

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА КАК ОСНОВА ДЛЯ ГИБРИДНОГО ПОДХОДА К СОЗДАНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАШИН

Ерохин В.В.^{1,2}, Ши Х.²

¹*Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел РФ, Москва;*

²*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*

Ключевые слова: интеллектуальные машины, бережливое производство, групповое проектирование, цифровые двойники, CAD-CAM технологии, чистые производственные помещения, критерии оценки методологий.

Аннотация. Статья посвящена сравнительному анализу методологий создания интеллектуальных машин – киберфизических систем с адаптацией и самодиагностикой. Актуальность обусловлена разрывом CAD/CAM, ростом сложности изделий и разделением разработки механики и ПО. Целью исследования является обосновать гибридный подход на основе анализа существующих методологий. Разработана система из 14 критериев (9 процессных, 5 проектных), по которым оценены четыре подхода: групповое проектирование (PFE), сквозное CAD-CAM (кривые Безье), цифровые двойники (GRITEC) и чистые помещения (CNC Cleanroom). Результатом исследования является то, что ни одна методология не закрывает все критерии. PFE наиболее сбалансирована, но требует HW/SW-кодизайна. GRITEC охватывает большинство инженерных аспектов. CAD-CAM и Cleanroom решают узкие задачи технологичности и чистоты производственных помещений. Практическая значимость исследования состоит в том, что предложен гибридный подход, объединяющий платформенную логику PFE, сквозную CAD-CAM-подготовку, цифровые двойники и чистые производственные зоны – как основа для создания интеллектуальных машин нового поколения.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESIGN AND MANUFACTURING METHODOLOGIES AS A BASIS FOR A HYBRID APPROACH TO CREATING INTELLIGENT MACHINES

Erokhin V.V.^{1,2}, Shi H.²

¹*Moscow state institute of international relations (university), Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation, Moscow;*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

Keywords: intelligent machines, lean manufacturing, product family engineering, digital twins, CAD-CAM technologies, CNC Cleanroom, criteria for evaluating methodologies.

Abstract. This article describes the step-by-step development of an expert knowledge collection system for mechanical engineering. The primary approach involves integrating knowledge collection into the daily work of specialists through customized interfaces. The methodology includes: user classification (operators, managers, engineers); development of a graphical interface for operators; creation of process and failure models; and implementation of a prototype with automatic data recording. Testing the prototype in a production environment revealed practical challenges and confirmed the value of an iterative approach to creating an effective knowledge collection system. The system demonstrates potential for process standardization and improved quality control in manufacturing.

1. Описание проблемы

Современное машиностроение переживает этап глубокой трансформации. От традиционного оборудования, выполняющего жестко заданные механические операции, отрасль переходит к созданию интеллектуальных машин – киберфизических систем, способных к адаптации, самодиагностике и оптимизации собственной работы в реальном времени. Однако этот переход сталкивается с рядом системных противоречий, которые существующие (устаревшие) подходы к проектированию и производству не в состоянии разрешить.

В классической цепочке создания машины этапы конструкторской разработки (CAD) и технологической подготовки производства (CAM) часто существуют изолированно. Это приводит к тому, что виртуальная модель, идеальная с точки зрения конструктора, теряет часть своей точности или технологичности при переносе в физическую среду станка с ЧПУ. Траектории движения инструмента требуют трудоемкой ручной коррекции, что нивелирует преимущества цифровых двойников и не позволяет машине выйти на заданную точность обработки (например, сложнопрофильных деталей).

Рынок требует кастомизированной, наукоемкой продукции, что ведет к экспоненциальному росту сложности механических систем и их программного управления. При этом сроки разработки и бюджет сжимаются. Традиционные «жесткие» методологии проектирования (например, классическая каскадная модель) не успевают обрабатывать изменения на поздних этапах, что приводит к срыву сроков ОКР и накоплению технических рисков. Необходимо совместить гибкость итеративной разработки с дисциплиной тяжелого машиностроения.

Каждое новое изделие зачастую проектируется «с нуля» или на основе устаревших чертежей. Это противоречит принципам бережливого производства и экономической эффективности. Отсутствие системного подхода к унификации приводит к тому, что производство не может масштабировать успешные технические решения, а цеха забиты номенклатурой уникальных, невзаимозаменяемых деталей, что удорожает обслуживание.

При создании прецизионных интеллектуальных машин (например, для аэрокосмической отрасли или медицинской техники) критическим фактором качества становится чистота производственной среды. Однако в традиционном машиностроении контроль загрязнений ограничивается визуальным осмотром. Частицы пыли, стружки, технологических жидкостей, попадая в механические узлы, вызывают ускоренный износ и отказы, сводя на нет преимущества интеллектуальных систем мониторинга, так как последние лишь фиксируют уже наступивший дефект вместо того, чтобы предотвращать его.

Интеллектуальная машина – это симбиоз механики, электроники и программного обеспечения (ПО). Текущая практика часто разделяет разработку механической части и системы управления. Это порождает проблему «черного ящика»: программная логика разрабатывается под готовую механику, а не в тесной связке с ней. В результате машина не достигает пиковой эффективности, а ее адаптивные алгоритмы работают в узких, заранее предписанных пределах, не используя реальный потенциал мехатронных узлов.

Таким образом, основная проблема формулируется как отсутствие интегрированной методологической базы, позволяющей одновременно управлять сложностью, обеспечивать прецизионную точность на стыке цифры и физики, снижать стоимость кастомизации через унификацию и контролировать критические факторы производственной среды. Решение этой проблемы лежит через внедрение описанных ниже методологий, которые рассматриваются не как разрозненные инструменты, а как взаимосвязанная система техник создания интеллектуальных машин нового поколения.

Для решения проблем разработки современных сложных технических систем необходима бережливая методология. В поисках основы для нее были отобраны пять перспективных подходов:

Гибридная методология проектирования (на примере ОДК-Климов) – сочетает каскадную модель и гибкие (Agile) подходы при разработке систем автоматического управления. Позволяет снизить технические риски и сократить сроки ОКР за счет итеративной отработки узлов и создания демонстраторов.

1. Методология группового проектирования изделий (Product Family Engineering) – подход к созданию семейств унифицированных машин на основе узлов сопряжения и матриц подвижностей. Обеспечивает кастомизацию продукции при низкой себестоимости за счет многократного использования элементной базы [1-4].

2. Технология сквозного проектирования CAD-CAM (на базе кривых Безье) – метод сглаживания стыков траекторий движения инструмента при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ. Позволяет повысить точность обработки сложнопрофильных деталей [5, 6].

3. Промышленная автоматизация и цифровые двойники (GRITEC) – комплексный подход к созданию производственных систем, включающий роботизацию, интеграцию систем технического зрения, виртуальные симуляции и подключение к MES/ERP для сквозной цифровизации процессов [7, 8].

4. Чистые производственные помещения (CNC Cleanroom) – методология организации производства для прецизионного машиностроения, основанная на контроле видимых частиц (пыль, стружка) согласно стандартам VDA 19/ISO 16232, что критически важно для качества высокоточных механических узлов [9, 10].

2. Критерии оценки методологий (с целью их применения для кросс-системной интеграции)

Для определения характеристик идеальной бережливой методологии разработки технических систем и программного обеспечения машиностроения были проанализированы особенности бережливой разработки продуктов, высокоэффективные процессы создания ПО и ключевые аспекты системного проектирования. В результате нескольких итераций был сформирован итоговый набор критериев из двух групп:

1. Характеристики процесса (9 критериев): определенность, управление конфигурацией, вовлечение пользователя, прозрачность, адаптируемость, быстрый цикл разработки, масштабируемость, бездефектность, непрерывное совершенствование.

2. Аспекты системного проектирования (5 критериев): технологичность, поддерживаемость, модернизируемость, масштабируемая архитектура, совместное проектирование технических систем и программного обеспечения.

Эти критерии не являются исчерпывающим списком, но представляют собой ключевые характеристики процесса и аспекты проектирования, которые широко признаны необходимыми для успешной разработки продуктов.

Для создания эффективной методологии разработки технических систем и программного обеспечения в области машиностроения процесс должен обладать следующими ключевыми характеристиками:

1. Определенность. Процесс должен быть четко прописан. Разработка "как получится" (ad hoc) ведет к срыву сроков, перерасходу бюджета и низкому качеству. Даже успех, достигнутый без формализованного подхода, сложно повторить.

2. Управление конфигурацией. Необходимо вести актуальную документацию, фиксировать состояния системы в контрольных точках и контролировать все изменения на протяжении всего цикла разработки. Это гарантирует целостность и отслеживаемость проекта.

3. Вовлечение пользователя. Конечные пользователи должны участвовать в разработке с самого начала, чтобы выявить их реальные потребности, которые часто отличаются от формальных требований. Примеры:

- Интерфейс ЧПУ. Разработчики сделали многоуровневые таблицы коррекции (формально "полные данные"). Операторы в цеху запросили графический профиль детали на главном экране с возможностью перетаскивания точек – в таблицах они "тонули" и тратили слишком много времени.

- Система технического зрения для сварки. Техническое задание требовало точность 0,1 мм. Инженеры сделали сложный алгоритм. На испытаниях выяснилось, что детали деформируются от нагрева. Операторы попросили добавить режим ручной подналадки станочной оснастки в "слепую" зону – интеллектуальная система не работала без "грубой" подсказки человека.

- Токарный патрон. Инженеры сделали легкий, обтекаемый корпус из алюминия для снижения вибраций. Наладчики не смогли его удерживать масляными руками при смене оснастки. Потребовались эргономичные проточки, не заложенные в расчетах.

4. Прозрачность. Процесс должен быть понятен и инженерам, и менеджерам. Ход разработки должен легко измеряться и отслеживаться. Это позволяет находить проблемы на ранних стадиях, когда их исправление стоит дешево.

5. Адаптируемость. Один шаблон не подходит для всех проектов. Методология должна настраиваться под конкретные задачи. Попытка создать универсальный процесс для всего приводит к бюрократизации и неэффективности (как в случае с фабричным подходом SDC в 1970-х).

6. Быстрый цикл разработки. Короткие циклы позволяют быстрее передавать технологии в войска и гарантируют, что система не устареет к моменту выпуска. Это также облегчает своевременную модернизацию оборудования под быстро меняющийся рынок электроники.

7. Масштабируемость. Методология должна одинаково эффективно работать как для простых, так и для сверхсложных проектов. Неформальные

каналы связи, работающие в малых командах, "задыхаются" в больших проектах – процесс должен это учитывать.

8. Бездефектность (Ноль дефектов). Главная цель – сделать правильно с первого раза. Ключевой упор делается на предотвращение дефектов, а не на их поиск и исправление позже. Тестирование менее эффективно, чем профилактика.

9. Непрерывное совершенствование и учет опыта. Процесс должен включать механизмы сбора и документирования уроков. Опыт каждого проекта должен становиться достоянием всей компании, а не оставаться в голове отдельного сотрудника. Пример Toyota: "книги уроков" по каждой детали кузова, где собраны оптимальные параметры, гарантирующие технологичность новых разработок.

Идеальная методология разработки должна учитывать не только процесс, но и ключевые аспекты самого продукта:

1. Технологичность. Конструкция должна быть пригодна для эффективного и недорогого производства. Именно на этапе проектирования закладывается до 80% будущей производительности. Ошибки здесь дорого обходятся:

2. Поддерживаемость. Система должна легко обслуживаться в полевых условиях, так как эксплуатационные расходы часто превышают стоимость разработки (до 67% затрат на ПО приходится на сопровождение). Доступ к узлам должен быть простым.

3. Модернизируемость. Учитывая долгий срок службы военной техники и быстрое развитие технологий, система должна допускать относительно легкое и недорогое обновление аппаратной и программной части в течение всего жизненного цикла.

4. Масштабируемая архитектура. Архитектура должна позволять наращивать возможности под новые, часто непредвиденные задачи.

5. Совместное проектирование технических систем и программного обеспечения. Нельзя разделять разработку «железа» и «софта» на раннем этапе. Необходим постоянный обмен и поиск компромиссов между аппаратной гибкостью, производительностью и стоимостью. Это позволяет исследовать больше вариантов и найти оптимальный баланс, избегая ситуации, когда одно делается без оглядки на другое.

Схема оценивания следующая. Каждая методология оценивалась по простой трехбалльной шкале: "соответствует", "частично соответствует" или "не соответствует" каждому критерию. В таблице 1 и таблице 2 представлены результаты для характеристик процесса и для аспектов проектирования. Знак "+" означает оценке "соответствует", знак "±" – "частично соответствует", знак "–" – "не соответствует".

Табл. 1. Оценка по характеристикам процесса

Критерий	Групповое проектирование (PFE)	CAD-CAM (кривые Безье)	Цифровые двойники (GRITEC)	Чистые помещения (CNC Cleanroom)
Определенность	+	+	+	+
Управление конфигурацией	+	–	+	–
Вовлечение пользователя	±	–	+	±
Прозрачность	+	±	+	+
Адаптируемость	+	±	+	±
Быстрый цикл разработки	+	+	+	–
Масштабируемость методологии	+	+	+	+
Бездефектность	±	+	±	+
Непрерывное улучшение	+	–	+	±

Табл. 2. Оценка по аспектам проектирования системы

Критерий	Групповое проектирование (PFE)	CAD-CAM (кривые Безье)	Цифровые двойники (GRITEC)	Чистые помещения (CNC Cleanroom)
Технологичность	+	+	+	+
Поддерживаемость	+	–	+	+
Модернизируемость	+	–	±	–
Масштабируемая архитектура	+	–	+	–
Совместное проектирование	–	±	±	–

3. Заключение

Анализ четырех методологий, применяемых при создании интеллектуальных машин, показал следующее.

По характеристикам процесса наилучшие результаты демонстрируют методология группового проектирования (PFE) и подход с цифровыми двойниками (GRITEC). Они закрывают большинство процессных критериев, включая адаптируемость, масштабируемость и возможность непрерывного улучшения. Технология CAD-CAM (кривые Безье) сильна в обеспечении бездефектности и быстром цикле, но проигрывает в вовлечении пользователя и управлении конфигурацией. Методология чистых помещений (CNC Cleanroom) эффективна для предотвращения дефектов, но не ориентирована на скорость разработки и слабо связана с управлением конфигурацией продукта.

По аспектам проектирования ситуация неоднородна. Методология группового проектирования наиболее сбалансирована: она обеспечивает технологичность, поддерживаемость и модернизируемость, но не решает задачу совместного проектирования аппаратного и программного обеспечения. Цифровые двойники закрывают большинство инженерных аспектов, однако уступают в глубине проработки HW/SW-кодизайна. CAD-CAM и чистые помещения решают узкие, но критические задачи: первый обеспечивает технологичность сложных деталей, вторая – качество прецизионных узлов, однако оба подхода не затрагивают вопросы модернизации и масштабирования архитектуры изделий в целом.

Итоговые **выводы**:

1. Методология группового проектирования (PFE) обладает наиболее сбалансированными процессными характеристиками и лучшим учетом аспектов проектирования среди рассмотренных. Она может служить концептуальной основой для создания семейств интеллектуальных машин, но требует дополнения инструментами HW/SW-кодизайна.

2. Технология CAD-CAM (кривые Безье) является мощным инструментом обеспечения технологичности и бездефектности на этапе подготовки производства, но не является методологией разработки в полном смысле. Ее следует рассматривать как специализированную технику в рамках более широкого подхода.

3. Подход с цифровыми двойниками (GRITEC) демонстрирует высокую процессную зрелость и охватывает большинство инженерных аспектов, особенно на стыке проектирования и эксплуатации. Это наиболее близкий аналог "бережливой" методологии для производственных систем, однако его эффективность зависит от качества интеграции с процессами разработки самого изделия.

4. Методология чистых помещений (CNC Cleanroom) решает узкую, но критическую задачу контроля качества на стыке технологии и среды. Она не является самостоятельной методологией разработки, но должна быть обязательным компонентом любой системы, претендующей на создание прецизионных интеллектуальных машин.

Ни одна из рассмотренных методологий в отдельности не закрывает все критерии идеальной бережливой разработки. Наиболее перспективным представляется гибридный подход, объединяющий:

- платформенную логику группового проектирования (PFE);
- инструменты сквозной CAD-CAM-подготовки для обеспечения технологичности;
- среду цифровых двойников для виртуальной отладки и сопровождения;
- и чистые производственные зоны для финишных операций.

Список литературы

1. Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю. Информационно-технологические основы системы автоматизированного проектирования многоуровневой базовой групповой технологии. Часть I // Станкоинструмент. – 2024. – №3(36). – С. 58-65. – DOI: 10.22184/2499-9407.2024.36.3.58.65.

2. Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю. Информационно-технологические основы системы автоматизированного проектирования многоуровневой базовой групповой технологии. Часть II // Станкоинструмент. – 2024. – №4(37). – С. 56-63. – DOI: 10.22184/2499-9407.2024.37.4.56.63.
3. Козов А.В. Модели и методы проектирования динамически реконфигурируемой системы группового управления мобильными роботами // Автоматизация процессов управления. – 2021. – №1(63). – С. 130-139. – DOI: 10.35752/1991-2927-2021-1-63-130-139.
4. Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю. Основные научные принципы разработки и реализации системы многоуровневой базовой групповой технологии // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2020. – №3(70). – С. 45-56.
5. Платонов В.В., Платонова Е.В. Технологии и оборудование для малых специализированных цифровых производств // Современные проблемы теории машин. – 2024. – №18. – С. 10-13. – DOI: 10.26160/2307-342X-2024-18-10-13.
6. Чернов Д.С., Матвеев А.В., Нестеров С.А., Сорокина Н.В. Опыт разработки технологии изготовления модельной оснастки для отливок с применением CAD/CAM/CAE систем // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – №63-2. – С. 39-43. – DOI: 10.18411/lj-07-2020-30.
7. Лудищев Я.В. Реализация адаптивных систем и моделей машинного обучения в промышленной автоматизации без перегрузки ПЛК // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2025. – №2. – С. 105-113. – DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2025/2/105-113.
8. Кучковская Н.В. Перспективы использования цифровых моделей и искусственного интеллекта для автоматизации и роботизации производственных процессов промышленных предприятий будущего // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2025. – №5. – С. 96-101.
9. Wasmer A., Staub G., Vroom R.W. An industry approach to shared, cross-organisational engineering change handling-The road towards standards for product data processing // Computer-Aided Design. 2011, vol. 43, iss. 5, pp. 533-545. DOI: 10.1016/j.cad.2010.10.002.
10. Budde L., Hentschel J., Ihler S., Seel T. Achieving near-zero particle generation by simplicity of design – A compliant-mechanism-based gripper for clean-room environments. SLAS Technology. 2024, vol. 29, p. 100148. DOI: 10.1016/j.slast.2024.100148.

Сведения об авторах:

Ерохин Виктор Викторович – д.т.н., доцент, профессор кафедры математических методов и бизнес-информатики МГИМО МИД России, профессор кафедры инновационного предпринимательства МГТУ им. Н.Э. Баумана;

Ши Хан – аспирант.