

УДК 621.01

doi:10.18720/SPBPU/2/id-97

Н.А. Солодилова¹, Т. В. Маркова², А.Ю. Скрыбнев³, А.М.Блинковский⁴

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В САПР КАК КЛЮЧЕВАЯ КОМПЕТЕНЦИЯ СОВРЕМЕННОГО ИНЖЕНЕРА-МАШИНОСТРОИТЕЛЯ



¹Наталья Алексеевна Солодилова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-95-64, E-mail: solodilova_na@spbstu.ru



²Татьяна Владимировна Маркова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-75-14, E-mail: markova_tv@spbstu.ru



³Артём Юрьевич Скрыбнев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-95-64, E-mail: scarts@mail.ru



⁴Анатолий Михайлович Блинковский,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-95-64, E-mail: blinkovskij_am@spbstu.ru

Аннотация

В работе исследуется роль параметрического моделирования в машиностроении. Анализ современных трендов и требований рынка подтверждает растущую значимость параметризации. Рассмотрено ключевое значение этого подхода в проектировании, а также вопросы подготовки специалистов. Отмечены существующие проблемы внедрения и предложены пути их решения через модернизацию образовательного процесса.

Ключевые слова: параметрическое моделирование, инженерное проектирование, профессиональные компетенции, САПР, инженерная геометрия и компьютерная графика, машиностроение, инженерное образование.

Введение

Современная машиностроительная отрасль переживает период глубокой технологической трансформации, связанной с процессами цифровизации производства. В условиях глобальной конкуренции и сокращения жизненных циклов изделий традиционные подходы к инженерному проектированию претерпевают существенные изменения, требуя от специалистов освоения новых инструментов и методов работы. Одним из наиболее значимых аспектов этой трансформации стало повсеместное внедрение параметрического моделирования в системах автоматизированного проектирования (САПР), которое из вспомогательного инструмента превратилось в ключевую компетенцию современного инженера-машиностроителя.

Преимущества и эффективность параметрического подхода определяются гибкостью разрабатываемых моделей. В отличие от традиционных, параметрические модели представляют собой систему взаимосвязанных элементов, и благодаря математическим зависимостям между ними автоматически обновляются при изменении конструкции, не требуя ручной корректировки. Это ускоряет проектирование, упрощает тестирование вариантов и оптимизацию конструкций под производственные задачи.

Особое значение параметрическое моделирование приобретает в контексте подготовки инженерных кадров. Современные образовательные стандарты в области машиностроительного образования все больше смещаются в сторону формирования у студентов не только теоретических знаний, но и практических навыков работы с передовыми инструментами цифрового проектирования. В этой связи анализ роли и места параметрического моделирования в учебном процессе представляет собой важную и актуальную задачу.

Методы исследования

Для всестороннего изучения роли параметрического моделирования в современном машиностроении было проведено комплексное исследование, включающее несколько взаимодополняющих методических подходов. Основу методологической базы составил системный анализ, позволивший рассмотреть параметрическое моделирование как целостную систему взаимосвязанных элементов.

Для оценки востребованности навыков параметрического моделирования на рынке труда был проведен контент-анализ более 200 вакансий для инженеров-конструкторов, опубликованных за последние два года [1, 2] предприятиями Северо-Западного региона России. Анализировалось не только формальное наличие требований к владению инструментами параметризации, но и степень детализации этих требований.

Научная составляющая исследования базировалась на анализе современных публикаций в рецензируемых научных журналах и материалах международных конференций по тематике параметрического моделирования и смежным направлениям [3–9]. Особое внимание уделялось работам, опубликованным за последние пять лет, что позволило выявить актуальные тенденции в развитии этой технологии [3, 4, 10–13].

Дополнительным источником данных стали интервью с экспертами — специалистами машиностроительных предприятий и преподавателями технических вузов. Кроме того, проведен анализ учебных программ дисциплин, изучаемых студентами различных направлений подготовки Института металлургии, машиностроения и транспорта (ИММиТ) на предмет включения в них технологий параметрического моделирования.

Обсуждение результатов

Результаты проведенного исследования позволяют сделать ряд выводов о современном состоянии и перспективах развития параметрического моделирования в машиностроении и образовании. Прежде всего, следует отметить, что параметрический подход к проектированию из узкоспециализированного инструмента постепенно превращается в базовую технологию современного машиностроения. Это подтверждается как анализом требований работодателей, так и тенденциями развития САПР-систем, в которых параметрические возможности занимают все более важное место.

Анализ вакансий показал, что 87% объявлений для инженеров-конструкторов в Северо-Западном регионе содержат явные требования к владению параметрическим моделированием. При этом в 15% случаев эти требования конкретизированы и включают указание на необходимость умения создавать параметрические зависимости, использовать уравнения и таблицы параметров. Особенно показательно, что в вакансиях с более высокой заработной платой (от 120 тыс. руб.) требования к навыкам параметрического моделирования формулируются более детально.

Практические эксперименты по сравнению эффективности параметрического и традиционного подходов дают однозначные результаты. В среднем, использование грамотно построенных параметрических моделей позволяет сократить время на внесение типовых изменений в проект на 65–75%. При этом качество проектных решений

(оцениваемое по количеству выявляемых на последующих этапах ошибок) повышается на 40–50%. Особенно значительный выигрыш параметрический подход демонстрирует при работе над семействами однотипных изделий и при выполнении итерационных расчетов [3, 14–16].

Однако, как показывают экспертные оценки, внедрение новых технологий в промышленности сталкивается с рядом проблем, связанных, в основном, со сложностью интеграции в существующие системы управления данными, сопротивлением опытных конструкторов, привыкших к традиционным методам, и нехваткой специалистов, действительно глубоко понимающих принципы параметризации, а не просто умеющих работать с конкретными САПР.

Одну из причин трудностей выявил анализ действующих образовательных программ бакалавров-машиностроителей: параметрическому моделированию в учебном процессе уделяется лишь фрагментарное внимание. Знакомство с САПР начинается во втором семестре в рамках курса инженерной графики, однако изучаются при этом, в основном, инструменты плоского черчения. Работа с трёхмерными моделями и параметризацией рассматривается в отдельных группах. Студенты выполняют комплекс упражнений, тематически согласованных с теоретической частью курса, что помогает ее освоению и позволяет поэтапно изучать возможности системы проектирования [17]. В конце первого семестра, в рамках расчетно-графической работы по начертательной геометрии, студенты разрабатывают свою первую параметрическую модель (рис. 1), налагая связи и устанавливая зависимости между геометрическими параметрами объекта, во втором семестре — на основе 3D-моделей формируют комплект конструкторских документов (КД) на сборочную единицу, приближенную к реальному техническому объекту. На занятиях акцентируется внимание на том, что эскизы для формообразующих операций должны быть определены, рассматриваются возможности управления степенями свободы точек. Ставится задача исследовательского характера: в процессе параметризации эскиза выявить минимальное, но достаточное для изготовления количество размеров, которые следует нанести на чертеже детали (рис. 2).

Эффективность параметризации показал опыт ее применения при решении задач по начертательной геометрии, в частности задач интернет-олимпиады. Требуемая при этом точность ответов недостижима без использования компьютерных средств построений, и наиболее удобным инструментом, позволяющим не только задать условие и найти решение, но и исследовать задачу на предмет полноты условия и возможности множества решений, стала параметризация.

Заметим, что студенты, владеющие инструментами параметризации, с успехом используют ее при решении задач и выполнении расчетно-графических и курсовых работ по целому ряду дисциплин, причем

используют не только при разработке 3D-моделей. Большинство заданий курсов «Детали машин», «Теория механизмов и машин», «Метрология» и других подразумевает работу с плоскими изображениями, которые могут быть построены точнее, проще и быстрее с помощью параметризации. Пример модели пространственного пятизвенного кривошипно-коромыслового механизма, позволяющей, благодаря наложенным зависимостям, выполнять исследования кинематики, рассмотрен в статье [18]. Опытные студенты понимают преимущества такого подхода, и на вопрос «нужна ли параметризация и где она нужна?» уверенно отвечают: «Параметризация нужна «всегда, когда надо что-то начертить», «это самый быстрый и правильный способ, если с ним хорошо освоиться».

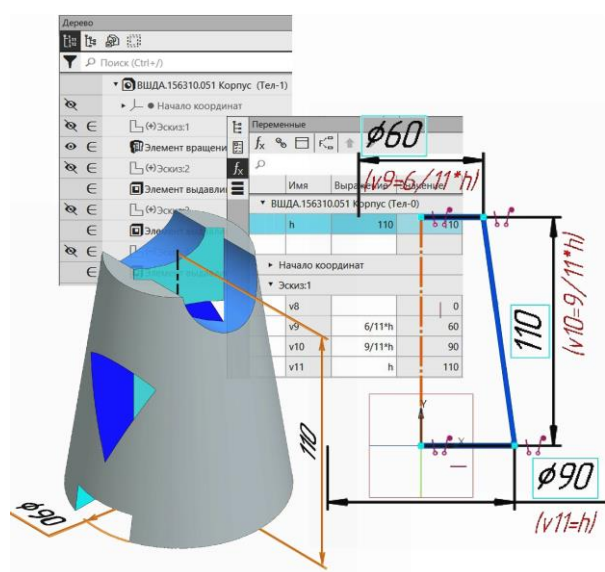


Рис. 1. Первое упражнение с использованием параметризации

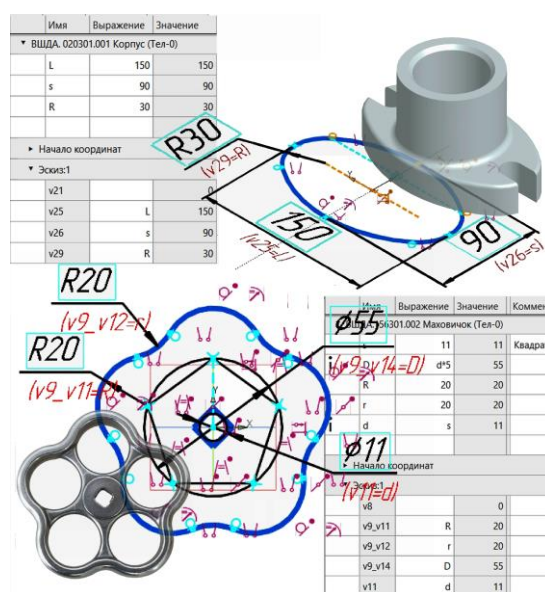


Рис. 2. Параметризация и размеры на чертеже. Исследование

Следует отметить, что пространственные параметрические модели позволяют проводить не только геометрические, но и силовые расчеты, тестирование прочности, тепловых или аэродинамических характеристик объектов при изменении состояния, генерировать модели с заданным набором параметров и механизмы, где параметры влияют на взаимодействие компонентов и т. д., но знакомство с этими инструментами, как правило, происходит гораздо позже и в соответствии с выбранной специализацией.

Таким образом, параметрическое моделирование — одна из наиболее востребованных общеобразовательных и профессиональных компетенций. Однако, на текущий момент единственной дисциплиной для большинства студентов машиностроительного профиля, где системно изучаются методы параметризации, остается курс "САПР в машиностроении" [19, 20].

В структуре лекционного курса технологии параметрического моделирования занимают важное место, формируя методологическую основу для современных подходов к компьютерному проектированию. Теоретический блок, посвященный параметризации, предусматривает детальное рассмотрение различных видов параметрических зависимостей:

- табличную параметризацию, основанную на использовании таблиц параметров и уравнений, обеспечивающую четкую структуризацию данных проектирования. Рассматриваются методики создания и управления параметрическими таблицами, включая особенности их интеграции в проектные процессы;

- вариационную параметризацию, как инструмент создания адаптивных моделей, способных автоматически изменять свою структуру в зависимости от заданных условий. Разбираются принципы построения вариационных зависимостей и их влияние на гибкость проектных решений;

- иерархическую параметризацию, позволяющую эффективно управлять сложными многокомпонентными системами. Подробно рассматриваются методы организации иерархических структур параметров, обеспечивающие логичную взаимосвязь между отдельными элементами проекта;

- геометрическую параметризацию — с точки зрения создания устойчивых геометрических зависимостей, формирующих основу для построения корректных и легко модифицируемых моделей.

Анализ параметрического и прямого моделирования (direct modeling) на примерах машиностроения показывает ключевые преимущества параметризации: автоматическое обновление моделей, удобство итераций и оптимизации, эффективность для однотипных изделий. Однако отмечаются и её недостатки: высокие требования к навыкам проектировщиков, необходимость продумывать структуру модели заранее и сложности при работе с заимствованной геометрией.

Теоретические положения курса иллюстрируются примерами из практики ведущих машиностроительных предприятий, демонстрирующими эффективность параметрического проектирования типовых узлов. Особое внимание уделяется анализу реальных кейсов, где использование параметризации позволило существенно сократить сроки проектирования и повысить качество конструкторских решений.

В практической части курса значительное время отводится на освоение методики наложения связей и ограничений, где последовательно рассматриваются особенности работы с параметрическими зависимостями на разных уровнях проектирования.

В контексте работы с фрагментами и эскизами детально разбираются типы геометрических и размерных зависимостей, их влияние на поведение модели при изменениях. При изучении моделирования деталей акцент

делается на установлении межэлементных связей, обеспечивающих целостность конструкции при модификациях (рис. 3).

В разделе, посвященном сборкам, подробно анализируются методы создания параметрических взаимозависимостей между компонентами, включая особенности управления позиционированием и сопряжением деталей. Для студентов, демонстрирующих высокий уровень освоения материала, предусмотрена возможность выполнения заданий повышенной сложности, позволяющих глубже изучить принципы параметрического моделирования (рис. 4). Подобные задания не только способствуют формированию у студентов продвинутых навыков работы с инструментами САПР, но и развивают системное инженерное мышление, необходимое для решения сложных производственных задач.

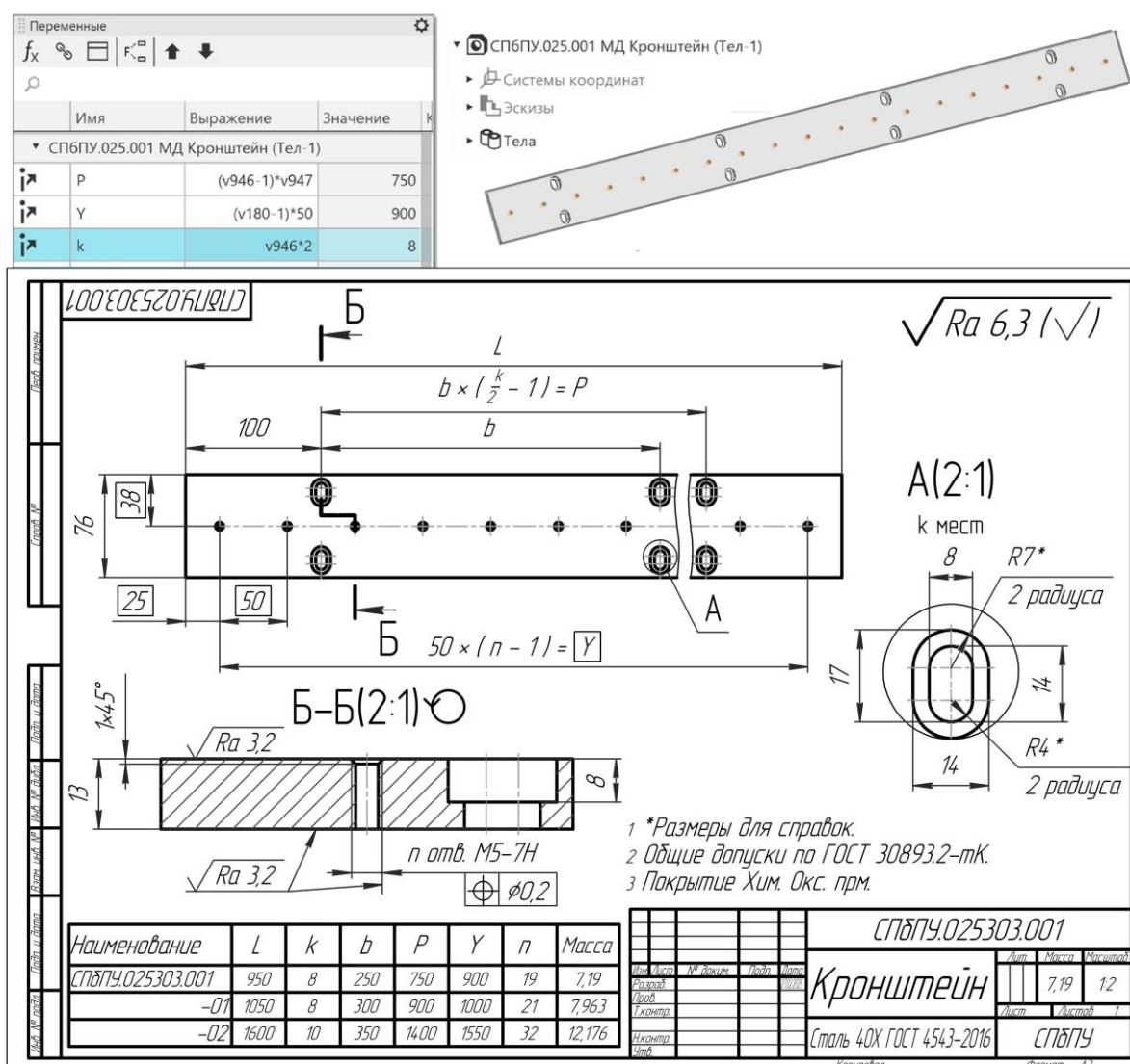


Рис. 3. Модель детали с параметрическими связями и её ассоциативный чертёж

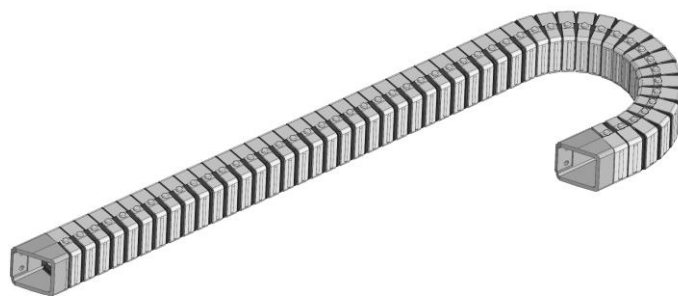


Рис. 4. Параметрическая модель гибкого кабель-канала (изгиб, количество звеньев и их профиль можно изменять)

Выводы

Проведенное исследование подчеркивает значимость интеграции параметрического моделирования в профессиональную деятельность инженеров-машиностроителей и указывает на необходимость пересмотра образовательных программ в этой сфере. Ключевой задачей обучения должно стать не просто освоение функционала конкретных САПР-программ, а формирование у студентов понимания логики и методологии параметрического подхода как такового. Это требует разработки новых методик обучения, основанных на решении комплексных проектных задач и понимании математических основ параметризации. Для эффективного освоения параметрического моделирования предлагается внедрить сквозной учебный проект на 2–3 курсах с постепенным усложнением — от отдельных деталей до узлов средней сложности. Хорошим дополнением станут лабораторные работы, посвященные сравнению эффективности параметрического и традиционного подходов по объективным критериям: времени выполнения, количеству ошибок и соответствию техническим требованиям. Такая система позволит студентам на практике оценить преимущества параметризации при решении реальных инженерных задач.

В заключение следует отметить, что параметрическое моделирование принципиально меняет подход к проектированию, и будущее машиностроения принадлежит тем предприятиям и специалистам, которые смогут в полной мере освоить потенциал этих технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] HeadHunter: работа в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс]. – URL: <https://spb.hh.ru/> (дата обращения: 13.04.2025).
- [2] SuperJob: работа и вакансии в России [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.superjob.ru/> (дата обращения: 13.04.2025).

- [3] Sacks R., Barak R. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice // *Automation in Construction*. – 2008. – Vol. 17, № 4. – P. 439–449.
- [4] Aranburu A., Justel D., Contero M., Camba J.D. Geometric Variability in Parametric 3D Models: Implications for Engineering Design // *Procedia CIRP*. – 2022. – Vol. 109. – P. 383–388.
- [5] Krol O. Parametric modeling of transverse layout for machine tool gearboxes / O. Krol, V. Sokolov // *Advances in Manufacturing II : Volume 4 - Mechanical Engineering*, Poznan, Poland, 19–22 мая 2019 года. – Cham: Springer, 2019. – P. 122–130.
- [6] Sunarya W., Seputra J.A.P., Zakariya A.F. Parametric Modeling Practice for the First-Year Architecture Students Learning // *ARTEKS: Jurnal Teknik Arsitektur*. – 2023. – Vol. 8, No. 2. – P. 293–304.
- [7] Абрамян К.В., Помпеев К.П., Тимофеева О.С., Яблочников Е.И. Применение систем моделирования при формировании инженерных компетенций в области цифрового производства // *Современное машиностроение: наука и образование: материалы 8-й Международной научно-практической конференции* / под ред. А.Н. Евграфова, А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – С. 52.
- [8] Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I., Volosatova E.E. Methods of parts digital models design for problems resolving in technological preparation of production // In: Evgrafov A.N. (ed.) *Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME)*. – Cham: Springer, 2022. – P. 129–139.
- [9] Ко А. Т. Проектирование единого информационного пространства технологической подготовки производства // *Современное машиностроение. Наука и образование*. – 2019. – № 8. – С. 565–576.
- [10] Куликов Д.Д., Яблочников Е.И., Абышев О.А., Чукичев А.В. Проектирование технологических процессов в информационно-управляющей среде // *Современное машиностроение. Наука и образование*. – 2021. – № 10. – С. 487–508.
- [11] Zou Q., Feng H.-Y., Gao S. Variational Direct Modeling: A Framework Towards Integration of Parametric Modeling and Direct Modeling in CAD // *Computer-Aided Design*. – 2023. – Vol. 157. – Art. 103465.
- [12] Zhu Q., He X., Liu Y. [et al.] A Spline Based Parametric Modeling Method for Ladder like Facilities // *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*. – 2023. – Vol. 5, No. 1. – P. 46–52.
- [13] Yakovenko A.L., Shatrov M.G., Alekseev I.V., Bogdanov S.N., Predein A.A. The Use of 3D Parametric Modeling for Internal Combustion Engine Design Automation // *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*. – Vienna, Austria, 2020. – P. 1–5.

- [14] Reddy E.J., Rangadu V.P. Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear: An approach // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – Vol. 57, No. 4. – P. 3139–3149.
- [15] Wang P., Rui X., Gu J., Huang K., Zhou L., Jiang M. Fast parametric modeling of visualized simulation and design for tracked vehicle system // Advances in Engineering Software. – 2025. – Vol. 201. – P. 103852.
- [16] Aranburu A., Cotillas J., Justel D., Contero M., Camba J.D. How Does the Modeling Strategy Influence Design Optimization and the Automatic Generation of Parametric Geometry Variations? // Computer-Aided Design. – 2022. – Vol. 151. – Art. 103364.
- [17] Markova T., Shirokova S., Rostova O., Misbakhova C. Possibilities of Using Computer-Aided Design Systems to Improve the Quality of Technical Specialists Training // In: Devezas T.C., Berawi M.A., Barykin S.E., Kudryavtseva T. (eds) Understanding the Digital Transformation of Socio-Economic-Technological Systems. Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham: Springer, 2024. – Vol. 951. – P. 93–105.
- [18] Кокорин, М. С. Проектные задачи в курсе начертательной геометрии / М. С. Кокорин, Т. В. Маркова, Т. А. Никитина // Геометрия и графика. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 32–45.
- [19] Солодилова, Н. А. Автоматизация машиностроительного проектирования. Разработка конструкторской документации в САПР КОМПАС-3D : Учебное пособие / Н. А. Солодилова, С. В. Мещеряков, Т. В. Маркова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – 89 с.
- [20] Мещеряков, С. В. Автоматизация машиностроительного проектирования в САПР КОМПАС-3D. Том 2 / С. В. Мещеряков, Н. А. Солодилова.. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. – 107 с.

N.A. Solodilova, T.V. Markova, A.Yu. Skryabnev, A.M. Blinkovsky

PARAMETRIC CAD MODELING AS A KEY COMPETENCY OF A MODERN MECHANICAL ENGINEER

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This research investigates parametric modeling's role in mechanical engineering, highlighting its growing importance through current market trends. The study addresses its design applications, specialist-training challenges, and proposes educational improvements to overcome implementation barriers.

Key words: parametric modeling, engineering design, professional skills, CAD (Computer-Aided Design), engineering geometry & computer graphics, mechanical engineering, engineering education.

REFERENCES

- [1] HeadHunter: Jobs in St. Petersburg [Online]. Available: <https://spb.hh.ru/> (Accessed: Apr. 13, 2025).
- [2] SuperJob: Jobs and Vacancies in Russia [Online]. Available: <https://www.superjob.ru/> (Accessed: Apr. 13, 2025).
- [3] Sacks R., Barak R. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice // *Automation in Construction*. – 2008. – Vol. 17, № 4. – P. 439–449.
- [4] Aranburu A., Justel D., Contero M., Camba J.D. Geometric Variability in Parametric 3D Models: Implications for Engineering Design // *Procedia CIRP*. – 2022. – Vol. 109. – P. 383–388.
- [5] Krol O. Parametric modeling of transverse layout for machine tool gearboxes / O. Krol, V. Sokolov // *Advances in Manufacturing II : Volume 4 - Mechanical Engineering*, Poznan, Poland, 19–22 мая 2019 года. – Cham: Springer, 2019. – P. 122–130.
- [6] Sunarya W., Seputra J.A.P., Zakariya A.F. Parametric Modeling Practice for the First-Year Architecture Students Learning // *ARTEKS: Jurnal Teknik Arsitektur*. – 2023. – Vol. 8, No. 2. – P. 293–304.
- [7] Abramyan K.V., Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I. Application of modeling systems in developing engineering competencies for digital manufacturing // *Modern Mechanical Engineering: Science and Education: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference* / ed. by A.N. Evgrafov, A.A. Popovich. - St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic Univ. Publ., 2019. - P. 52. (in Russian)
- [8] Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I., Volosatova E.E. Methods of parts digital models design for problems resolving in technological preparation of production // In: Evgrafov A.N. (ed.) *Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME)*. – Cham: Springer, 2022. – P. 129–139.
- [9] Ko A.T. Designing a single information space of technological preparation of production. // *Modern Mechanical Engineering: Science and Education*. – 2019. – № 8. – P. 565–576. (in Russian)
- [10] Kulikov D.D., Yablochnikov E.I., Abyshe, O.A., Chukichev A.V. Design of technological processes in the information and control system // *Modern Mechanical Engineering: Science and Education*. – 2021. – № 10. – P. 487–508. (in Russian)

- [11] Zou Q., Feng H.-Y., Gao S. Variational Direct Modeling: A Framework Towards Integration of Parametric Modeling and Direct Modeling in CAD // Computer-Aided Design. – 2023. – Vol. 157. – Art. 103465.
- [12] Zhu Q., He X., Liu Y. [et al.] A Spline Based Parametric Modeling Method for Ladder like Facilities // Frontiers in Computing and Intelligent Systems. – 2023. – Vol. 5, No. 1. – P. 46–52.
- [13] Yakovenko A.L., Shatrov M.G., Alekseev I.V., Bogdanov S.N., Predein A.A. The Use of 3D Parametric Modeling for Internal Combustion Engine Design Automation // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). – Vienna, Austria, 2020. – P. 1–5.
- [14] Reddy E.J., Rangadu V.P. Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear: An approach // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – Vol. 57, No. 4. – P. 3139–3149.
- [15] Wang P., Rui X., Gu J., Huang K., Zhou L., Jiang M. Fast parametric modeling of visualized simulation and design for tracked vehicle system // Advances in Engineering Software. – 2025. – Vol. 201. – P. 103852.
- [16] Aranburu A., Cotillas J., Justel D., Contero M., Camba J.D. How Does the Modeling Strategy Influence Design Optimization and the Automatic Generation of Parametric Geometry Variations? // Computer-Aided Design. – 2022. – Vol. 151. – Art. 103364.
- [17] Markova T., Shirokova S., Rostova O., Misbakhova C. Possibilities of Using Computer-Aided Design Systems to Improve the Quality of Technical Specialists Training // In: Devezas T.C., Berawi M.A., Barykin S.E., Kudryavtseva T. (eds) Understanding the Digital Transformation of Socio-Economic-Technological Systems. Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham: Springer, 2024. – Vol. 951. – P. 93–105.
- [18] Kokorin M.S., Markova T.V., Nikitina T.A. Project tasks in descriptive geometry course // Geometry and Graphics. – 2024. – Vol. 12, No. 3. – P. 32–45. (in Russian)
- [19] Solodilova N.A., Meshcheryakov S.V., Markova T.V. Automation of mechanical engineering design. Development of design documentation in CAD KOMPAS-3D: Textbook. – St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2024. – 89 p. (in Russian)
- [20] Meshcheryakov S.V., Solodilova N.A. Automation of mechanical engineering design in CAD KOMPAS-3D. Volume 2. – St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2022. – 107 p. (in Russian)