

Алгоритмы генеративного моделирования в формообразовании промышленных изделий

М.П. Руденко, Д.Е. Звягинцев

Донецкий национальный технический университет
e-mail: m.p.rudenko@mail.ru, zvyaginsevdmitriy00@gmail.com

Аннотация

В статье приведен анализ алгоритмов генеративного моделирования в формообразовании промышленных изделий на примере работы методов оптимизации топологии и агентного моделирования. Определены преимущества и недостатки данных методов при исследовании следующих параметров: возможность автоматизации проектирования, многовариантность, проверка на прочность и устойчивость полученной модели, время генерации модели, а также необходимость дальнейшей доработки модели. Дальнейшей целью исследования является процесс совершенствования алгоритмов генеративного моделирования на основе полученных результатов.

Введение

На сегодняшний день возможности генеративного моделирования достаточно широки. Процесс автоматического проектирования модели в промышленном дизайне значительно упрощает работу дизайнерам в поиске новых форм, которые бы удовлетворяли эстетическим и эргономическим целям.

Генеративное моделирование ускоряет все этапы разработки продукта – от концептуального дизайна до производства. Используя цифровые инструменты, архитекторы и дизайнеры могут быстро генерировать геометрии с высокой сложностью, от органических деталей свободного потока до повторяющихся шаблонов с миллионами элементов. Поскольку технологичность модели можно указывать уже на ранних этапах процесса проектирования, вероятность того, что позже потребуются трудоемкие пересмотры, намного ниже. За счет этого снижаются трудо- и времязатраты на производство и выход на рынок.

Постановка задачи

Проведя анализ публикаций, можно сделать вывод, что алгоритмы генеративного моделирования активно используются в архитектуре и проектировании [1-4], а также в промышленном дизайне [5-7].

Генеративное моделирование в формообразовании промышленных изделий включает в себя следующие компоненты:

- формулировка проблемы (абстрагирование идеи);
- кодирование алгоритма решения

проблемы;

- запуск генерации проектных решений;
- оценка результатов генерации;
- получение конечного результата и завершение генерации.

Исходные данные имеют распределение: $p_data(x)$, а цель генератора – создать данные, соответствующие этому распределению. Генератор получает данные, а затем выводит их в распределении $p_data(x)$.

Далее дискриминатор определяет, какие изображения из исходного распределения $p_data(x)$, а какие – из генератора. Обе функции потерь зависят от производительности друг друга.

Генеративные модели, такие как вариационные автоэнкодеры (VAE) и генеративные состязательные сети (GAN) позволяют получать выходные данные более высокого разрешения и за счет кодирования в пространстве низкой размерности.

Однако есть ряд ограничений для использования в формообразовании генеративных моделей, а именно:

- генеративным моделям чаще всего необходимы конфиденциальные или труднодоступные данные;
- генеративные модели не гарантируют правдоподобного проектирования;
- генеративные модели страдают от коллапса режима – когда они выводят только один тип результата / имеют большой разброс в качестве вывода.

Совершенствование методов алгоритмической генерации описано в [8].

Структура генеративного моделирования показана на рисунке 1.

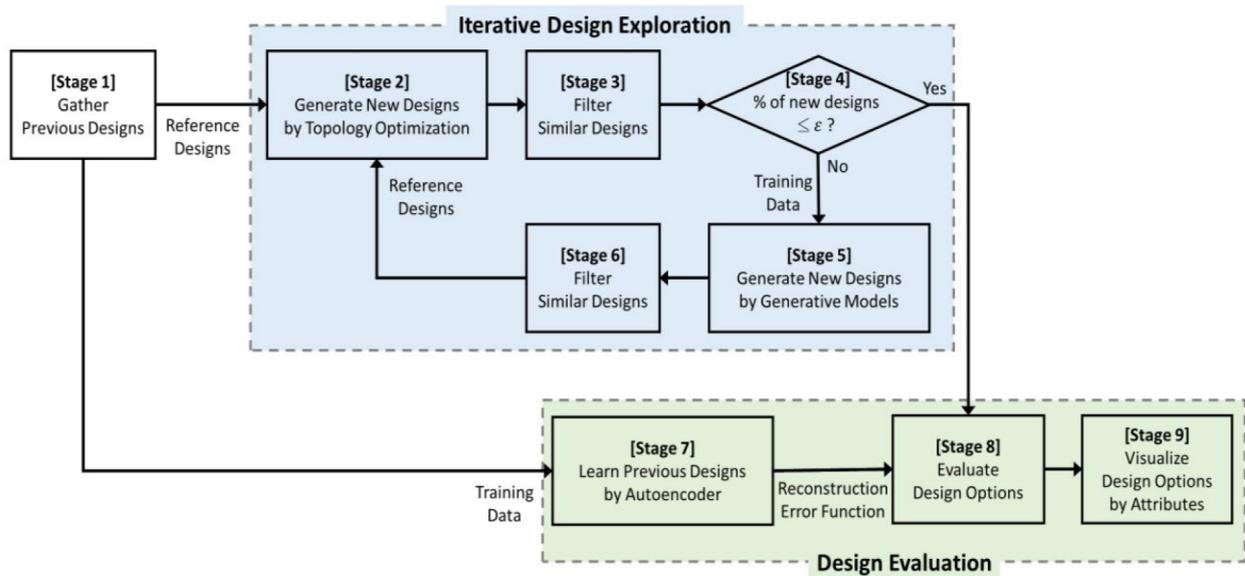


Рисунок 1 – Структура генеративного моделирования

Методы оптимизации топологии и агентного моделирования

В целях анализа алгоритмов генеративного моделирования при формообразовании промышленных изделий приведены два метода, наиболее часто используемых в среде архитектурного и дизайн проектирования [9].

Один из методов генеративного моделирования, который хорошо зарекомендовал себя в структурной оптимизации и используется для проектирования инженерных концепций, называется оптимизацией топологии [10]. При оптимизации топологии конструктор сначала определяет пространство проектирования, условия загрузки, цель оптимизации и другие нетехнические требования, такие как производственные ограничения. В результате модель имеет уменьшенный вес и высокую жесткость.

Кроме того, можно комбинировать оптимизацию топологии с другими методами генеративного проектирования. Следуя гибричному подходу, можно разработать, например, полые компоненты с переменной толщиной, которые имеют повышенную ударопрочность.

Действия, образованные несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами, формируют метод агентного моделирования [11]. Основная цель этого метода в промышленном формообразовании заключается в генерации оптимизированных структур на основе исходных параметров путем внедрения самоорганизующихся процессов.

Существует два вида агентного моделирования – стигмергические и роевые системы. Выбор зависит от исходного объекта, с

которого была списана модель поведения алгоритма [12]. Данный алгоритм значительно отличается от метода оптимизации топологии, так как на начальном этапе нет исходной геометрии.

Программная реализация метода оптимизации топологии

Реализация метода оптимизации топологии выполняется с помощью инструмента генеративного проектирования Fusion 360.

Для проведения эксперимента взята модель стула со следующими параметрами:

- высота – 900 мм;
- ширина – 500 мм;
- глубина – 980 мм.

Сам алгоритм генерации в Fusion 360 состоит из следующих этапов, изображенных на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема алгоритма генерации

Процесс генерации модели стула по заданным параметрам показан на рисунке 3.

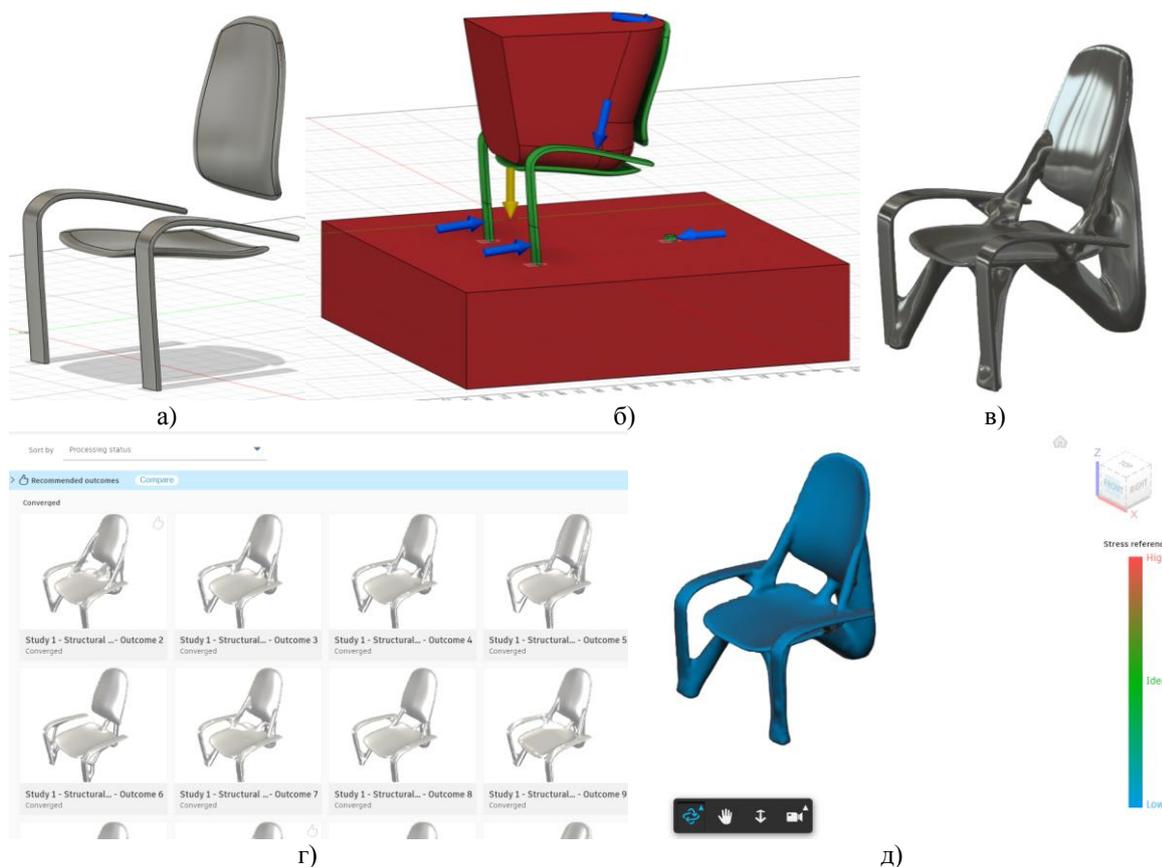


Рисунок 3 – Процесс генерации стула методом оптимизации топологии: а) обобщенная модель стула; б) задание ограничений для генерации; в) сгенерированная модель; г) варианты генераций; д) проверка модели на прочность

После создания обобщенной модели стула с необходимыми параметрами (рис. 3, а) необходимо задать ограничения, в рамках которых будет производиться генерация (рис. 3, б). Зеленым цветом указываются элементы, которые необходимо соединить между собой, ограничения указываются красным цветом. При помощи синих стрелок указываются направления нагрузки на модель и ее силу.

Далее выбирается материал из имеющихся, например, для этой модели подойдут пластик и алюминий. После всех указания всех ограничений запускается процесс генерации дизайна, который может занимать разное время в зависимости от сложности исходной модели.

При запуске генерации модели ожидаются следующие результаты:

- оптимизация материалов;
- легкость и прочность;
- эргономика;
- дизайн с учетом функциональности;
- эстетика и уникальность;
- быстрота и эффективность проектирования;
- инновации в конструкции.

Модель генерировалась 3 часа. В результате программа выдала 34 разных генерации, из которых выбирается одна, наиболее удачная (рис. 3, в). Вариант наиболее удачной модели стула по результатам генерации показан на рисунке 3, г. Модель сгенерировалась достаточно качественно, однако ее необходимо дорабатывать вручную, что тоже займет некоторое время.

После генерации даются результаты проверки модели на прочность в виде шкалы, где синий – модель прочная, красный – модель неустойчивая. Результаты данной модели находятся в пределах ограничений, что указывает на ее прочность (рис. 3, д).

Оптимизация модели в данной программе позволяет достичь оптимального сочетания легкости и прочности, что является ключевым аспектом в современном дизайне мебели. Благодаря легкости в использовании программы и широкому выбору генеративных моделей, дизайнеры получают возможность творчески выражаться и находить инновационные решения.

Следует отметить, что процесс не лишен определенных ограничений. Необходимость построения исходной модели ограничивает полную автоматизацию проектирования, а долгая генерация сложных элементов и

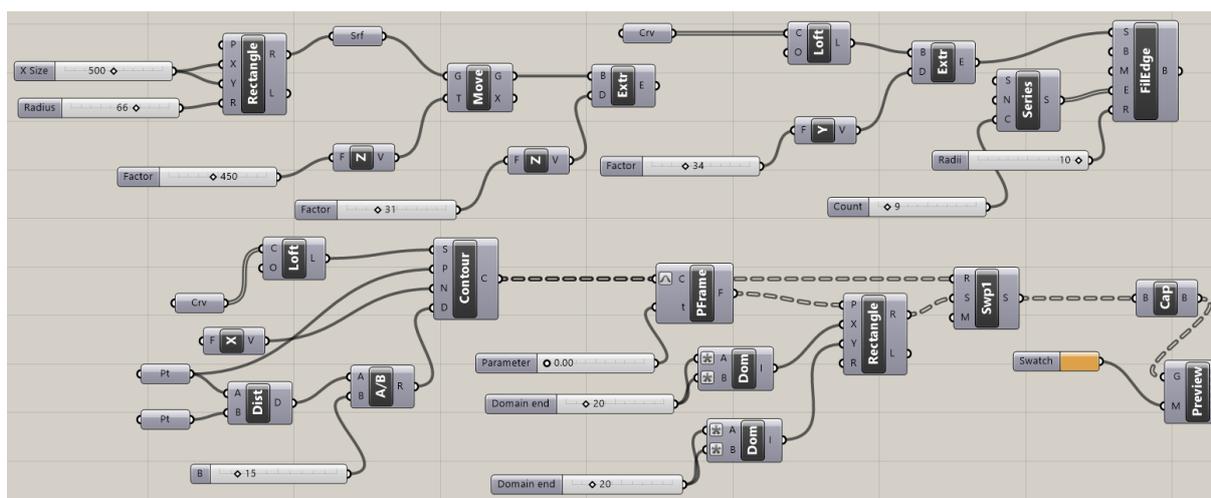
требование частичной доработки после генерации могут замедлить сам процесс проектирования.

Программная реализация метода агентного моделирования

Реализация метода агентного моделирования выполняется в программном продукте Rhino Grasshopper. Для проведения эксперимента, а также сравнения результатов выбирается модель стула с теми же параметрами и каркасом. Сам алгоритм генерации здесь отличается кардинально, так как построение

модели полностью управляется экспертом, а варианты генерации модели задаются изначально с помощью сценариев, созданных с применением визуального программирования.

Модель стула выглядит более обобщенно, так как для последующей генерации необходимы только общие параметры в виде каркаса. Однако для возможности редактирования в режиме реального времени она также программируется с помощью специальных узлов, позволяющих менять различные параметры модели, не нарушая общую геометрию. Процесс генерации модели стула показан на рисунке 4.



а)

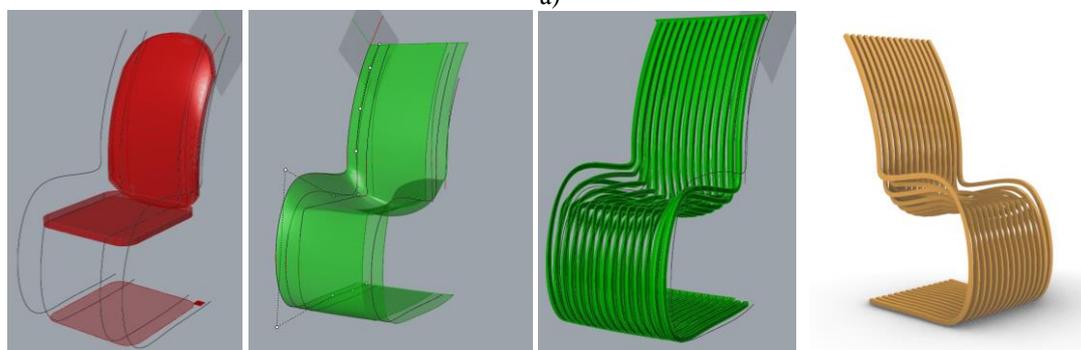


Рисунок 4 – Процесс генерации стула методом агентного моделирования: а) алгоритмы генерации модели; б) этап формирования общих элементов; в) этап лофтинга; г) этап конечного проектирования; д) визуализация модели

Процесс моделирования выполняется с помощью визуального программирования с применением специальных узлов (Рис. 4а). Эскизирование происходит перед началом генерации в программе, поэтому эксперт, начиная работу, уже знает, какой будет модель в конечном виде.

На примере одного из вариантов дизайна, показаны этапы его генерации от моделирования общих форм до конечной визуализации (Рис. 4б,в,г,д).

Анализируя алгоритм, показанный на рисунке 4, следует отметить основные параметры, влияющие на генерацию модели:

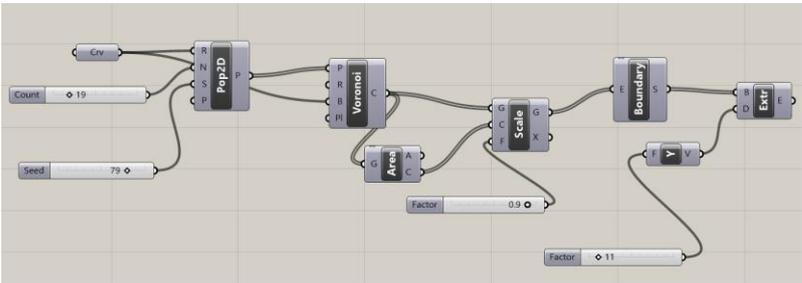
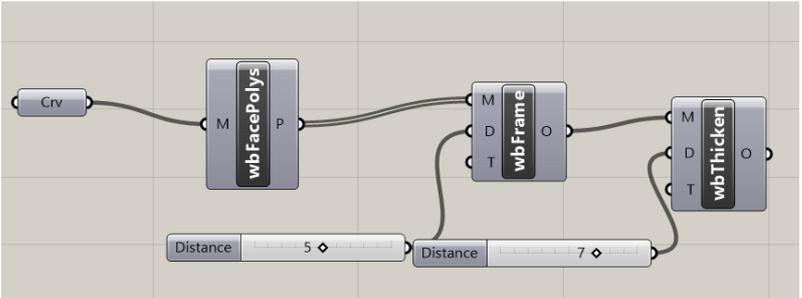
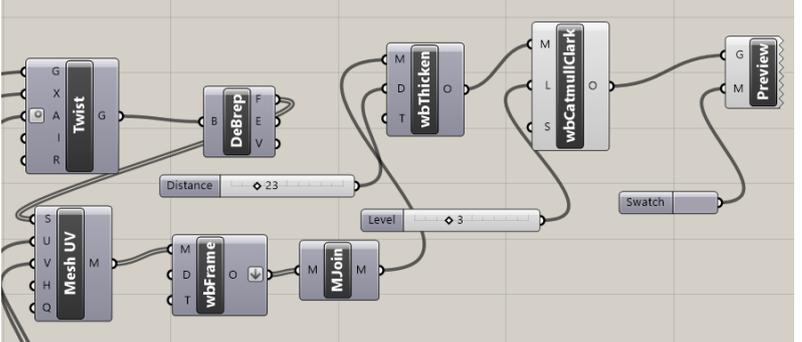
- Curve – управление и редактирование кривых;
- Contour – управление количеством планок на данной модели, а также исходных точек;
- Rectangle – управление формой контура;
- Preview – управление цветом и материалом модели.

При генерации модели с более сложной геометрией применяются плагины, позволяющие в режиме реального времени кардинально менять структуру, не нарушая при этом общую геометрию. Варианты дизайна создаются в виде алгоритмов, которые можно скрывать, при этом не создавая несколько копий одной и той же модели. Изменяющиеся параметры в алгоритмах визуального проектирования при помощи слайдеров значительно облегчают работу

эксперта, уменьшая его время на генерацию очередного варианта дизайна, а встроенные плагины дают возможность различных идей при формообразовании объекта.

Применение популярных плагинов при создании дизайна стула показано в таблице 1, где алгоритм 1 – Voronoi, алгоритм 2 – Weaverbird в нескольких модификациях (спинка и основание), алгоритм 3 – Weaverbird Plane.

Таблица 1. Алгоритмы при создании нескольких вариантов одной модели

№	АЛГОРИТМ	МОДЕЛЬ
1		
2		
3		

Проверка адекватности

В результате проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что метод оптимизации топологии и метод агентного моделирования кардинально отличаются как на начальных этапах генерации, так и в получении конечного результата.

Метод оптимизации топологии, реализованный в программе Fusion 360, на начальном этапе требует построения исходной обобщенной модели стула с указанием

необходимых параметров, а также ограничений, в границах которых будет производиться генерация модели. Конечный результат генерации выдает программа при помощи обученных нейронных сетей, который в дальнейшем необходимо редактировать. Варианты дизайна, предлагаемые программой, являются похожими и не особо отличающимися по геометрии, что не дает выбора эксперту для дальнейшей работы. Однако преимуществом программы является проверка сгенерированной модели на прочность.

Метод агентного моделирования, реализованный в программе Rhino Grasshopper, предполагает полное управление генерации экспертом, что исключает автоматизацию процесса. Однако, построение алгоритмов с параметрами, которые можно редактировать, включать/выключать и заменять в режиме

реального времени, не нарушая общей геометрии модели, на выходе дает законченную модель, готовую к производству.

Сравнение работы методов, а также характеристики получаемых моделей генерации показаны в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение методов оптимизации топологии и агентного моделирования при генерации модели

Основные характеристики	Метод оптимизации топологии (Fusion 360)	Метод агентного моделирования (Rhino Grasshopper)
Требования к исходной модели	Обобщенная модель с заданными параметрами и ограничениями	Эскиз будущей модели
Время генерации (час)	3	1 -2 на одну генерацию
Автоматизация процесса генерации	Есть	Нет
Количество сгенерированных моделей (шт)	20-30	Определяется экспертом
Варианты дизайна полученной модели	Однотипное стилевое решение	Разнообразные варианты
Дальнейшая доработка	Требуется	Не требуется
Проверка на прочность полученной модели	Встроена в программу	Отсутствует

Выводы

В ходе исследования методом экспериментального проектирования модели стула были проанализированы в работе метод оптимизации топологии и метод агентного моделирования. Определены преимущества и ограничения методов. Основными преимуществами метода оптимизации топологии являются автоматизация проектирования с помощью обученных нейросетей, многовариантность сгенерированных моделей, а также проверка на прочность и устойчивость полученной модели стула.

Среди недостатков следует отметить долгое время процесса генерации, метод «черного ящика» при получении моделей, ограниченность в стилевом решении дизайна модели, а также необходимость дальнейшей доработки модели. Преимуществом метода агентного моделирования является полное управление процессом генерации экспертом, качественная конечная модель, не требующая доработки, различные варианты дизайна. Из недостатков следует отметить полное отсутствие автоматизации генерации и невозможность проверки на прочность модели.

Дальнейшей целью исследования является процесс совершенствования алгоритмов

генеративного моделирования на основе полученных результатов.

Литература

1. Комарова, А. А. Образование архитектурной формы с применением алгоритмических методов /А. А. Комарова, С. В. Пыхтюк, Д. А. Чернышов, М. Е. Дымченко // Инженерный вестник Дона, 2019. - № 8 (59). – С. 9.
2. Салех, М. С. Внедрение цифровых методов на различных этапах цифрового проектирования / М. С. Салех // Архитектура и современные информационные технологии, 2021. - № 1 (54). – С. 268-278.
3. Бжахов, М. И. Алгоритмическое проектирование в архитектуре / М. И. Бжахов, М. М. Ефимова, А. В. Журтов // Инженерный вестник Дона, 2018. - № 2 (49). – С. 166.
4. Потапенко, А. А. Алгоритмическое проектирование как средство формирования аналитических и проектных моделей в архитектуре / А. А. Потапенко // Архитектура и дизайн: история, теория и инновации, 2021. - № 5. – С. 307-311.
5. Бессарабова, Е. В. Трехмерное моделирование промышленных и архитектурных объектов / Е. В. Бессарабова // Современные наукоемкие технологии, 2016. - № 4-2. – С. 225-229.

6. Chen, A. Forte: User-Driven Generative Design / A. Chen, Y. Tao, R. Kang, G. Wang, T. Grossman, S. Coros, S. E. Hudson // CHI 2018, April 21–26, 2018, Montréal, QC, Canada. – P. 496. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/324671677_Forte_User-Driven_Generative_Design.

7. Li, J. Robiot: A Design Tool for Actuating Everyday Objects with Automatically Generated 3D Printable Mechanisms / J. Li, J. Kim, X. Chen // UIST '19, Session 6A: Fabrication, October 20–23, 2019, New Orleans, LA, USA. – P. 673-685. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/2007.11199.pdf>.

8. Oh, S. Deep Generative Design: Integration of Topology Optimization and Generative Models / S. Oh, Y. Jung, S. Kim, I. Lee, N. Kang // Journal of Mechanical Design, 2019. - Vol. 141 (11). - P. 111405-1-13. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/334472895_Deep_Generative_Design_Integration_of_Topology_Optimization_and_Generative_Models/link/60269ee0a6fdcc37a8217a39/download.

9. Руденко, М. П. Методы генеративного моделирования в промышленном дизайне / М. П. Руденко, Д. Е. Звягинцев // Программная

инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПНИВС-2022): сборник научных трудов IV научно-практической конференции (студенческая секция), Том 2, 29-30 ноября 2022 г. – Донецк, ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2022. – С. 151-154.

10. Титова, М. А. Генеративный дизайн на основе оптимизации топологии с использованием глубокого обучения / М. А. Титова, А. Ю. Громов // Известия ТулГУ. Технические науки, 2022. – № 2. - С. 246-248.

11. Hattab M., Hamzeh F. Analyzing Design Workflow: An Agent-based Modeling Approach // Procedia Engineering, 2016. - Vol. 164. – P. 510-517. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/311360797_Analyzing_Design_Workflow_An_Agent-based_Modeling_Approach

12. Stieler, D. Agent-based modeling and simulation in architecture / D. Stieler, T. Schwinn, S. Leder, M. Maierhofer, F. Kannenberg, A. Menges. // Automation in Construction, 2022. - 141, 104426. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104426>

Руденко М.П., Звягинцев Д.Е. Алгоритмы генеративного моделирования в формообразовании промышленных изделий. В статье приведен анализ алгоритмов генеративного моделирования в формообразовании промышленных изделий на примере работы методов оптимизации топологии и агентного моделирования. Определены преимущества и недостатки данных методов при исследовании следующих параметров: возможность автоматизации проектирования, многовариантность, проверка на прочность и устойчивость полученной модели, время генерации модели, а также необходимость дальнейшей доработки модели. Дальнейшей целью исследования является процесс совершенствования алгоритмов генеративного моделирования на основе полученных результатов.

Ключевые слова: генеративное моделирование, промышленный дизайн, оптимизация топологии, агентное моделирование, визуальное программирование, алгоритмы.

Rudenko M.P., Zvyagintsev D.E. The generative modeling algorithms in the industrial products shaping. The article provides an analysis of generative modeling algorithms in the shaping of industrial products by the example of topology optimization methods and agent-based modeling. The advantages and disadvantages of these methods in the study of the following parameters are determined: the possibility of design automation, multivariance, testing for strength and stability of the resulting model, the time of model generation, as well as the need for further refinement of the model. The further purpose of the study is the process of improving generative modeling algorithms based on the results obtained.

Keywords: generative modeling, industrial design, topology optimization, agent-based modeling, visual programming, algorithms.

Статья поступила в редакцию 20.11.2023
Рекомендована к публикации доцентом Карабчевским В. В.