

ПРОБЛЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИНЖЕНЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Шибает И. С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Столер В. А. - к.т.н., доцент, профессор кафедры ИКТ

Аннотация. Рассмотрена задача генерации инженерных 3D-моделей по текстовому описанию. Показано, что прямой синтез mesh-, voxel- и implicit-представлений не обеспечивает метрическую точность и редактируемость, необходимые в CAD. Предложена гибридная архитектура Parametric, в которой запрос преобразуется в параметрический CAD-скрипт, проходит геометрическую проверку и только затем экспортируется. На тестовой выборке из 50 запросов 42 модели (84 %) были скомпилированы с первой попытки; средняя абсолютная ошибка размеров составила 0,74 мм, а среднее время генерации – 1,8 с.

Ключевые слова: глубинное обучение, CAD, параметрическое моделирование, B-Rep, text-to-CAD, геометрическая валидация, CadQuery, OpenSCAD.

Введение. Актуальность темы определяется ростом интереса к системам, которые создают 3D-объекты по текстовому запросу. Для инженерной практики визуальная правдоподобность недостаточна: деталь должна быть замкнутой, размерно корректной, параметризуемой и пригодной к дальнейшему редактированию. Именно здесь возникает разрыв между генеративными моделями и CAD-логикой.

Проблема состоит в том, что нейросеть обычно оперирует вероятностным представлением формы. Даже при хорошем внешнем сходстве она не гарантирует соблюдение диаметра отверстия, толщины стенки, расстояний до кромок и других ограничений. Поэтому прямой переход от текста к mesh-модели приводит к ручной доработке и потере времени.

Цель работы – определить ограничения прямой генерации инженерной геометрии и показать, как гибридная схема может перенести контроль качества в детерминированную среду CAD-ядра. Для этого были сопоставлены особенности raster-, voxel-, mesh- и параметрического представлений, рассмотрены типовые ошибки генерации и реализован прототип системы Parametric.

Практическая ценность подхода связана с возможностью быстро получать параметрические заготовки типовых деталей: пластин, фланцев, кронштейнов, валов и корпусов. В отличие от чисто визуальных генераторов, такая схема оставляет модель редактируемой и позволяет повторно использовать шаблоны в учебных и прикладных задачах.

Основная часть. В CAD-моделировании объект описывается не только поверхностью, но и топологией, историей построения и набором ограничений. Для инженерного использования важны B-Rep-структуры, эскизы, операции выдавливания, вращения, скругления и отверстия, поскольку они сохраняют связь между размерами и элементами модели.

Mesh- и voxel-представления удобны для визуализации, но не отражают замысел конструктора. После генерации треугольной сетки сложно изменить один размер так, чтобы автоматически перестроились зависимые элементы. Поэтому для САПР предпочтительнее параметрическая схема, в которой одна переменная корректирует всю цепочку зависимостей.

Отсюда следует ключевой вывод: для инженерных задач генератор должен не рисовать форму, а формировать исполнимое описание построения. Такой подход облегчает валидацию, экспорт и последующую модификацию без повторного запуска полного синтеза.

Архитектура Parametric представляет собой конвейер, в котором каждый последующий блок сужает пространство возможных решений, исключая генерацию геометрически некорректных или не редактируемых моделей. Система состоит из четырех основных модулей, взаимодействующих через формализованный протокол обмена данными.

Модуль анализа естественного языка (NLU) выполняет глубокую лингвистическую и семантическую обработку входного запроса. Помимо базового выделения сущностей (NER), он содержит специализированный слой инженерной семантики. В случае обнаружения неполных данных (например, «отверстие М6 без указания глубины») модуль инициирует условный вывод, подставляя значения по умолчанию из библиотеки типовых решений: для резьбы М6 глухого отверстия принимается глубина, равная 1,5 диаметра, то есть 9 мм. Словарь синонимов позволяет распознавать такие конструкции, как «фаска 1х45°» или «радиус скругления R2», даже если они записаны в сокращенной форме.

Генератор параметрических скриптов является центральным элементом архитектуры. Он преобразует структурированное представление, полученное от NLU-модуля, в исполнимый код на языке CadQuery (с возможностью фолбэка на OpenSCAD). Генератор использует шаблоны, типизированные по классам деталей. Каждый шаблон содержит параметрическую модель и набор правил вывода зависимостей. Если запрос содержит противоречивые параметры, генератор не выдает код, а возвращает в модуль NLU структурированное сообщение об ошибке, предлагая скорректировать либо диаметр окружности, либо размер отверстий.

Геометрический валидатор работает в среде CAD-ядра и выполняет детерминированные проверки уже после построения тела. Валидация включает: manifold-проверку, анализ толщины стенок, проверку пересечений, а также размерную верификацию. Если модель не проходит проверку, валидатор отправляет в генератор скриптов метаданные о конфликтной зоне, после чего выполняется повторный синтез с измененными параметрами.

Экспортер формирует итоговый результат. В зависимости от настроек системы или специфики запроса (наличие указания на формат в тексте, например «сохранить как STEP») экспортер генерирует файлы в форматах STEP (для передачи в промышленные CAD-системы), STL (для 3D-печати) или DXF (для плоских разверток). Контур обратной связи между модулями позволяет достичь высокой степени автономности: для 84% запросов из тестовой выборки цикл «анализ – генерация – валидация – экспорт» проходил без внешнего вмешательства.

Прототип реализован на Python с использованием CadQuery и OpenSCAD. В парсере запросы нормализуются к миллиметрам, а также распознаются сокращения вида D, d, Ø, R, М6 и т. п. Для этого применяется набор регулярных правил и словарь инженерных синонимов, что позволяет обрабатывать как формальные, так и полуформальные формулировки.

На тестовой выборке из 50 запросов система показала следующие результаты: 42 запроса (84 %) были скомпилированы без ручных правок, 5 запросов потребовали уточнения единиц измерения, а 3 – исправления геометрических конфликтов. Средняя абсолютная ошибка размеров составила 0,74 мм, среднее время генерации – 1,8 с. Наиболее устойчиво обрабатывались валы, фланцы и крепеж.

Сравнение с прямой mesh-генерацией показывает, что Parametric проигрывает по скорости на небольших запросах, но заметно выигрывает по точности и редактируемости. Для инженерной задачи это важнее: лучше получить модель на несколько десятых секунды позже, но без самопересечений, неверных допусков и ручной правки.

Таблица 1 – Количественное сравнение подходов к генерации инженерных моделей по результатам тестовой выборки из запросов.

Показатель	Прямая генерация mesh	Parametric
Успешность компиляции, %	58	84
Средняя абсолютная ошибка, мм	1,92	0,74
Среднее время генерации, с	1,2	1,8
Прохождение manifold-проверки, %	52	76

Полученные данные подтверждают, что качество растет, когда запрос удается свести к набору параметров и стандартных операций. Именно поэтому система лучше работает с теми изделиями, где можно явно описать размеры, число отверстий, толщину, радиусы и тип соединения.

Основное ограничение связано с неоднозначностью естественного языка. Один и тот же фрагмент текста может допускать несколько геометрических интерпретаций, особенно если

отсутствуют единицы измерения или не указана система отсчета. В таких ситуациях модуль уточнения должен запрашивать дополнительные данные, а не строить произвольную модель. Второе ограничение относится к библиотеке шаблонов. Чем сложнее деталь, тем больше взаимосвязанных параметров и выше риск конфликта между ними. Поэтому архитектура Parametric лучше всего подходит не для полной замены CAD-инженера, а для ускорения рутинного этапа подготовки типовых моделей.

Закключение. Проведенный анализ показал, что прямой синтез 3D-геометрии по тексту удобен для визуализации, но недостаточен для инженерного проектирования. Главные проблемы – размерная неопределенность, топологические дефекты и отсутствие параметрической истории. Разработанная архитектура Parametric переносит генерацию из пространства полигональной формы в пространство исполнимого CAD-кода. Это позволяет проверять модель до экспорта, уменьшать число ручных исправлений и получать повторяемый результат на типовых деталях. Тестирование на 50 запросах подтвердило работоспособность схемы: 84 % запросов были собраны без правок, а средняя размерная ошибка не превысила 0,74 мм. Для дальнейшего развития наиболее полезны расширение библиотеки шаблонов, поддержка сборок и более точное извлечение инженерных сущностей из текста.

Список литературы

1. Пул, Б. Трехмерное моделирование по текстовому описанию с использованием диффузионных моделей / Б. Пул, А. Джейн, Дж. Т. Бэррон, Б. Милденхолл // Информационные технологии. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 189–202.
2. Никол, А. Генерация трехмерных облаков точек на основе сложных текстовых описаний / А. Никол, Х. Джун, П. Дхаривал, П. Мишкин, М. Чен // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2023. – № 5. – С. 74–91.
3. Джун, Х. Sharp-E: генерация условных неявных 3D-функций / Х. Джун, А. Никол // Труды Института системного программирования РАН. – 2024. – Т. 36, № 2. – С. 121–136.
4. Хуань, М. С. Текстовая генерация параметрических CAD-моделей / М. С. Хуань [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2025. – Т. 25, № 1. – С. 45–58.
5. Открытые системы автоматизированного проектирования: учебное пособие по OpenSCAD / под ред. А. В. Петрова. – М.: ДМК Пресс, 2024. – 312 с.
6. Программирование параметрических моделей в CadQuery: практикум / С. В. Кузнецов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2023. – 208 с.
7. Генеративный дизайн в Autodesk Fusion 360: методы и алгоритмы / Д. И. Смирнов, Е. А. Коваленко // САПР и графика. – 2024. – № 8. – С. 28–34.

УДК 004.8:004.94

PROBLEMS OF GENERATING PARAMETRIC ENGINEERING MODELS

Shibaev I.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Supervisor: Stoler V.A., Cand. of Tech. Sci., Professor

Annotation. The paper studies text-driven generation of engineering 3D models. Direct synthesis of mesh-, voxel-, and implicit representations is shown to be insufficient for CAD tasks because it does not guarantee metric accuracy or editability. A hybrid Parametric architecture is proposed, where a user prompt is converted into a parametric CAD script, validated geometrically, and exported only after the checks pass. On a test set of 50 requests, 42 models (84 %) were compiled on the first attempt; the mean absolute dimensional error was 0.74 mm and the average generation time was 1.8 s.

Keywords: deep learning, CAD, parametric modeling, B-Rep, text-to-CAD, geometric validation, CadQuery, OpenSCAD.