

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ

***Аннотация:** В данной статье рассматривается применение методов оптимизации к проектированию стальных стропильных ферм. Подчеркивается важность снижения металлоемкости в несущих конструкциях с учетом современных требований к экономичности и использованию материалов. Рассматриваются основные типы структурной оптимизации: размерная, геометрическая, топологическая и многокритериальная оптимизация. Особое внимание уделяется метаэвристическим алгоритмам для решения задач со смешанными дискретно-непрерывными переменными. Описывается возможность интеграции параметрического моделирования, конечно-элементного анализа и оптимизационного поиска, позволяющего автоматизировать анализ проектных решений и генерировать множество Парето-оптимальных вариантов, из которых проектировщик может выбрать рациональное решение с учетом массы, жесткости и использования несущей способности.*

***Ключевые слова:** стальные фермы; метаэвристические алгоритмы; параметрическое моделирование; фронт Парето; многокритериальная оптимизация.*

***Annotation:** This article examines the application of optimization methods to the design of steel roof trusses. It emphasizes the importance of reducing the metal*

content of load-bearing structures while meeting modern requirements for cost-effectiveness and material utilization. The main types of structural optimization are discussed: dimensional, geometric, topological, and multi-criteria optimization. Attention is given to metaheuristic algorithms for solving problems with mixed discrete-continuous variables. The possibility of integrating parametric modeling, finite element analysis, and optimization search is described, enabling the automated analysis of design solutions and the generation of multiple Pareto-optimal options from which the designer can select a rational solution considering mass, stiffness, and load-bearing capacity utilization.

Key words: *steel trusses; metaheuristic algorithms; parametric modeling; Pareto front; multicriteria optimization.*

Введение

Задача снижения металлоёмкости несущих конструкций одновременно экономическое и экологическое значение [1, 2]. Одним из ключевых инструментов её решения является структурная оптимизация — поиск наилучшего расположения и параметров элементов конструкции при заданных ограничениях по прочности, жёсткости и устойчивости. В проектной практике стальных ферм выбор статической схемы, высоты, числа панелей, типа решётки и сечений элементов традиционно осуществляется последовательно: сначала задаётся геометрия, затем подбираются профили. Подобный подход не позволяет одновременно оценить взаимное влияние всех параметров на металлоёмкость, жёсткость и коэффициенты использования несущей способности. Исследования последних лет показывают, что переход к автоматизированному вариантному анализу на основе параметрических моделей и оптимизационных алгоритмов позволяет существенно сократить расход материала при соблюдении всех нормативных требований [3, 4]. В настоящей работе рассмотрены основные методы структурной оптимизации стальных ферм, особенности постановки оптимизационной задачи для ферм и

описаны способы реализации многокритериальной оптимизации в средах параметрического моделирования.

Современные исследования по оптимизации показывают, что инженерные задачи часто являются сложными для классических методов, так как содержат нелинейные зависимости. В таких условиях популяционные и эволюционные алгоритмы являются удобным инструментом, поскольку позволяют за короткое время рассмотреть множество вариантов и автоматически предоставить расчёты [5]. Систематизация научных источников в области структурной оптимизации строительных конструкций позволяет выделить четыре основных её типа [1]:

1. Размерная (size) оптимизация — варьируются площади поперечных сечений элементов при фиксированной геометрии и топологии конструкции;
2. Геометрическая (shape) оптимизация — варьируются координаты узлов конструкции, что позволяет изменять очертание без смены топологии;
3. Топологическая (topology) оптимизация — определяется наличие или отсутствие элементов между узлами; из начального «плотного» основания (ground structure) последовательно исключаются стержни с малым вкладом в работу системы;
4. Многокритериальная (multi-objective) оптимизация — одновременное рассмотрение двух и более из перечисленных типов применительно к нескольким конкурирующим целевым функциям.

Поскольку параметры фермы взаимосвязаны и одновременно влияют на массу, прогибы и коэффициенты использования, задача обычно приобретает многокритериальный характер [6]. Любая задача структурной оптимизации формализуется через три компонента основных компонента:

- Параметры оптимизации;
- Целевые функции;

– Ограничения.

В рассматриваемой задаче переменными проектирования являются сечения элементов фермы, высота конструкции, уклон верхнего пояса, число панелей и тип решётки. В задачах оптимизации строительных конструкций целевые функции обычно связаны со снижением массы или стоимости, повышением жёсткости, более полным использованием несущей способности и уменьшением экологического воздействия. В качестве основных критериев могут рассматриваться масса конструкции, максимальный прогиб и коэффициент использования несущей способности. Ограничения задачи задаются требованиями нормативной документации и включают проверки прочности, жёсткости и устойчивости конструкции [7]. В силу конкурирующего характера целевых функций единственного «наилучшего» решения не существует: результатом является множество Парето-оптимальных решений — таких, для которых улучшение одного критерия невозможно без ухудшения хотя бы одного из остальных [1].

Так как параметры фермы включают как непрерывные величины, например высоту и уклон, так и дискретные значения, например выбор сечений из сортамента, задача имеет смешанный дискретно-непрерывный характер, поэтому в задачах структурной оптимизации широко применяются метаэвристические алгоритмы, которые одновременно выполняют два процесса: поиск новых областей решений и уточнение уже найденных удачных вариантов [8, 9]. Благодаря этому они могут использоваться для задач, где необходимо учитывать несколько критериев: массу конструкции, прогибы и коэффициенты использования элементов. К наиболее распространённым метаэвристическим алгоритмам относятся алгоритмы, представленные в таблице 1.

Эволюционные алгоритмы

Алгоритм	Краткая характеристика метаэвристических алгоритмов
Genetic Algorithm (GA)	Основан на принципах естественного отбора. Лучшие варианты «скрещиваются» между собой, образуя новые решения.
Particle Swarm Optimization (PSO)	Имитирует движение стаи птиц или рыб. Каждый вариант постепенно приближается к лучшим найденным решениям.
Harmony Search (HS)	Основан на аналогии с поиском гармонии в музыке. Алгоритм подбирает комбинации параметров, постепенно улучшая результат.
Cuckoo Search (CS)	Основан на поведении кукушек и механизме замещения менее удачных решений более эффективными.
Artificial Bee Colony (ABC)	Имитирует поведение пчелиного роя при поиске источников пищи, где лучшие решения получают большее развитие.
Teaching-Learning Based (TLBO)	Основан на процессе обучения: решения улучшаются за счёт взаимодействия между «учителем» и «учениками».
Jaya	Стремится приблизиться к лучшему решению и одновременно удалиться от худшего. Отличается простой структурой и небольшим числом настроек.
SPEA-2, NSGA-II, НурЕ	Многокритериальные эволюционные алгоритмы, основанные на принципе Парето

Для многокритериальных задач, где требуется одновременно учитывать несколько показателей, применяются специальные эволюционные алгоритмы, например NSGA-II, SPEA-2 и НурЕ. Их задача заключается не в поиске одного единственного решения, а в формировании множества Парето-оптимальных вариантов. Такие варианты показывают разные соотношения между массой, жёсткостью и уровнем использования несущей способности. Например, один вариант может иметь минимальную массу, но больший прогиб, другой — быть более жёстким, но более тяжёлым. Поэтому окончательный выбор из

множества Парето-оптимальных решений остаётся за проектировщиком и зависит от инженерных, экономических и технологических требований [10].

Для практического применения описанных алгоритмов необходима программная среда, в которой можно одновременно изменять параметры фермы, выполнять расчёт и оценивать результаты оптимизации. Реализация параметрического подхода осуществляется средствами визуального или текстового программирования. К наиболее распространённым средам относятся Grasshopper (надстройка Rhinoceros 3D), Dynamo (среда Autodesk Revit), GenerativeComponents (среда Bentley MicroStation), а также прикладные API расчётных комплексов SAP2000, ETABS и ANSYS, доступные через языки Python и APDL [11]. Сравнительный анализ указанных средств приведён в Таблице 2.

Таблица 2.

Сравнение сред параметрического моделирования

Среда	Тип программирования	КЭ-анализ	Оптимизация	Сортамент
Grasshopper	Визуальное	Karamba3D	Octopus, Galapagos	EN, AISC, ГОСТ
Dynamo	Визуальное	Robot SA	Ограниченно	EN, ANSI
SAP2000 API (Python)	Текстовое	Встроенный	Внешние алгоритмы	AISC, EN
ANSYS APDL	Текстовое	Встроенный	OptiSLang	Пользов.

Проведённый анализ методов структурной оптимизации показывает, что для задач подбора геометрии и сечений стальных ферм покрытий из замкнутых гнутосварных профилей наиболее адекватными являются многокритериальные метаэвристические алгоритмы, работающие со смешанными дискретно-непрерывными переменными. Из современных интегрированных платформ связка Grasshopper — Karamba3D — Octopus позволяет в одном программном комплексе проводить: параметрическое

формирование геометрии, конечно-элементный анализ и поиск Парето-оптимальных решений осуществляются в единой среде без потери данных при межпрограммном обмене.

Практическое применение методов структурной оптимизации в параметрических средах сопряжено с рядом нерешённых проблем, выявленных в ходе анализа литературы.

Первая проблема связана с весовыми критериями в многокритериальных задачах. При рассмотрении трёх и более целевых функций возникает вопрос о предпочтениях проектировщика: как выбрать конкретный вариант из множества Парето-оптимальных решений? Универсальной системы весов не существует, а любой весовой критерий несёт субъективную составляющую. Вторая проблема – неоднозначность целевых функций. Масса как заменитель стоимости не учитывает расходов на изготовление, транспортировку и монтаж. Для ферм из ГСП это ограничение особенно ощутимо, поскольку трудоёмкость узловых соединений (а при необходимости – фасонных вставок) может быть сопоставима со стоимостью металла. Третья проблема – ограниченная применимость алгоритмов. Производительность метаэвристик существенно зависит от конкретной задачи, и результат оптимизации в Octopus следует рассматривать как рациональную предварительную конфигурацию, требующую дополнительной проверки узловых соединений, местной устойчивости стенок и полок профилей, а также технологичности изготовления.

Использованные источники:

1. Mei L., Wang Q. Structural Optimization in Civil Engineering: A Literature Review // Buildings. 2021. Vol. 11. No. 66.
2. Родионов И. К., Родионов И. И. Технологические параметры сварки, экономика и экология при усилении стальных ферм покрытия зданий

агропромышленного комплекса //Вестник НГИЭИ. – 2018. – №. 6 (85). – С. 50-59.

3. Василькин А. А. Оптимизация стальных конструкций с использованием САПР //Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – №. 1 (54). – С. 116-124.

4. Hillberg C., ANDERSSON V. Evolutionary optimization of steel truss footbridges-A study of parametric design and optimization in Karamba 3D, Galapagos and Octopus for different truss geometries. – 2018.

5. Wang K., Abualigah L., Smerat A., Li J., Wu X., Liu H., Shao Z., Mirjalili S. A nature recoil mechanism-based Octopus optimization algorithm for solving the global and constraint optimization from engineering structural design problems. Journal of Computational Design and Engineering, 2026.

6. Алексейцев А. В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней //Magazine of Civil Engineering. – 2013. – №. 5 (40). – С. 28-37.

7. da Silva M. M., das Neves F. A., Simonetti H. L. Automated Approach For Multi-objective Optimization Of Steel Trusses Using Genetic Algorithms and Reliability //XLIV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. – 2023. – Т. 5. – №. 05.

8. Houssein E. H. et al. Recent metaheuristic algorithms for solving some civil engineering optimization problems //Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – №. 1. – С. 7929.

9. Rajwar K., Deep K., Das S. An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges //Artificial Intelligence Review. – 2023. – С. 1.

10. Mortazavi A. A new fuzzy strategy for size and topology optimization of truss structures //Applied Soft Computing. – 2020. – Т. 93. – С. 106412.

11. Üstüner B., Doğan E. Structure optimization with metaheuristic algorithms and analysis by finite element method //KSCE Journal of Civil Engineering. – 2024. – Т. 28. – №. 1. – С. 328-341.