

УДК 004.896

*Ван Икунь*

*бакалавр*

*Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ)*

*Чжан Цытун*

*бакалавр*

*Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ)*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ**

**Аннотация:** В данной статье представлена комплексная методология оптимизации процессов проектирования и производства на основе цифровых двойников, направленная на преодоление разрыва между теоретическими возможностями технологии и её практическим применением. Исследование охватывает разработку алгоритмов интеграции виртуальных моделей в реальные производственные процессы, формализацию многокритериальных задач оптимизации, а также создание адаптивных систем управления. Особое внимание уделяется динамическому моделированию, предиктивной аналитике и виртуальному тестированию, что позволяет минимизировать затраты и повысить надежность изделий. Результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода для таких отраслей, как авиастроение, энергетика и роботизированное производство.

**Ключевые слова:** Цифровые Двойники, Оптимизация Проектирования, Производственные Технологии, Промышленность 4.0, Адаптивное Управление

Wang Yikun

Bachelor

South Ural State University

Zhang Zitong

Bachelor

South Ural State University

## **Development of methods to optimize design and manufacturing technology using digital twins**

**Abstract:** This paper presents a comprehensive methodology for the optimization of design and manufacturing processes based on digital twins, aimed at bridging the gap between the theoretical capabilities of the technology and its practical application. The study covers the development of algorithms for integrating virtual models into real manufacturing processes, formalization of multi-criteria optimization problems, and creation of adaptive control systems. Special attention is paid to dynamic simulation, predictive analytics and virtual testing, which allows minimizing costs and improving product reliability. The results demonstrate the effectiveness of the proposed approach for industries such as aerospace, energy and robotic manufacturing.

**Keywords:** Digital twins, Design optimization, Manufacturing technology, Industry 4.0, Adaptive control

### **Введение**

Современные промышленные системы сталкиваются с возрастающими требованиями к эффективности, гибкости и скорости внедрения инновационных решений. В этом контексте цифровые двойники становятся ключевым инструментом трансформации процессов проектирования и производства. Их применение позволяет не только сократить временные и финансовые затраты на разработку новых изделий, но и повысить точность прогнозирования поведения сложных технических систем на всех этапах жизненного цикла.[1] Однако, несмотря на активное внедрение цифровых двойников в промышленность, остается ряд нерешенных проблем, связанных с оптимизацией их использования. В частности, недостаточно разработаны универсальные методы интеграции цифровых двойников в процессы проектирования и производства, учитывающие многокритериальность задач и динамику изменяющихся условий.

Целью данного исследования является разработка комплексных методов оптимизации проектирования и технологии производства на основе цифровых двойников. Особое внимание уделяется созданию алгоритмов, позволяющих согласовать виртуальные модели с реальными производственными процессами,

а также формализации критериев оптимизации, включающих не только технико-экономические показатели, но и параметры устойчивости и адаптивности систем. Актуальность работы обусловлена необходимостью преодоления разрыва между теоретическими возможностями цифровых двойников и их практическим применением в условиях неопределенности и высокой динамики современных производственных сред.

Научная новизна исследования заключается в системном подходе к объединению методов проектирования и производственной оптимизации в единый цифровой контур. Предлагаемые методики базируются на комбинации динамического моделирования, адаптивного управления и виртуального тестирования, что позволяет минимизировать итерационные затраты и повысить точность принимаемых решений. В отличие от существующих решений, рассматриваемый подход учитывает не только статические параметры, но и вероятностные сценарии поведения систем, что особенно важно для отраслей с высокими требованиями к надежности, таких как авиастроение, энергетика и роботизированное производство. Результаты работы могут быть использованы для дальнейшего развития методологии цифровых двойников и их адаптации к задачам Industry 4.0.

### **Теоретические Основы Цифровых Двойников**

Цифровые двойники представляют собой динамические виртуальные модели физических объектов или процессов, способные в реальном времени отражать их состояние, поведение и взаимодействие с окружающей средой. Концепция цифровых двойников возникла как ответ на потребность в более точном прогнозировании и оптимизации сложных технических систем, где традиционные методы моделирования оказываются недостаточно гибкими. В отличие от классических компьютерных моделей, цифровые двойники не ограничиваются статическим представлением объекта, а включают механизмы непрерывного обмена данными с физическим прототипом через IoT-устройства и датчики, что обеспечивает их актуальность на всех этапах эксплуатации.

Классификация цифровых двойников может быть проведена по различным

критериям, включая уровень детализации (компонентный, системный, комплексный), область применения (проектирование, производство, эксплуатация) и степень автономности (реактивные, прогнозные, адаптивные). Наиболее значимым является разделение на цифровые прототипы, используемые на этапе проектирования, и цифровые тени, отражающие реальное состояние объекта в процессе его функционирования.[2] Такая дифференциация позволяет точнее определить функциональное назначение двойника и требования к его математическому аппарату. Математические модели цифровых двойников основываются на комбинации методов численного моделирования, машинного обучения и теории управления. Ключевым аспектом является использование дифференциальных уравнений в частных производных для описания физических процессов, дополненных статистическими методами для учета неопределенностей. Информационные модели, в свою очередь, опираются на стандарты управления жизненным циклом продукта и промышленный интернет вещей, обеспечивая совместимость данных между различными этапами жизненного цикла изделия. Особое значение имеет интеграция с CAD/CAE-системами, позволяющая автоматизировать процесс обновления виртуальной модели при изменениях в конструкции или технологии производства.[3]

Роль цифровых двойников в концепции Industry 4.0 определяется их способностью сокращать разрыв между проектированием и реальным производством. Они становятся основой для цифровых фабрик, где все процессы, от разработки до логистики, координируются через единое информационное пространство. Это позволяет не только минимизировать количество физических испытаний, но и реализовывать сценарии "что если" для оценки устойчивости системы к внешним воздействиям. В перспективе развитие цифровых двойников будет связано с усилением их когнитивных функций, включая автономное принятие решений на основе предиктивной аналитики, что открывает новые возможности для создания адаптивных производственных систем.

### **Методология Оптимизации Проектирования**

Современные подходы к оптимизации проектирования на основе цифровых

двойников требуют системной формализации задач, учитывающей многоаспектность промышленных процессов. Основная сложность заключается в необходимости согласования противоречивых требований: минимизации временных и финансовых затрат при одновременном обеспечении высокой надежности и технологичности изделий. Решение этой проблемы достигается через разработку математических моделей, объединяющих параметрическое описание объекта с вероятностными методами анализа его поведения в различных эксплуатационных сценариях. Особое значение приобретает применение методов нелинейного программирования, позволяющих учитывать взаимовлияние различных факторов проектирования.

Интеграция цифровых двойников в процесс проектирования основывается на итеративных алгоритмах, обеспечивающих постоянную актуализацию виртуальной модели в соответствии с изменяющимися требованиями.[4] Ключевым аспектом становится создание замкнутого цикла "проектирование-анализ-оптимизация", где каждый этап сопровождается автоматизированной верификацией принимаемых решений. Применение методов машинного обучения позволяет выявлять скрытые зависимости между параметрами конструкции и эксплуатационными характеристиками, что существенно повышает эффективность процесса разработки. Важную роль играет использование облачных платформ, обеспечивающих распределенные вычисления и коллективную работу над проектом.

Критерии оптимизации проектирования формируются как многомерная целевая функция, включающая экономические, временные и технические показатели. Стоимостной фактор учитывает не только прямые затраты на материалы и производство, но и потенциальные расходы, связанные с возможными отказами и модернизациями. Временные параметры оцениваются через призму всего жизненного цикла изделия, включая этапы последующего обслуживания и утилизации. Надежность системы формализуется через вероятностные модели отказов, учитывающие как конструкционные особенности, так и условия эксплуатации. Такой комплексный подход позволяет

находить баланс между конкурирующими требованиями, обеспечивая оптимальное решение в условиях многокритериальной задачи.

### **Методы оптимизации технологии производства**

Современные методы оптимизации производственных технологий на основе цифровых двойников требуют принципиально нового подхода к моделированию промышленных процессов. Динамическое моделирование позволяет воспроизводить не только статические параметры производства, но и его эволюцию во времени, учитывая взаимовлияние технологических операций, изменение характеристик оборудования и изменчивость исходных материалов. Особую значимость приобретает использование методов дискретно-событийного моделирования, сочетающегося с агент-ориентированными подходами, что обеспечивает высокую адекватность виртуального представления реальным производственным системам.

Адаптивные системы управления, построенные на принципах цифровых двойников, реализуют концепцию самонастраивающегося производства. Их ключевое отличие от традиционных систем автоматизации заключается в способности прогнозировать изменения производственной среды и заранее корректировать параметры технологических процессов.[5] Это достигается за счет интеграции предиктивных алгоритмов, анализирующих данные с промышленных датчиков в реальном времени и сопоставляющих их с виртуальными моделями. Результатом становится существенное повышение устойчивости производства к внешним возмущениям и внутренним нестабильностям.

Виртуальное тестирование технологических решений открывает новые возможности для сокращения ресурсных затрат на этапе подготовки производства. Методика цифровых экспериментов позволяет оценивать эффективность различных сценариев организации производственного процесса без физического прототипирования, что особенно важно для сложных и наукоемких изделий. Применение методов многокритериальной оптимизации в сочетании с имитационным моделированием дает возможность находить

компромисс между производительностью, качеством и экономической эффективностью, формируя таким образом оптимальную технологическую стратегию.

### **Комплексная методика оптимизации**

Разработка комплексной методики оптимизации на основе цифровых двойников требует принципиально нового подхода к организации всего жизненного цикла изделия. Центральным аспектом становится создание единого цифрового контура, объединяющего этапы проектирования и производства в непрерывный информационный поток. Такой подход преодолевает традиционную разобщенность между конструкторскими и технологическими подразделениями, обеспечивая сквозную согласованность принимаемых решений. Цифровой двойник в данной системе выступает не просто инструментом моделирования, а становится интегрирующей платформой, аккумулирующей данные всех этапов создания продукта - от первоначальных расчетов до эксплуатационного мониторинга.[6] Внедрение цифровых двойников в жизненный цикл изделия представляет собой многоэтапный процесс, требующий тщательной методологической проработки. Начальная фаза предполагает создание параметрической модели, отражающей все существенные характеристики проектируемого объекта. Последующее развитие цифрового двойника происходит параллельно с эволюцией физического прототипа, включая стадии технологической подготовки производства, промышленных испытаний и серийного выпуска. Критически важным является механизм обратной связи, позволяющий оперативно корректировать виртуальную модель на основании данных с производственного оборудования и систем контроля качества. Такой динамический подход обеспечивает постоянную актуальность цифрового двойника на протяжении всего жизненного цикла изделия.

Программно-алгоритмическое обеспечение комплексной методики строится на принципах открытой архитектуры, обеспечивающей совместимость с существующими CAD/CAE/CAM системами. Ядром решения выступает специализированная платформа, объединяющая модули математического

моделирования, базы знаний и средства визуализации. Особое внимание уделяется алгоритмам обработки больших данных, позволяющим выявлять скрытые закономерности в производственных процессах. Реализация предиктивных функций достигается за счет применения методов машинного обучения, адаптирующих модель к изменяющимся условиям. Важным компонентом становится система поддержки принятия решений, предоставляющая инженерному персоналу рекомендации по оптимизации как конструктивных решений, так и технологических параметров. Интеграция с промышленными IoT-платформами завершает формирование цифрового контура, обеспечивая непрерывный обмен данными между виртуальной моделью и реальным производством.

### **Заключение**

Проведенное исследование позволило разработать комплексную методологию оптимизации процессов проектирования и производства на основе цифровых двойников, обеспечивающую принципиально новый уровень интеграции между конструкторскими и технологическими этапами создания изделий. Основным научным результатом стало создание алгоритмического аппарата, позволяющего согласовывать многокритериальные задачи проектирования с динамическими моделями производственных процессов в едином цифровом контуре. Разработанные методы формализации оптимизационных задач и их программная реализация демонстрируют возможность существенного сокращения сроков вывода продукции на рынок при одновременном повышении качества и надежности изделий. Особую ценность представляет предложенный механизм адаптивного управления, основанный на непрерывном взаимодействии цифрового двойника с реальным производственным оборудованием через IoT-платформы.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием когнитивных функций цифровых двойников, в частности - возможностей автономного принятия решений на основе предиктивной аналитики. Требуется дополнительной проработки вопрос стандартизации форматов данных для обеспечения

совместимости между различными платформами цифрового моделирования. Отдельное направление представляет интеграция технологий блокчейн для верификации изменений в жизненном цикле изделия. Развитие предложенной методологии в этих направлениях позволит создать принципиально новые инструменты управления промышленными предприятиями в условиях цифровой трансформации экономики. Реализация указанных перспектив потребует междисциплинарных исследований на стыке компьютерного моделирования, искусственного интеллекта и промышленной инженерии.

### **Список литературы**

1. Курганова Н. В., Филин М. А., Черняев Д. С. и др. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2019. – Т. 7, № 5. – С. 105–115.
2. Гончаров А. С., Саклаков В. М. Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии // *Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: материалы конференции*. – 2018. – С. 24–26.
3. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2021. – Т. 64, № 7. – С. 517–531.
4. Мартынец Е. Р., Левенцов В. А. Разработка наукоемкой продукции с применением технологии цифровых двойников // *Устойчивое развитие цифровой экономики, промышленности и инновационных систем: сборник трудов конференции*. – 2020. – С. 631–634.
5. Цёхла С. Ю., Симченко Н. А., Моисеенко В. А. Сетевое проектирование внедрения цифровых двойников в промышленности // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. – 2020. – № 3. – С. 106–112.
6. Романовская В. Е. «Цифровой двойник» как основа цифрового проектирования и моделирования // *Цифровые технологии в экономике и*

промышленности (ЭКОПРОМ-2019): материалы конференции. – 2019. – С. 208–214.