее время постановок задач оптимизации можно выделить основные направления исследований:

- минимизация массы конструкции с фиксированной геометрией решетки или срединной поверхности (распределение масс по элементам заданной осевой схемы или вдоль срединной поверхности заданных очертаний);
- оптимизация формы и упругих свойств материала конструкции;
- поиск оптимального распределения внешних нагрузок.

Задача оптимизации подразумевает определение математически вычисленной оптимальной толщины и длины элементов конструкции [7–18]. Однако при решении задач по изготовлению конструкций из стандартных профилей металлопроката оптимизация сводится к выбору максимально легкого и отвечающего всем заданным требованиям прочности стандартного профиля. Далее приведен исходный вариант конструкции барабана, на котором будет проводиться статический анализ (рис. 2).

В качестве исходного материала применялась конструкционная сталь со следующими характеристиками (табл.).

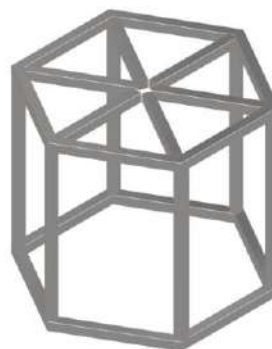


Рис. 2. Исходный вариант конструкции с профилем «Труба 40×40×2 ГОСТ 30245-2003»
Fig. 2. The reference variant of the structure with a profile “Tube 40×40×2 GOST 30245-2003”
Characteristics of steel

Характеристики стали
Steel characteristics

Показатель	Значение
Массовая плотность	7 850 кг / м ³
Предел текучести	207 МПа
Окончательный предел прочности растяжения	345 МПа
Напряжение	
Модуль Юнга	220 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,275

Нагрузка осуществлялась сосредоточенными силами величиной по 362,97 Н. Стрелки желтого цвета обозначают силы, приложенные к раме, и силу тяжести рамной конструкции. Кубы черного цвета обозначают места заземления конструкции. Сварные швы заменены жесткими связями между ребрами конструкции (шары синего цвета). Общая масса конструкции составляет 26,654 кг (рис. 3).

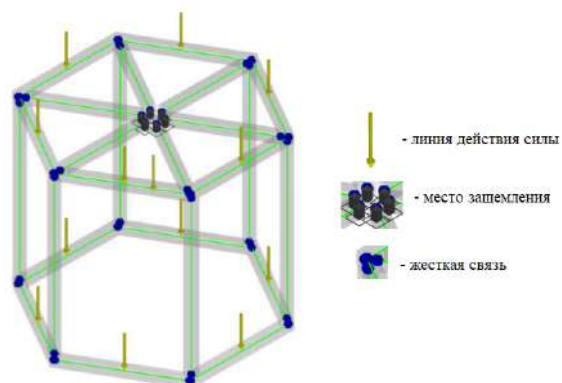


Рис. 3. Схема нагружения конструкции и условные обозначения

Fig. 3. The structure loading diagram and conventional notation

В результате проведения статического анализа в программном комплексе «Autodesk Inventor» были получены результаты, которые приведены ниже (рис. 4). Максимальное напряжение составило 54,32 МПа.

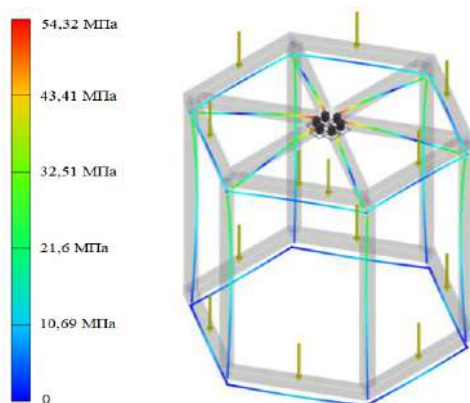


Рис. 4. Напряжение при статической нагрузке исходного варианта конструкции, полученное путем анализа «Autodesk Inventor»

Fig. 4. Stress at the static load of the reference variant of the structure, obtained by the analysis of “Autodesk Inventor”

При расчете элементов из пластичных материалов за предельное напряжение принимают предел текучести, определяемый с учетом размеров детали,

термообработки и характера нагружения; при расчете деталей из хрупких материалов принимают предел прочности, определяемый с учетом характера нагружения [11]. Используемая в исследовании конструкция состоит из упругих элементов, поэтому при расчете коэффициента запаса прочности прием предел текучести за предельное напряжение. При расчете коэффициента запаса прочности будет использоваться формула

$$\frac{\sigma_{\text{пр}}}{\sigma_{\text{max}}} = n,$$

где $\sigma_{\text{пр}} = 207$ МПа предельное напряжение, принятое равным пределу текучести материала (данное значение выбрано из встроенной библиотеки материалов в программном комплексе «Autodesk Inventor»); $\sigma_{\text{max}} = 54,32$ МПа – максимальное напряжение, полученное в результате статического анализа конструкции (рис. 4); n – коэффициент запаса прочности.

Определим, исходя из имеющихся данных, коэффициент запаса прочности:

$$n = \frac{207}{54,32} = 3,81$$

Рекомендуемым коэффициентом запаса прочности n для аналогичных металлоконструкций является $n = 1,4$ [11].

Так как существует избыточный коэффициент запаса прочности, то применим квадратный полый профиль другого размера и проведем аналогичный статический анализ.

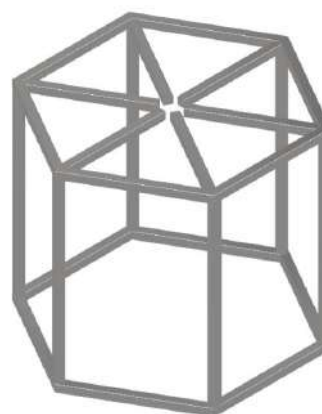


Рис. 5. Вариант конструкции с профилем «Труба 30×30×2 ГОСТ 8639-82»
Fig. 5. A variant of the structure with a profile “Tube 30×30×2 GOST 8639-82”

Проводится аналогичный статический анализ, в котором силовая нагрузка остается прежней. Результаты данного анализа приведены (рис. 6).

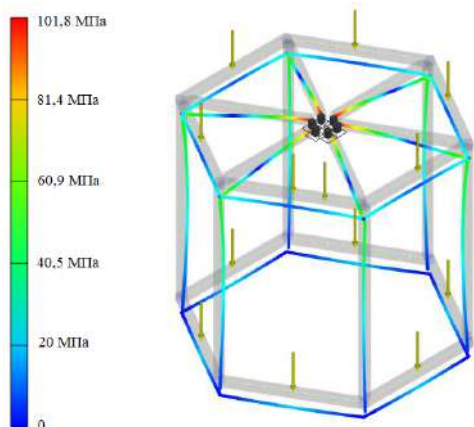


Рис. 6. Результат статического анализа с профилем «Труба 30×30×2 ГОСТ 8639-82»
Fig. 6. The result of static analysis with a profile “Tube 30×30×2 GOST 8639-82”

Проведем расчет коэффициента запаса прочности, аналогичный предыдущему. В результате получаем:

$$n = \frac{207}{101,8} = 2,03 .$$

Полученное значение коэффициента запаса прочности по-прежнему является избыточным, поэтому необходимо уменьшить размеры сечения, используемого в конструкции. Вариант конструкции с новым профилем представлен (рис. 7).

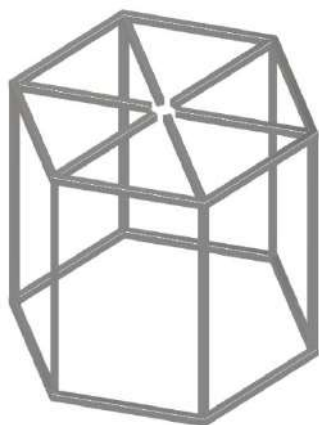


Рис. 7. Вариант конструкции с профилем «Труба 25×25×2,5 ГОСТ 8639-82»
Fig. 7. A variant of the structure with a profile “Tube 25×25×2,5 GOST 8639-82”

Проведем повторно статический анализ с прежней силовой нагрузкой, определим коэффициент запаса прочности. Полученный результат исследования в программном комплексе «Autodesk Inventor» показан далее (рис. 8).

В результате расчета получаем:

$$n = \frac{207}{134,3} = 1,54 .$$

Полученный результат отвечает рекомендованному значению коэффициента запаса прочности. Дальнейшее уменьшение площади сечения стандартного профиля приведет к несоблюдению прочностного требования (рис. 9).

Проведем расчет коэффициента запаса прочности для конструкции с профилем «Труба 25×25×2 ГОСТ 8639-82»:

$$n = \frac{207}{155} = 1,34 .$$

Данный результат меньше рекомендованного значения, поэтому данный вариант конструкции нельзя использовать, ввиду нарушения прочностного требования.

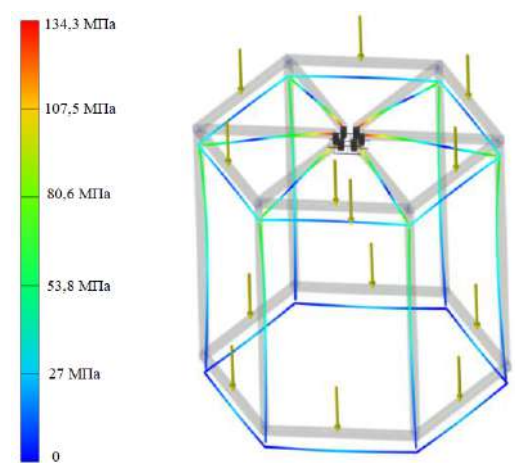


Рис. 8. Результат статического анализа с профилем «Труба 25×25×2,5 ГОСТ 8639-82»
Fig. 8. The result of static analysis with a profile “Tube 25×25×2,5 GOST 8639-82”

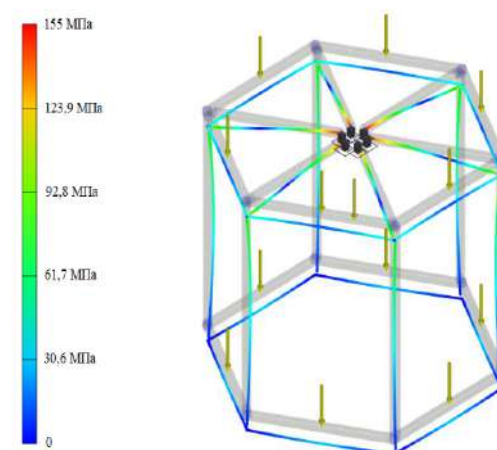


Рис. 9. Результат статического анализа с профилем «Труба 25×25×2 ГОСТ 8639-82»
Fig. 9. The result of static analysis with a profile “Tube 25×25×2 ГОСТ 8639-82”

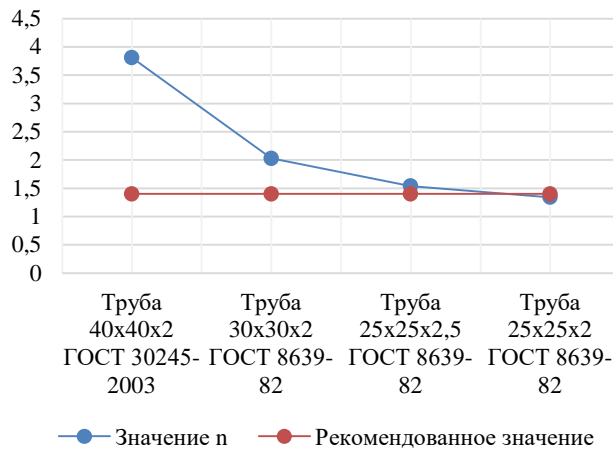


Рис. 10. График изменения коэффициента прочности
Fig. 10. A graph of the strength factor change

Итоговый вариант конструкции с профилем «Труба 25×25×2,5 ГОСТ 8639-82» имеет массу 19,749 кг. В результате по сравнению с исходным вариантом стандартного профиля «Труба 40×40×2 ГОСТ 30245-2003» была уменьшена масса конструкции более чем на 25 %. Обобщенный результат проведенной работы приведен (рис. 10).

Следует отметить, что программный комплекс «Autodesk Inventor» позволяет после проведенного статического анализа отобразить на созданной модели эпюры изгибающих моментов относительно оси X (рис. 11), относительно оси Y (рис. 12) и эпюры крутящих моментов (рис. 13), что помогает более подробно оценить особенности создаваемой конструкции.

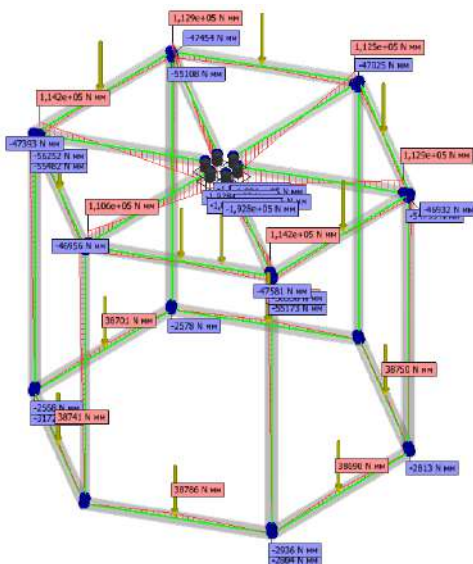


Рис. 11. Эпюры изгибающих моментов относительно оси X
Fig. 11. Bending moment diagrams referred to the X-axis

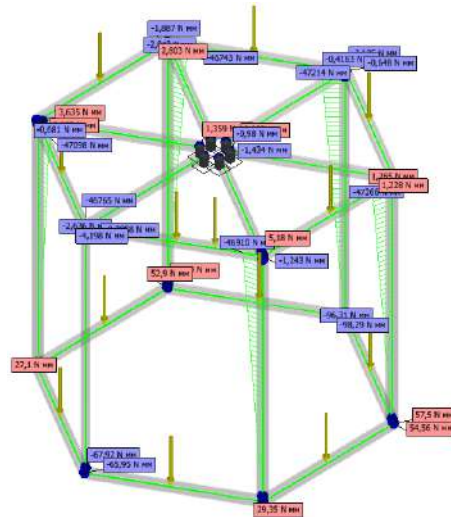


Рис. 12. Эпюры изгибающих моментов относительно оси Y
Fig. 12. Bending moment diagrams referred to the Y-axis

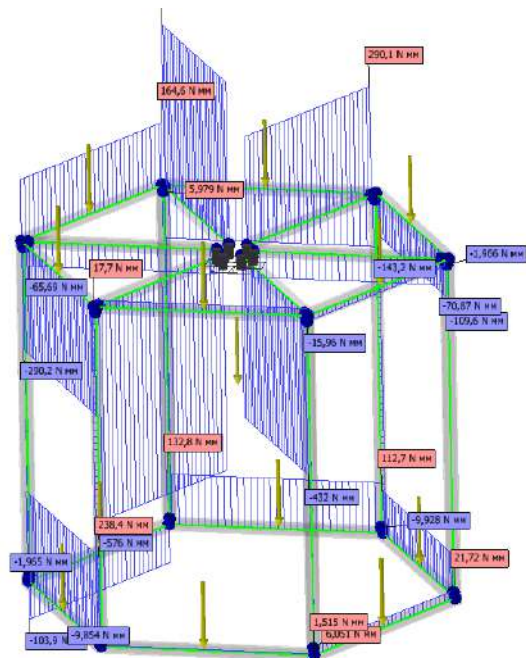


Рис. 13. Эпюры крутящих моментов
Fig. 13. Torque diagrams

Заключение

Основным результатом исследовательских работ в подобных программных комплексах является облегчение конструкции без потери необходимого уровня прочности, что положительным образом сказывается на технологичности и экономической эффективности конструкций и сооружений, создаваемых из стандартных профилей.

Список литературы

1. Иванова А.П., Чумак А.Н. Оптимальное проектирование стропильной металлической фермы с учетом возможных повреждений ее отдельных элементов // *Строительство и техногенная безопасность*. 2014. № 49. С. 12–17.
2. Управление оперативными процессами работы сортировочной станции на основе применения искусственных нейронных сетей / А.М. Худогов, П.Ю. Иванов, Н.И. Мануилов и др. // *Изв. Петерб. ун-та путей сообщ.* 2018. Т. 15, № 1. С. 130–135.
3. Иванов П.Ю., Дульский Е.Ю., Худогов А.М. Состояние вопроса надежности и долговечности изоляции асинхронных вспомогательных машин // *Изв. Транссиба*. 2015. № 2 (22). С. 2–6.
4. Дульский Е.Ю., Доценко Н.С., Лыткина Е.М. Исследование эффективности конвективного и терморadiационного методов капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава // *Изв. Транссиба*. 2014. № 1 (17). С. 14–19.
5. Дульский Е.Ю., Лыткина Е.М., Худогов А.М. Влияние химических свойств полимеров и режимов энергоподвода на прочность и пластичность изоляции в локальных технологиях продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава // *Изв. Транссиба*. 2015. № 1 (21). С. 6–11.
6. Лесовик Р.В., Клюев С.В., Клюев А.В. Основы оптимизации строительных конструкций // *Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2008. №2. С. 4–7.
7. Власенков А.Н., Павлов А.П., Пасечник Д.Ю. Оптимизация конструкций изделий с применением систем автоматической оптимизации // *Наука и бизнес: пути развития*. 2020. № 10 (112). С. 16–21.
8. Ольхов Я.И., Андронников А.В. Автоматизированное оптимальное проектирование пространственных металлических стержневых конструкций (ПМСК) с использованием алгоритмов структурной оптимизации // *Изв. высш. учеб. заведений. Строительство*. 2003. № 12 (540). С. 8–13.
9. Чемодуров В.Т., Вдовиченко В.В. Оптимизация параметров строительных конструкций на этапе проектирования // *Современные технологии в строительстве, дизайне, архитектуре : сб. материалов междунар. науч. конф.* 2013. С. 84–91.
10. Литра А.Н. Оптимизация конструкций с помощью новых программных методов // *Проблемы развития автоматизации и механизации процессов добычи, переработки и транспорта газа и газового конденсата : материалы науч.-техн. конф.* Краснодар, 2008. С. 90–93.
11. Грузоподъемные машины: учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование» / Александров М.П., Колобов Л.Н., Лобов Н.А. и др. М. : Машиностроение, 1986. 400 с.
12. Гребенюк Г.И., Бирюлев В.В. Оптимизация узлов и соединений строительных конструкций // *Изв. высш. учеб. заведений. Строительство*. 1994. № 11. С. 15–21.
13. Доможиров Л.И. Оптимизация коэффициента запаса прочности крупногабаритных деталей с учетом малых дефектов // *Тяжелое машиностроение*. 2006. № 1. С. 35–39.
14. Билык Н.А. Коэффициенты безопасности и запаса прочности механических конструкций // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2017. № 5. С. 63–70.
15. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация металлических конструкций путем эволюционного моделирования. М. : АСВ, 2012. 240 с.
16. Юрьев А.Г. Основы проектирования рациональных несущих конструкций. Белгород : БТИСМ, 1988. 94 с.
17. Юрьев А.Г., Клюев С.В. Эволюционные и генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций. Белгород : Изд-во БГТУ, 2006. 134 с.
18. Мажид К.И. Оптимальное проектирование конструкций. М. : Высш. шк., 1979. 237 с.

References

1. Ivanova A.P., Chumak A.N. Optimal'noe proektirovanie stropil'noi metallicheskoj fermy s uchyotom vozmozhnykh povrezhdenii eyo otdel'nykh elementov [Optimal design of a metal truss taking into account possible damage to its individual elements]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' [Construction and technogenic safety]*, 2014. No. 49. Pp. 12–17.
2. Khudonogov A.M., Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dul'skii E.Yu. Upravlenie operativnymi protsessami raboty sortirovochnoi stantsii na osnove primeneniya iskusstvennykh neironnykh setei [Control of operational processes of the marshalling station activity based on the use of artificial neural networks]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Transport]*, 2018. Vol. 15. No. 1. Pp. 130–135.
3. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Khudonogov A.M. Sostoyanie voprosa nadezhnosti i dolgovechnosti izolyatsii asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin [The state of the issue of reliability and durability of isolation of asynchronous auxiliary machines]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2015. No. 2 (22). Pp. 2–6.
4. Dul'skii E.Yu., Dotsenko N.S., Lytkina E.M. Issledovanie effektivnosti konvektivnogo i termoradiatsionnogo metodov kapsulirovaniya izolyatsii obmotok pri remonte elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Investigation of the effectiveness of convective and thermoradiative methods of encapsulating the insulation of windings in the repair of electric machines of traction rolling stock]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2014. No. 1 (17). Pp. 14–19.
5. Dul'skii E.Yu., Lytkina E.M., Khudonogov A.M. Vliyaniye khimicheskikh svoystv polimerov i rezhimov ik-energopodvoda na prochnost' i plastichnost' izolyatsii v lokal'nykh tekhnologiyakh prodleniya resursa elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Influence of chemical properties of polymers and modes of IR power supply on the strength and plasticity of insulation in local technologies of extending the life of electric machines of traction rolling stock]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2015. No. 1 (21). Pp. 6–11.
6. Lesovik R.V., Klyuev S.V., Klyuev A.V. Osnovy optimizatsii stroitel'nykh konstruktssii [Fundamentals of optimization of construction structures]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova [The Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]*, 2008. No. 2. Pp. 4–7.

7. Vlasenkov A.N., Pavlov A.P., Pasechnik D.Yu. Optimizatsiya konstruktssii izdelii s primeneniem sistem avtomaticheskoi optimizatsii [Optimization of product structures with the use of automatic optimization systems]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: ways of development]. 2020. No. 10 (112). Pp. 16–21.
8. Ol'kov Ya.I., Andronnikov A.V. Avtomatizirovanoe optimal'noe proektirovanie prostranstvennykh metallicheskih sterzhnevyykh konstruktssii (PMSK) s ispol'zovaniem algoritmov strukturnoi optimizatsii [Automated optimal design of spatial metal rod structures (SMRS) with the use of structural optimization algorithms]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* [Proceedings of universities. Investment. Construction], 2003. No. 12 (540). Pp. 8–13.
9. Chemodurov V.T., Vdovichenko V.V. Optimizatsiya parametrov stroitel'nykh konstruktssii na etape proektirovaniya [Optimization of the parameters of building constructions at the design stage]. *Sovremenne tekhnologii v stroitel'stve, dizaine, arkhitekture. Sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Modern technologies in construction, design, and architecture. Collection of materials of the International scientific conference], 2013. Pp. 84–91.
10. Litra A.N. Optimizatsiya konstruktssii s pomoshch'yu novykh programmykh metodov [Optimization of structures with the help of new program methods]. *Problemy razvitiya avtomatizatsii i mekhanizatsii protsessov dobychi, pererabotki i transporta gaza i gazovogo kondensata. Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Problems of development of automation and mechanization of processes of production, processing and transport of gas and gas condensate. Materials of the scientific and technical conference]. ООО "Izdatel'skii dom – Yug", ОАО "SPA "Promavtomatika" Publ., 2008. Pp. 90–93.
11. Aleksandrov M.P., Kolobov L.N., Lobov N.A., etc. Gruzopod'yomnye mashiny: Uchebnik dlya vuzov po spetsial'nosti "Pod'emno-transportnye mashiny i oborudovanie" [Lifting machines: A textbook for universities on the specialty "Lifting and transport machines and equipment"]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 400 p.
12. Grebenyuk G.I., Biryulyov V.V. Optimizatsiya uzlov i soedinenii stroitel'nykh konstruktssii [Optimization of assemblies and connections of building constructions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [Proceedings of higher educational institutions. Construction], 1994. No. 11. Pp. 15–21.
13. Domozhirov L.I. Optimizatsiya koeffitsienta zapasa prochnosti krupnogabaritnykh detalei s uchetom malyykh defektov [Optimization of the factor of safety margin of large-sized parts taking into account small defects]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering], 2006. No. 1. Pp. 35–39.
14. Bilyk N.A. Koeffitsienty bezopasnosti i zapasa prochnosti mekhanicheskikh konstruktssii [Coefficients of safety and margin of safety of mechanical structures]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability], 2017. No. 5. Pp. 63–70.
15. Serpik I.N., Alekseitsev A.V. Optimizatsiya metallicheskih konstruktssii putyom evolyutsionnogo modelirovaniya [Optimization of metal structures by evolution modeling]. Moscow: DIA Publ., 2012. 240 p.
16. Yur'ev A.G. Osnovy proektirovaniya ratsional'nykh nesushchikh konstruktssii [Fundamentals of designing rational load-bearing structures]. Belgorod: BTISM Publ., 1988. 94 p.
17. Yur'ev A.G., Klyuev S.V. Evolyutsionnye i geneticheskie algoritmy optimizatsii stroitel'nykh konstruktssii [Evolutionary and genetic algorithms for optimizing building structures]. Belgorod: BSTU Publ., 2006. 134 p.
18. Mazhid K.I. Optimal'noe proektirovanie konstruktssii [Optimal design of structures]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1979. 237 p.

Информация об авторах

Трескин Сергей Викторович – Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergei.tresckin@yandex.ru

Новиков Николай Николаевич – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: novikovnikolayn@mail.ru

Иванов Павел Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Дульский Евгений Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: e.dulskiy@mail.ru

Information about the authors

Sergei V. Treskin – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergei.tresckin@yandex.ru

Nikolai N. Novikov – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: novikovnikolayn@mail.ru

Pavel Yu. Ivanov – Ph. D. of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Evgenii Yu. Dulskii – Ph. D. of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Railcars and Railcar Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: e.dulskiy@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).17-24

УДК 62-97/98

Расчет шестифазной линейной электрической цепи методом симметричных составляющих

А. В. Данеев¹✉, Р. А. Данеев², В. Н. Сизых¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ daneev@mail.ru