

УДК 004.94

Разработка программного модуля генеративного проектирования на основе топологической оптимизации

Михайлова Екатерина Алексеевна

Волосатова Тамара Михайловна (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Работа посвящена демонстрации разработанного модуля генеративного проектирования. Данный модуль представляет собой автономный программный компонент, предназначенный для совместного использования с CAD-средами. В качестве входных данных модуль принимает граничные условия, приложенные нагрузки, ограничения на геометрию, свойства материала и параметры оптимизации. Алгоритм генерации включает три этапа: построение проектной области с учетом геометрических ограничений, численное решение задачи топологической оптимизации и последующую постобработку в виде сглаживания и триангуляции результирующей структуры. Итоговая 3D-модель сохраняется в формате, совместимом с большинством современных САПР и может быть импортирована в привычную среду проектирования для дальнейшей доработки.

Ключевые слова: САПР, генеративное проектирование, структурная оптимизация, топологическая оптимизация, аддитивные технологии

Введение. В последние годы системы автоматизированного проектирования (САПР) все чаще используются не только для построения геометрических моделей, но и для проведения инженерных расчетов и решения задач оптимизации на различных этапах проектирования. Одним из приоритетных направлений развития является сокращение доли ручного труда за счет автоматизации процесса проектирования методами структурной оптимизации [1].

Структурная оптимизация представляет собой класс вычислительных методов, направленных на определение рациональной формы, распределения материала и параметров конструкции, обеспечивающих оптимальные характеристики при заданных нагрузках, граничных условиях и технологических ограничениях [2]. Одним из ключевых этапов в развитии этого направления стала разработка методов топологической оптимизации.

Несмотря на то, что основные методы были предложены еще в 90-е годы прошлого столетия, реальное внедрение технологии в CAD/CAE-системы началось только в нулевых годах. В 2010-х с развитием параллельных вычислений появилась возможность проводить более сложные расчеты. В этот период топологическая оптимизация была добавлена в MSC Nastran (2012 г.), Autodesk Fusion360 (2015 г.), Siemens NX в версии NX10 (2016 г.). С ростом вычислительных мощностей структурная оптимизация стала доступна широкому кругу пользователей САПР. Интерес

к этим технологиям продолжает расти, а разработка новых методов остается актуальным и востребованным направлением в научных исследованиях [3].

За последнее десятилетие было предложено множество модификаций алгоритмов топологической оптимизации. В частности, предложена новая постановка задачи, позволяющая учитывать геометрические ограничения. В отличие от классического подхода, основанного на итеративном удалении материала, этот метод позволяет формировать конструкцию с нуля в пределах допустимой геометрии. Такой подход получил название генеративного проектирования (Generative Design) [4].

Впервые технология генеративного проектирования была представлена в 2017 году компанией Autodesk. Это побудило многих разработчиков САПР к созданию собственных решений. На сегодняшний день только две компании (Siemens и CATIA) смогли повторить успех Autodesk, интегрировав аналогичную технологию в свои продукты.

Целью данного исследования является разработка программного модуля генеративного проектирования на основе топологической оптимизации. Построена математическая модель и на ее основе разработан численный алгоритм. Особое внимание уделено возможности использования данного модуля совместно с современными САПР посредством экспорта сгенерированных конструкций в CAD-формат.

Математическая постановка задачи. Генеративное проектирование представляет собой расширение классической задачи топологической оптимизации. На область проектирования накладываются следующие геометрические ограничения.

Обязательные зоны — области, которые должны обязательно войти в итоговую конструкцию (например, крепежные элементы или соединительные узлы).

Запрещенные зоны — области, в которых размещение материала не допускается (например, это может быть пространство, предназначенное для других деталей).

В основе разработанного алгоритма лежит метод топологической оптимизации, направленный на определение такого распределения плотности материала $\rho(x)$, при котором целевая функция достигает минимального значения при условии соблюдения всех заданных ограничений.

Сформулируем математическую постановку задачи. Пусть $\Omega \subset R^3$ — область проектирования. Распределение материала задается функцией плотности $\rho(x)$, где $\rho(x) = 1$ означает, что в данной точке есть материал, а $\rho(x) = 0$ — что материал отсутствует. Задачу генеративного проектирования на основе топологической оптимизации в общем виде можно записать в виде [5]

$$\min_{\rho} \Phi(\rho, u),$$

при условиях

$$\begin{aligned}\int_{\Omega} \rho(x) dx &\leq V_{target}; \\ 0 &\leq \rho(x) < 1; \\ \rho(x) &= 1, \text{ при } x \in \Omega_{preserve} \subset \Omega; \\ \rho(x) &= 0, \text{ при } x \in \Omega_{obstacle} \subset \Omega.\end{aligned}$$

Здесь приняты обозначения: $\min_{\rho} \Phi(\rho, u)$ — целевая функция; $u = u(\rho)$ — поле перемещения, зависящее от ρ ; V_{target} — допустимый объем конструкции; $\Omega_{preserve}$ — области, в которых материал должен быть обязательно сохранен (обязательные зоны); $\Omega_{obstacle}$ — области, где генерация материала запрещена (запрещенные зоны).

В большинстве практических задач в качестве критерия прочности используется податливость конструкции [6]. Податливость (compliance) отражает степень деформации конструкции под действием заданной нагрузки и определяется как работа внешних сил на перемещение конструкции:

$$C = f^T u,$$

где C — податливость; f — вектор внешних нагрузок; u — вектор перемещений.

Чем выше податливость, тем меньшую жесткость демонстрирует конструкция при заданном внешнем нагружении. Таким образом, минимизация функции податливости позволяет сформировать конструкцию, обладающую заданной прочностью при наименьшем расходе материала. Дальнейшее сокращение объема может привести к возникновению недопустимых деформаций и риску локального разрушения конструкции.

Реализация алгоритма генеративного проектирования. Разработанный модуль представляет собой автономный программный компонент, предназначенный для совместного использования с CAD-средами. Исходная геометрия может быть подготовлена в любой САПР и передана в формате STEP в качестве входных данных вместе с описанием свойств материала и параметрами оптимизации. Свойства материала задаются через модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность. В параметры оптимизации входят ограничение на массу итоговой конструкции, ограничение на уровень эквивалентного напряжения по Мизесу и степень детализации конечно-элементной сетки. Для передачи входных данных используется конфигурационный файл в формате JSON.

В качестве примера, демонстрирующего работу алгоритма, рассмотрена задача оптимизации формы фланца. В данном случае центральное отверстие фиксируется, а к остальным прикладываются внешние нагрузки. На рис. 1 приведены варианты конструкции, сгенерированные в Autodesk Fusion 360 для различных материалов.



Рис. 1. Варианты конструкции фланца, сгенерированные в Autodesk Fusion 360

Основные стадии алгоритма генеративного проектирования представлены на рис. 2. На первом этапе область проектирования разбивается на конечные элементы, в данной реализации — на воксели. Далее на основе начальной геометрии формируется стартовая область проектирования. В качестве этой области можно использовать как простую форму (например, параллелепипед), так и более сложную (например, выпуклую оболочку). Для построения выпуклой оболочки множества точек в данной работе применяется алгоритм Quickhull с использованием библиотеки CGAL [7].

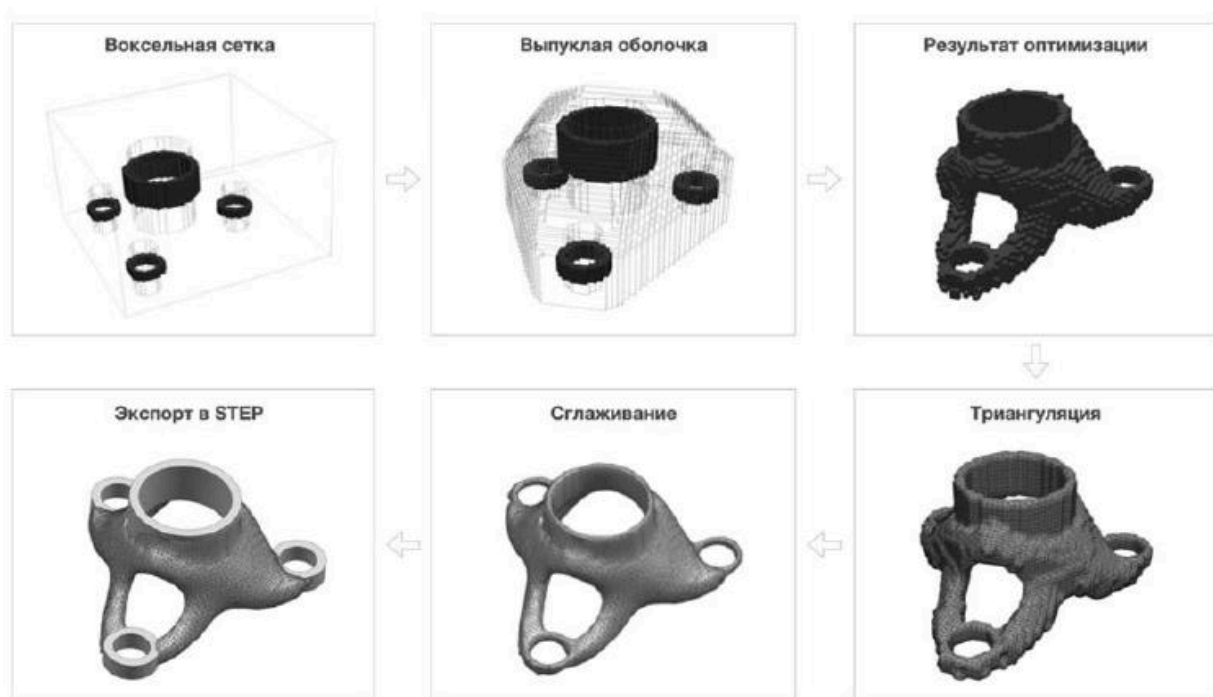


Рис. 2. Основные этапы алгоритма генеративного проектирования

Ключевым этапом генеративного проектирования является топологическая оптимизация, в рамках которой определяется рациональное распределение материала с учетом заданных ограничений и нагрузок. В данной работе классический метод топологической оптимизации SIMP (Solid Isotropic

Material with Penalization) модифицирован в соответствии с требованиями генеративного подхода: исключено удаление материала в обязательных зонах и добавление — в запрещенных. На завершающем этапе оптимизации выполняется анализ напряженного состояния изделия. Оценка градиента эквивалентных напряжений по Мизесу позволяет выявить области, наиболее подверженные риску локального разрушения.

На рис. 3 представлены промежуточные результаты оптимизации конструкции, выполняющей функцию фланца. В данном примере приближение к оптимальному решению удалось достичь за 40 итераций градиентного метода. В результате проведенной оптимизации масса конструкции снижена на 40 % по сравнению с исходной выпуклой оболочкой. При этом прочностные характеристики сохраняются: максимальные перемещения не превышают допустимых значений, эквивалентные напряжения составляют 140,79 МПа при допустимом значении 250 МПа, что соответствует коэффициенту запаса прочности $\approx 1,78$.

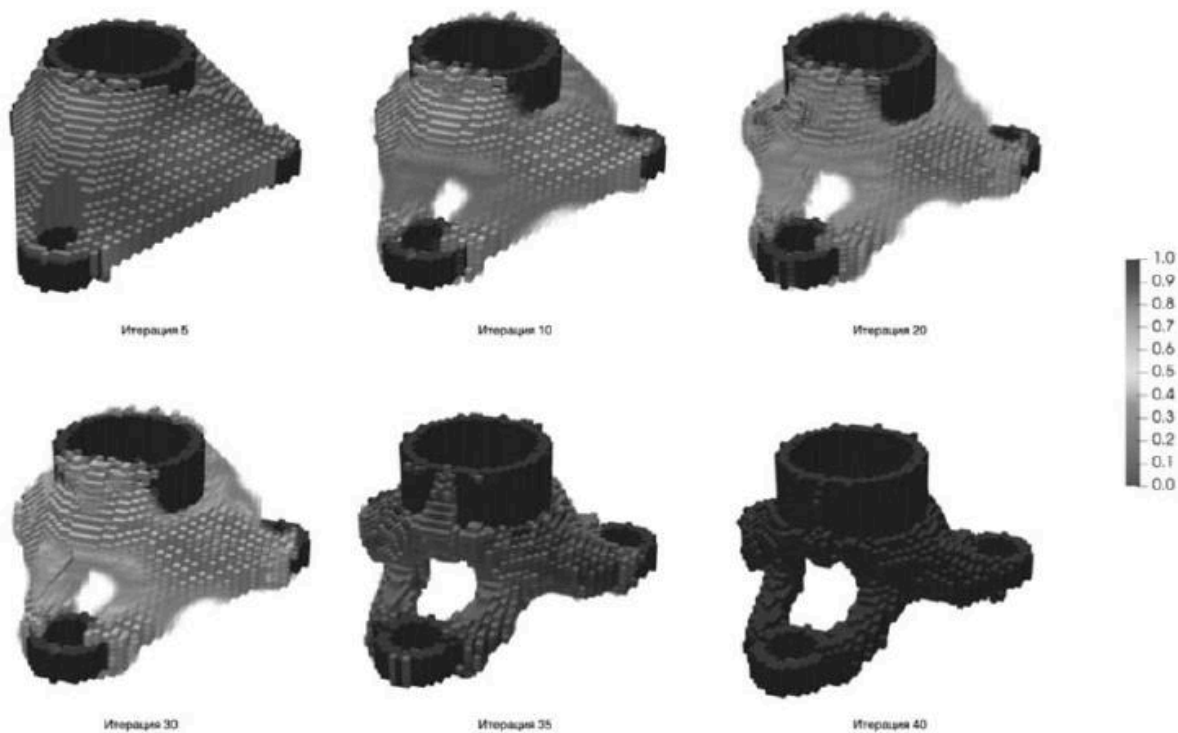


Рис. 3. Промежуточные результаты топологической оптимизации фланца

Заключительный этап алгоритма направлен на преобразование конечно-элементной сетки в технологически пригодную для производства форму. Для этого на основе воксельной структуры строится изоповерхность с применением алгоритма триангуляции Marching Cubes, реализованного с использованием библиотеки VTK [9]. Полученная триангулированная поверхность может служить основой для последующей геометрической доработки с использованием современных методов компьютерной графики и моделиро-

вания. В данной реализации применяется сглаживание поверхности с помощью метода Лапласа (Laplacian smoothing) [10].

Для дальнейшего использования сгенерированной конструкции в прикладных проектах необходимо обеспечить ее экспорт в формат, поддерживаемый большинством САПР. Как и в случае получения ограничивающей геометрии используется формат STEP. Поскольку итоговая 3D-модель объединяется с обязательной геометрией, сохраняются исходные геометрические ограничения. Это делает возможным включение конструкции в сборки с использованием типовых ограничений (соосность, параллельность и других связей).

Вычислительный эксперимент. Генеративные алгоритмы часто приводят к созданию конструкций с тонкими элементами, внутренними полостями, и многоуровневыми структурами, которые крайне сложно, а иногда и невозможно, произвести с использованием ЧПУ-обработки. Тем не менее, развитие современных технологий производства, включая 3D-печать, литье по выплавляемым моделям и лазерное спекание порошков, делает возможным изготовление конструкций с высокой геометрической сложностью, ранее недостижимых традиционными методами. Следует учитывать, что наибольшую эффективность алгоритмы генеративного проектирования демонстрируют в условиях, где минимизация массы критически влияет на эксплуатационные характеристики изделия и оправдывает усложнение геометрии и использование аддитивных технологий.

В рамках данного исследования с помощью разработанного модуля выполнена генерация конструкции квадрокоптера (рис. 4). Выбор квадрокоптера в качестве объекта моделирования является удачным примером применения алгоритма генеративного проектирования. Оптимизация формы изделия позволяет существенно снизить его массу, повысить энергоэффективность и увеличить продолжительность автономного полета.

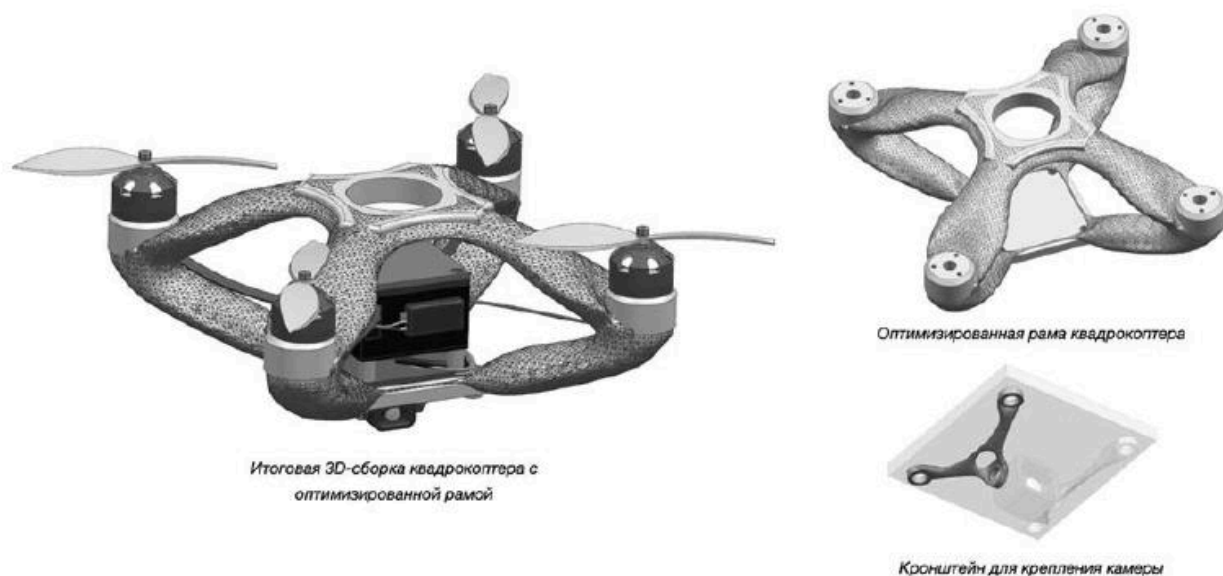


Рис. 4. Результат применения разработанного алгоритма для проектирования квадрокоптера

В рамках эксперимента спроектированы две детали: несущая рама и кронштейн крепления камеры. При этом сохранена исходная геометрия значимых областей — зон установки двигателей и центрального блока. Это обеспечило совместимость полученных моделей с остальными элементами сборки.

Заключение. В данной работе представлен алгоритм генеративного проектирования, реализованный на основе метода топологической оптимизации. Разработана математическая модель, обеспечивающая автоматическое формирование конструкций. На основе этой модели реализован программный модуль, представляющий собой автономный компонент, предназначенный для совместного использования с современными CAD/CAE-системами.

Особое внимание уделено обеспечению совместимости с промышленными инструментами проектирования: реализована поддержка экспорта результатов в формат STEP, что позволяет использовать полученные геометрии в сторонних САПР. Проведенные численные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного решения и его прикладную применимость.

Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований в области структурной оптимизации в САПР. В частности, перспективным направлением развития является расширение постановки задачи посредством включения дополнительных критериев оптимизации, позволяющих учитывать тепловые, аэродинамические и гидродинамические характеристики.

Литература

- [1] Guo Y., Wei D., Gang T., Lai X., Yang X., Xiao G., Chen L. Topology optimization for thermal structures considering design-dependent convection boundaries based on the bidirectional evolutionary structural optimization method. *Mechanical Sciences*, 2023, vol. 14, pp. 223–235.
- [2] Михайлова Е.А. Интеграция модуля параметрической оптимизации в FreeCAD. *Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП(М)-2024): материалы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, с. 106–111.
- [3] Regenwetter L., Nobari A.H., Ahmed F. Deep Generative Models in Engineering Design: A Review. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology. Arxiv:2110.10863v4, 2022.
- [4] Aman B. Generative Design for Performance Enhancement, Weight Reduction, and its Industrial Implications, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.14138>
- [5] Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 446 с.
- [6] Abdi M. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures using X-FEM and Isovalues of Structural Performance. Dr. Diss. University of Nottingham, 2015.
- [7] Barber C.B., Dobkin D.P., Huhdanpaa H. The Quickhull Algorithm for Convex Hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1996, vol. 22, no. 4, pp. 469–483.
- [8] Bendsoe M.P., Sigmund O. *Topology optimization: theory, methods and applications*. Springer, 2003.
- [9] Lorensen W.E., Cline H.E. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1987, vol. 21, no. 4, pp. 163–169.
- [10] Field D.A. Laplacian smoothing and Delaunay triangulations. *Communications in Applied Numerical Methods*, 1988, vol. 4, no. 6, pp. 709–712.

Development of a generative design software module based on topology optimization

Mikhailova Ekaterina Alexeevna

Volosatova Tamara Mikhailovna (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

This work introduces a generative design module developed as an autonomous software component for seamless integration with computer-aided design (CAD) environments. The module accepts input data such as boundary conditions, applied loads, geometric constraints, material properties, and optimization parameters. The generative process consists of three main stages: construction of the design domain based on geometric constraints; numerical solution of the topology optimization problem; and post-processing, including structural smoothing and triangulation of the resulting geometry. The resulting 3D model is compatible with CAD environments and can be imported for subsequent design modifications and refinement.

Keywords: CAD/CAE, generative design, structural optimization, topology optimization, additive manufacturing