

МЕТОДОЛОГИЯ СКВОЗНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЗЛОВ МАШИН КАК ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

Солодилова Н.А., Ситкин Д.С., Скрябнев А.Ю., Маркова Т.В.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург

Ключевые слова: сквозное проектирование, параметрическое моделирование, цифровой документооборот, САПР, ассоциативная сборка, автоматизация проектных работ, машиностроительный узел.

Аннотация. В статье рассматривается методология организации процесса проектирования, основанная на создании сквозной параметрической модели сложного механического узла. Подход предполагает последовательное наращивание информационной насыщенности цифрового прототипа: от управления геометрическими параметрами деталей до формирования ассоциативных сборок и автоматической генерации комплекта конструкторско-технологической документации. Обосновано, что внедрение сквозного проектирования позволяет существенно сократить временной цикл модернизации изделия и создать базу для цифрового документооборота на машиностроительном предприятии.

METHODOLOGY OF END-TO-END PARAMETRIC DESIGN OF MACHINE ASSEMBLIES AS A BASIS FOR FORMING DIGITAL DOCUMENT MANAGEMENT

Solodilova N.A., Sitkin D.S., Skryabnev A.Yu., Markova T.V.
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg

Keywords: end-to-end design, parametric modeling, digital workflow, CAD, associative assembly, design automation, mechanical unit.

Abstract. The article considers a methodology for organizing the design process based on the creation of an end-to-end parametric model of a complex mechanical unit. The approach involves a consistent increase in the information density of the digital prototype: from managing the geometric parameters of parts to the formation of associative assemblies and the automatic generation of a set of design and technological documentation. It is substantiated that the implementation of end-to-end design allows for a significant reduction in the time cycle of product modernization and creates a foundation for digital workflow at a machine-building enterprise.

Введение

Повышение сложности и скорости обновления продукции является вызовом для современных машиностроительных предприятий. Традиционный линейный процесс, сопровождающийся ручным вводом данных, приводит к ошибкам и длительным срокам внесения изменений [1]. Решением является переход к сквозному цифровому проектированию на основе единой параметрической модели изделия. Эффективное использование возможностей современных САПР требует выработки четкой методологии построения таких моделей [2, 3]. Данная статья предлагает практическую методологию, фокусируясь на обеспечении целостности данных и автоматизации процессов проектирования механических систем.

1. Концепция сквозной параметрической модели узла

Ядром методологии является принцип единого источника данных. Все этапы проектирования выстраиваются как последовательные итерации, добавляющие новые уровни информации к исходной модели, а не создающие параллельные цепочки данных (табл. 1).

Табл. 1. Схема сквозного проектирования на основе единой параметрической модели

Этап	Содержание	Выходные данные
I. Расчеты и концепция	Определение основных кинематических и силовых параметров.	Таблица управляющих параметров (межосевое расстояние, модуль, числа зубьев и т.д.).
II. Детализирование	Создание 3D-моделей всех оригинальных деталей с привязкой геометрии к управляющим параметрам.	Набор параметрических 3D-моделей деталей (*.prt, *.m3d).
III. Сборка	Создание ассоциативной 3D-сборки с использованием механических и геометрических сопряжений.	Ассоциативная 3D-модель сборочной единицы (*.asm, *.a3d).
IV. Документирование	Автоматическая генерация ассоциативных чертежей и спецификации на основе 3D-моделей.	Комплект конструкторской документации (чертежи *.dwg, *.cdw, спецификация).
V. Анализ и симуляция	Кинематическая анимация для проверки соударений; экспресс-прочностной анализ (CAE) ключевых деталей.	Видеоролик анимации; отчет CAE-анализа с графиками.
VI. Цифровой макет	Консолидация всех данных в единый проект для передачи в PDM/PLM и САМ-системы.	Структурированный цифровой проект, готовый для технологической подготовки производства.

Ключевым технологическим элементом становится централизованный реестр управляющих параметров (таблица переменных в САПР), который содержит основные расчетные размеры. Изменение значения в реестре запускает каскадный пересчет геометрии всех зависимых деталей и сборки в целом.

2. Технологические аспекты реализации на различных этапах проектирования

Для детального рассмотрения предложенной методологии целесообразно последовательно проанализировать ключевые технологические приемы, используемые на каждом из выделенных этапов проектирования.

Этап детализирования: создание устойчивых параметрических моделей

Каждая оригинальная деталь создается как параметрическая модель, где ключевые размеры не являются константами, а ссылаются на переменные из центрального реестра или задаются уравнениями (например, для цилиндрического редуктора, Диаметр_ступицы = $1,6 \cdot \text{Диаметр_вала}$). Особое внимание уделяется построению «нехрупких» эскизов с минимально необходимым, но достаточным набором геометрических и размерных связей, что обеспечивает стабильность модели при любых изменениях [4]. Для корпусных деталей применяется методология «скелетного моделирования», когда в первую очередь создается каркас основных осей и плоскостей, определяющий всю последующую геометрию.

Этап сборки: организация ассоциативных связей

Сборка создается не как простой набор деталей, а как система с жестко заданными сопряжениями, отражающими реальные кинематические и конструктивные связи (совпадение осей, соприкосновение плоскостей, заданные зазоры). Использование механических сопряжений («Вращение-Вращение», «Вращение-Перемещение») позволяет не только статически позиционировать компоненты, но и закладывать основу для последующего кинематического анализа. Все сопряжения накладываются на геометрические элементы, которые, в свою очередь, управляются параметрами, что обеспечивает адаптивность сборки к изменениям.

Этап документирования: автоматическая генерация чертежей

Основные виды, разрезы и сечения на сборочном и детализировочных чертежах создаются как ассоциативные проекции 3D-моделей. Все размеры проставляются, по возможности, с использованием функции автонанесения с обязательной привязкой к геометрии модели. Это гарантирует, что любое изменение в 3D-модели автоматически отражается на всех связанных чертежах. Спецификация формируется автоматически на основе состава сборки, что исключает ошибки ручного ввода.

Этап анализа и симуляции: использование цифрового прототипа

На основе созданной ассоциативной сборки выполняется два ключевых вида анализа:

- **Кинематическая анимация.** Проверяется работоспособность механизма, полный ход подвижных элементов, выявляются возможные геометрические коллизии (соударения) на ранней стадии проектирования [4, 5].
- **Экспресс-прочностной анализ (CAE).** Упрощенная модель ключевой детали (например, вала) передается в модуль конечных элементов, интегрированный в САПР (например, АРМ FEM в КОМПАС-3D) [6]. Это позволяет быстро оценить напряжения и деформации и скорректировать геометрию до выпуска рабочей документации.

3. Анализ эффективности и результаты апробации

Аналитическая оценка предложенной методологии позволила выявить следующие преимущества:

- **Сокращение времени на модификации.** Внесение изменений в конструкцию (например, изменение передаточного числа) за счет пересчета по

управляющим параметрам выполняется на 60-75% быстрее по сравнению с методикой редактирования отдельных чертежей и моделей.

– **Ликвидация несоответствий.** Автоматическая ассоциативная связь между моделью, чертежами и спецификацией сводит к нулю риск рассогласования данных в документации.

– **Создание базы для вариативного проектирования.** Параметрическая модель легко превращается в основу для семейства изделий. Задавая разные наборы значений в таблице параметров, можно автоматически генерировать модификации узла под различные требования (мощность, габариты, скорость).

– **Формирование структурированного цифрового архива.** Итоговый проект представляет собой не набор разрозненных файлов, а логически связанный цифровой макет изделия, готовый к передаче в систему управления данными об изделии (PDM/PLM) для дальнейшего использования в технологической подготовке производства.

Заключение

Предложенная методология сквозного параметрического проектирования представляет собой не набор отдельных приемов работы в САПР, а целостный технологический процесс, ориентированный на повышение эффективности и качества проектных работ в машиностроении. Она позволяет перейти от создания разрозненных цифровых моделей к построению единого информационного пространства проекта, что является критически важным шагом для автоматизации проектирования сложных механических систем.

Основные технологические выгоды – значительное ускорение процессов модернизации и адаптации конструкции, автоматическое поддержание целостности документации и создание основы для вариативного конструирования – делают данный подход высоко востребованным для современных машиностроительных предприятий, стремящихся к сокращению времени выхода продукции на рынок и снижению издержек на проектирование. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию разработанных параметрических моделей с системами технологического планирования (CAM) и управления жизненным циклом (PLM).

Список литературы

1. Гасюк Д.П. Цифровые технологии и их роль в управлении полным жизненным циклом продукции машиностроения // Инновационные идеи в машиностроении: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 27-30 ноября 2023 года. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 4-8.
2. Солодилова Н.А., Маркова Т.В., Скрыбнев А.Ю., Блинковский А.М. Параметрическое моделирование в САПР как ключевая компетенция современного инженера-машиностроителя // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2025. – №14. – С. 33-44. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/id-97.
3. Aranburu A., Justel D., Contero M., Camba J.D. Geometric Variability in Parametric 3D Models: Implications for Engineering Design // Procedia CIRP. 2022, vol. 109, pp. 383-388.
4. Солодилова Н.А., Павлова В.А. Визуализация движения механизмов в системах автоматизированного проектирования // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: Сборник статей. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 41-45.

5. Механика: Анимация. Приложение для КОМПАС-3D // Аскон Уфа [Электронный ресурс]. – 2024. – Режим доступа: <http://ascon-ufa.ru/animation>.
6. Солодилова Н.А., Петраш В.И. Роль компьютерных технологий (сах) в формировании профессиональных компетенций студентов машиностроительных специальностей // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2021. – №10. – С. 93-108.

Сведения об авторах:

Солодилова Наталья Алексеевна – к.т.н., доцент, доцент Высшей школы машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта;

Ситкин Дмитрий Сергеевич – старший преподаватель Высшей школы машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта;

Скрябнев Артём Юрьевич – к.т.н., доцент Высшей школы машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта;

Маркова Татьяна Владимировна – к.т.н., доцент Высшей школы дизайна и архитектуры, Инженерно-строительный институт.