

УДК 338.45:658.5

DOI: 10.34670/AR.2026.39.30.014

Многоуровневая классификационная модель управленческих технологий в высокотехнологичном машиностроении

Каширин Александр Иванович

Доктор экономических наук, доцент,
заведующий базовой кафедрой Государственной
корпорации «Ростех» в РУДН,
заместитель председателя Научно-технического совета
Государственной корпорации «Ростех»,
профессор базовой кафедры Государственной
корпорации «Ростех» в РЭУ им. Г.В. Плеханова,
117198, Российская Федерация, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6;
e-mail: alexkashirin@mail.ru

Стреналюк Вадим Вениаминович

Кандидат экономических наук, доцент,
доцент базовой кафедры ГК «Ростех» в РУДН,
руководитель проектов опережающего инновационного развития
Научно-технического совета Государственной корпорации «Ростех»,
научный сотрудник базовой кафедры Государственной
корпорации «Ростех» в РЭУ им. Г.В. Плеханова,
117198, Российская Федерация, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6;
e-mail: vstren@mail.ru

Филиппов Павел Геннадьевич

Доктор физико-математических наук, профессор,
руководитель проектов научно-технической экспертизы
Научно-технического совета Государственной корпорации «Ростех»
125424, Российская Федерация, Москва, Волоколамское шоссе, 75А,
e-mail: p.g.filippov@rostec.ru

Аннотация

В условиях трансформации высокотехнологичного машиностроения в мировой практике наблюдается устойчивое расхождение экономических результатов при сопоставимых объемах инвестиций: одни предприятия добиваются кратного роста показателей, другие – ограниченного эффекта. Существующие обзоры посвящены, как правило, отдельным управленческим подходам (Lean, Agile, DevOps, OKR), что оставляет открытым вопрос об интегрирующей рамке. Выполнен аналитический обзор литературы 2018–2025 гг. в базах Scopus, Web of Science и РИНЦ; стратегия поиска, критерии включения/исключения и кодовая схема описаны в разделе 2. Предложена авторская

классификационная пятиуровневая модель управленческих технологий машиностроения; введена типология артефактов (метод, фреймворк, стандарт, эталонная архитектура, свод знаний); описаны четыре сквозных функциональных подсистемы и шесть рабочих контуров обратной связи (3 усиливающих и 3 стабилизирующих) как авторская конструкция, подлежащая дальнейшей эмпирической проверке. Сформулирована фальсифицируемая гипотеза о связи полноты покрытия уровней с показателями конкурентоспособности. Авторы предлагают пятиступенчатую шкалу зрелости уровней (по аналогии с СММИ). Для специальности 5.2.3 – отраслевая операционализация факторов конкурентоспособности машиностроения; для 5.2.6 – адаптация принципа комплементарности Милгрона–Робертса (1990, 1995) к контексту высокотехнологичного дискретного производства. Практическая значимость. Модель применима как диагностический инструмент для оценки управленческой зрелости предприятия и планирования трансформации.

Для цитирования в научных исследованиях

Каширин А.И., Стреналюк В.В., Филиппов П.Г. Многоуровневая классификационная модель управленческих технологий в высокотехнологичном машиностроении // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2026. Том 16. № 4А. С. 154-166. DOI: 10.34670/AR.2026.39.30.014

Ключевые слова

Управленческие технологии, машиностроение, аналитический обзор литературы, комплементарность управленческих практик, контуры обратной связи, шкала зрелости, цифровая трансформация машиностроения, Industry 4.0.

Введение

Машиностроительная отрасль переживает структурную трансформацию, обусловленную конвергенцией нескольких факторов: развитием промышленной революции (Industry 4.0, 5.0, 6.0, X...), перестройкой глобальных цепочек поставок после 2020 г. и сокращением жизненных циклов продукции. При этом эмпирические наблюдения отраслевых аналитиков и академических исследователей фиксируют устойчивое расхождение результатов: при сопоставимых инвестициях в технологии одни компании достигают значительного роста производительности, тогда как другие получают ограниченный эффект [McKinsey Global Institute, 2024; Buer et al., 2018]. Это расхождение лежит в основе исследовательского вопроса настоящей работы.

Настоящая статья представляет собой аналитический обзор литературы, дополненный авторской интегрирующей классификационной моделью. Авторы представляют в данной работе концептуальный обзор научных источников по теме. Стратегия поиска и критерии отбора описаны в разделе 2.

Определим некоторые используемые в работе понятия. Под управленческой технологией в настоящей работе понимается воспроизводимая совокупность методов, процедур, ролей, артефактов и метрик, посредством которой организация преобразует ресурсы (включая знания и данные) в управляемые результаты на заданном горизонте и для заданного объекта управления. Уровень модели — класс управленческих технологий, объединённых по объекту

управления, горизонту планирования и типу решаемых задач. Контур обратной связи — идентифицируемая последовательность преобразований показателя или решения, возвращающаяся к своему источнику и изменяющая состояние или цели входной точки; усиливающий контур повышает отклонение от исходного состояния, стабилизирующий — снижает. Высокотехнологичное машиностроение — подотрасль машиностроения, для которой характерны: высокая доля НИОКР в выручке (по российской классификации — ОКВЭД 26, 28, 30 и сопредельные подгруппы), сложные киберфизические изделия, длинный инженерный цикл (от 12 месяцев), серийное и мелкосерийное производство; границы применимости результатов — крупные и средние предприятия с собственным инженерным циклом разработки.

Существующие обзоры, как правило, фокусируются на одном-двух фреймворках (например, интеграция Lean и Six Sigma [Snee, 2010]; SAFe и DevOps [Putta et al., 2019]; Lean и Industry 4.0 [Buer et al., 2018]) и не выходят на уровень целостной архитектуры управления предприятием. Соответственно, исследовательский пробел состоит в отсутствии интегрированной классификационной рамки, которая (а) соотносит разнородные фреймворки по объекту и горизонту управления, (б) описывает механизмы их взаимодействия и (в) объясняет, при каких условиях изолированное внедрение даёт ограниченный эффект.

Цель статьи — на основе аналитического обзора предложить классификационную модель управленческих технологий для высокотехнологичного машиностроения, описать механизмы взаимодействия между уровнями и сформулировать условия, при которых комплементарность фреймворков связана с устойчивостью конкурентного преимущества.

Гипотеза в фальсифицируемой формулировке. При прочих равных (отрасль, тип продукции, размер предприятия, объём инвестиций в R&D и цифровизацию) предприятия, у которых все пять уровней авторской модели достигают зрелости не ниже 3-го (Defined) по предложенной шкале и одновременно реализуют не менее четырёх из шести описанных контуров обратной связи, демонстрируют статистически значимо более высокие значения композитного показателя результативности (производительность труда, доля НИОКР, сокращение time-to-market, ОЕЕ), чем предприятия, у которых одновременно зрелость трёх и более уровней ниже 3-го либо реализовано менее трёх контуров. Гипотеза опровергается, если на представительной выборке таких предприятий ($N \geq 50$) при контроле перечисленных переменных различие в композитном показателе статистически не значимо или направлено противоположно. Эмпирическая проверка гипотезы выходит за рамки настоящего обзора и обозначена как направление дальнейших исследований.

Работа вносит вклад в две области. Для специальности 5.2.3 — классификация и операционализация управленческих источников конкурентоспособности высокотехнологичного машиностроения как отраслевого комплекса. Для специальности 5.2.6 — адаптация принципа комплементарности организационных практик [Milgrom, Roberts, 1990, 1995] к контексту высокотехнологичного производства; авторами не утверждается новизна самого принципа, предложена его отраслевая операционализация и связь с шкалой зрелости уровней.

Методология обзора

Данная работа представляет собой аналитический и концептуальный обзор литературы.

Критерии включения и исключения

Включались: рецензируемые статьи и обзоры; монографии и канонические руководства;

международные стандарты и эталонные архитектуры; русскоязычные публикации из перечня ВАК; концептуальные работы при наличии цитируемости в рецензируемой литературе. Исключались: тезисы конференций объёмом менее 4 страниц; работы по непрерывным производствам (химическая, пищевая промышленность); нерецензируемые корпоративные отчёты, использовавшиеся ограниченно — только в качестве иллюстративных свидетельств с явным указанием источника и его коммерческого характера. Препринты (arXiv и др.) использовались исключительно при отсутствии рецензированного эквивалента и явно помечались как препринты в тексте; на них не строились сильные причинные утверждения.

Результаты: ландшафт управленческих технологий

Типология артефактов

В литературе по управлению высокотехнологичным производством под общим зонтиком «управленческие технологии» соседствуют сущности разной природы. Для устранения категориальной неоднородности вводится следующая типология артефактов, применяемая далее ко всем элементам уровней А–Е:

Таблица 1 – Типология артефактов управления

Тип артефакта	Краткое определение	Примеры из текста
Метод	Воспроизводимая процедура мышления и/или действия с явным алгоритмом	Design Thinking; ТРИЗ; DMAIC
Фреймворк	Согласованный набор ролей, артефактов, церемоний и метрик	SAFe; OKR; Industrial DevOps
Стандарт	Нормативный документ, устанавливающий обязательные или согласованные требования	ISO 9001; IATF 16949; IEC 61508; ISO/IEC/IEEE 15288
Эталонная архитектура	Структурированная классификация и навигационная карта объектов цифровизации	RAMI 4.0
Класс корпоративных систем / артефактов	Класс программных систем или цифровых объектов с устоявшейся функциональностью	PLM, MES, цифровой двойник
Свод знаний	Свод знаний по дисциплине с редактируемой структурой	SEBoK; CMMI Model
Канон / методология	Согласованная теоретическая и практическая система с философской рамкой	Lean; Six Sigma; TPM; MBSE

Эта типология применяется при описании каждого уровня и при последующей сводной таблице 4.1. Она позволяет видеть, что, например, RAMI 4.0 — это эталонная архитектура (а не фреймворк управления), MBSE — методология (а не инструмент), а SEBoK — свод знаний, не сравнимый напрямую с конкретным фреймворком.

Уровень А: Понимание проблемы и проектирование решения

На этом уровне расположены методы и методологии, отвечающие на вопрос «Что и для кого мы создаём?» и определяющие архитектуру сложного изделия.

Design Thinking [Brown, 2009; Liedtka, 2015; Carlgren et al., 2016] (тип: метод) обеспечивает человекоцентричное проектирование через цикл эмпатия — определение проблемы — генерация идей — прототипирование — тестирование. В машиностроении применяется для проектирования эргономики рабочих мест и пользовательского опыта сложных изделий.

ТРИЗ [Альтшуллер, 1979, с. 175–193] (тип: канон/методология) — теория решения изобретательских задач, основанная на разрешении технических противоречий через систему

типовых приёмов. В рецензированной литературе фиксируется растущий интерес к интеграции ТРИЗ с большими языковыми моделями; имеющиеся работы [Zhu et al., 2024 — препринт arXiv:2408.05897; Jiang et al., 2024 — препринт arXiv:2403.13002] являются нерцензируемыми материалами, в связи с чем авторы приводят их с оговоркой. Вместе с тем, учитывая рост публикаций о совместном применении ТРИЗ с генеративными LLM, можно говорить о «втором рождении» ТРИЗ, а именно ТРИЗ+AI.

SEBoK / MBSE (тип: свод знаний / методология). Свод знаний по системной инженерии SEBoK v.2.13 поддерживается совместно BKCASE, Stevens Institute, INCOSE и IEEE Computer Society [BKCASE Editorial Board, 2024]. Жизненный цикл систем регламентирован стандартом ISO/IEC/IEEE 15288:2023 [ISO/IEC/IEEE, 2023]. MBSE (Model-Based Systems Engineering) [INCOSE, 2023] обеспечивает модельную инженерию сложных киберфизических изделий.

Уровень В: Стратегическое целеполагание и портфельное управление

OKR [Doerr, 2018] (тип: фреймворк целеполагания) обеспечивает каскадирование стратегических целей через всю организацию с квартальным циклом. SAFe на портфельном уровне (Lean Portfolio Management) [Scaled Agile, 2023] (тип: фреймворк) предоставляет механизм управления потоком инвестиций через стратегические темы и «эпики» (крупные инициативы по разработке решений, которые требуют значительных инвестиций и охватывают несколько потоков создания ценности, интервалов планирования (PI) и, как правило, нескольких потоков - Agile Release Trains (ART). Для машиностроения отмечается необходимость согласования длинных аппаратных и быстрых программных циклов [Putta et al., 2019].

Уровень С: Организация разработки и доставки

SAFe на командном уровне (Agile Release Trains) [Scaled Agile, 2023] (тип: фреймворк) обеспечивает синхронизацию кросс-функциональных команд через PI Planning. Industrial DevOps (тип: фреймворк) [Putta et al., 2019; Forsgren et al., 2018] расширяет принципы DevOps на киберфизические системы и включает цифровые двойники для виртуальной верификации [Grieves, Vickers, 2017; Glaessgen, Stargel, 2012]. Конкретные количественные оценки эффектов внедрения SAFe и Industrial DevOps в дискретном производстве приводятся в литературе преимущественно по корпоративным отчётам с возможным конфликтом интересов; в настоящей работе они опущены, общее направление эффекта обозначено качественно.

Уровень D: Цифровая архитектура предприятия

RAMI 4.0 [DIN SPEC 91345:2016; Hankel, Rexroth, 2015; Plattform Industrie 4.0, 2020] (тип: эталонная архитектура) — трёхмерная карта (архитектурные слои × жизненный цикл × иерархия предприятия), задающая навигацию для цифровизации. PLM и цифровой двойник [Grieves, Vickers, 2017; Glaessgen, Stargel, 2012] (тип: класс корпоративных систем / цифровых артефактов) обеспечивают сквозную прослеживаемость изделия от CAD-модели до эксплуатации.

Уровень E: Операционное совершенство

Lean (тип: канон/методология) [Womack, Jones, 2003] и его расширение Lean 4.0 [Kolberg, Zühlke, 2015; Buer et al., 2018] интегрируют классические инструменты TPS (Kanban, Kaizen, 5S, SMED) с IoT-сенсорами и предиктивным обслуживанием. Six Sigma (тип: канон/методология) [Pyzdek, Keller, 2018; Snee, 2010] обеспечивает статистическое управление вариабельностью процессов через цикл DMAIC. TPM (тип: канон/методология) [Nakajima, 1988; Ahuja, Khamba, 2008] нацелен на максимизацию OEE (Overall Equipment Effectiveness) и в контексте Industry 4.0 трансформируется в предиктивное обслуживание. Качество и регуляторное соответствие

обеспечиваются стандартами серии ISO 9001 [ISO, 2015], IATF 16949 [IATF, 2016] и функциональной безопасностью IEC 61508 [IEC, 2010].

Авторская классификационная модель

На основе проведённой работы и введённой в разделе 3.1 типологии предлагается классификационная модель, организующая управленческие технологии в пять уровней с четырьмя сквозными функциональными подсистемами и шестью рабочими контурами обратной связи (рис. 1). Модель является авторской конструкцией: она не получена формальной процедурой агрегации эмпирических данных и подлежит дальнейшей эмпирической проверке.

Архитектура модели

Таблица 2 – Архитектура многоуровневой классификационной модели

Уровень	Название	Артефакты (тип)	Ключевой вопрос	Горизонт
A	Понимание и проектирование	Design Thinking (метод); ТРИЗ (методология); SEBoK (свод знаний); MBSE (методология); ISO/IEC/IEEE 15288 (стандарт)	Что и для кого создаём?	Годы
B	Стратегия и портфель	OKR (фреймворк); SAFe LPM (фреймворк)	Куда идём и что финансируем?	Кварталы-годы
C	Организация разработки	SAFe ART (фреймворк); Industrial DevOps (фреймворк)	Как строим и доставляем?	Недели-месяцы
D	Цифровая архитектура	RAMI 4.0 (эталонная архитектура); PLM, цифровой двойник (классы систем/артефактов)	На какой инфраструктуре работаем?	Годы
E	Операционное совершенство	Lean / Lean 4.0 (методология); Six Sigma (методология); TPM (методология); ISO 9001, IATF 16949, IEC 61508 (стандарты)	Как ежедневно поддерживаем качество и эффективность?	Дни-недели

Сквозные функциональные подсистемы

Модель выделяет четыре сквозные подсистемы, каждая из которых формулируется не как «уровень», а как инвариантное требование, проявляющееся на каждом уровне А–Е. Авторы отдельно оговаривают, что выбор именно четырёх подсистем не претендует на исчерпывающий список; в частности, кибербезопасность, управление талантами и регуляторное соответствие могут быть рассмотрены как отдельные подсистемы и составляют направление дальнейшей работы.

(1) Управление данными и принятие решений на их основе — единый принцип на каждом уровне (А — пользовательские исследования, В — OKR-метрики, С — CI/CD-метрики, D — данные MES/SCADA, Е — карты статистического контроля процессов).

(2) Устойчивость цепочек поставок — сценарное моделирование, диверсификация поставщиков, цифровая прослеживаемость потоков сырья и комплектующих.

(3) Управление знаниями — кодификация экспертизы, не-обвиняющие разборы инцидентов, корпоративные академии.

(4) Качество и безопасность — нормативный контур, заданный стандартами ISO 9001, IATF 16949, IEC 61508 и аналогичными; устанавливает обязательные требования, которые не могут быть отменены ни одним уровневый фреймворком.

Шкала зрелости уровней

Для превращения классификационной модели в применимый диагностический инструмент предлагается пятиступенчатая шкала зрелости каждого уровня А–Е, выстроенная по аналогии с CMMI [CMMI Institute, 2018]. Шкала является авторским предложением и требует валидации.

Таблица 3 – Шкала зрелости уровней (адаптация CMMI к классификационной модели)

Уровень зрелости	Название	Критерии
1	Initial (начальный)	Практики уровня применяются эпизодически, по инициативе отдельных подразделений; формальные артефакты отсутствуют или фрагментарны
2	Managed (управляемый)	Практики применяются регулярно в части подразделений; есть базовые роли, регламенты и метрики; результаты повторяемы внутри подразделения
3	Defined (определённый)	Практики стандартизованы в масштабе предприятия; описаны процессы, артефакты, метрики, ответственные; есть процедура обучения и аудита
4	Quantitatively Managed (количественно управляемый)	Действуют статистически контролируемые метрики уровня; устанавливаются целевые значения и допуски; решения принимаются на основе данных
5	Optimizing (оптимизирующий)	Уровень непрерывно улучшается на основе количественных данных; интегрирован с другими уровнями через идентифицированные контуры обратной связи

Контуры обратных связей (авторская рабочая модель)

Описанные ниже шесть контуров представляют собой авторскую рабочую модель и не являются результатом формального системно-динамического анализа. Принцип отбора: выделялись связи, (а) подтверждаемые качественно как минимум двумя источниками из включённой выборки и (б) проходящие через границы как минимум двух уровней модели. Деление на «3 усиливающих + 3 стабилизирующих» отражает текущую экспертную позицию авторов; при последующей формализации число контуров может измениться. Утверждение о «нарастающем разрыве» с конкурентами заменено на формулировку «качественно нарастающий разрыв при определённых параметрах»; утверждение о его «экспоненциальном» характере, для которого требуется дифференциальная или разностная модель и эмпирические временные ряды, снято и обозначено как направление дальнейшего исследования через построение имитационной системно-динамической модели.

Таблица 4 – Рабочий перечень контуров обратной связи (авторская модель)

№	Контур	Тип	Хар. задержка	Уровни
R1	Талант → продукт → бренд работодателя → талант	Усиливающий	1–3 года	А — В — Е
R2	Данные → продукт → пользователи → данные	Усиливающий	Дни — недели	С — D — Е — А
R3	Платформа → экосистема партнёров → масштаб → платформа	Усиливающий	Месяцы — годы	D — В
B1	Сбой → разбор инцидента → улучшение процесса	Стабилизирующий	Дни — недели	Е — С

№	Контур	Тип	Хар. задержка	Уровни
B2	OKR-цикл → метрики → коррекция целей	Стабилизирующий	Квартал	В — С — В
B3	Рост → бюрократизация → реорганизация	Стабилизирующий	1–5 лет	В — А

Обсуждение

Адаптация принципа комплементарности к высокотехнологичному машиностроению

Содержательная рамка обсуждения опирается на принцип комплементарности организационных практик [Milgrom, Roberts, 1990, 1995]: практики являются комплементарными, если внедрение одной повышает предельную отдачу от другой, и поэтому поддаются совместному изменению, а не отдельной оптимизации. Авторы не претендуют на новизну самого принципа; вклад настоящей работы состоит в его отраслевой операционализации применительно к высокотехнологичному дискретному машиностроению через классификационную модель и шкалу зрелости. В операциональном плане это означает, что низкая зрелость одного уровня уменьшает отдачу от инвестиций в зрелость другого уровня; в частности, OKR на уровне В без операционных метрик уровня Е теряют связь с реальностью производства, Industrial DevOps на уровне С без архитектурного контроля уровня А приводит к накоплению технического долга, а Lean на уровне Е без цифровой инфраструктуры уровня D ограничен в эффекте предиктивного обслуживания. Эти наблюдения формулируются как экспертные суждения авторов, основанные на нарративном синтезе литературы, и подлежат последующей эмпирической проверке.

Практические наблюдения

Ниже приведены практические наблюдения авторов о типичных причинах ограниченного эффекта при изолированном внедрении управленческих технологий. Они оформлены как авторские наблюдения, а не как обобщение эмпирических данных:

— Lean без цифровой инфраструктуры: ручной сбор данных для статистического контроля процессов вносит задержку, обесценивающую идею оперативного управления вариабельностью.

— DevOps без системной инженерии: частые релизы без архитектурного контроля приводят к накоплению технического долга и хрупкости изделия.

— OKR без операционных метрик: амбициозные цели без привязки к показателям цеха создают риск формального заполнения отчётности без реального управления.

Ограничения исследования

Исследование имеет следующие ограничения. (1) Источниковедческое: преобладание ИТ-источников при заявленном фокусе на машиностроении; ограниченное использование первичных отраслевых данных и статистики. (2) Языковое: обзор охватывает публикации на английском и русском языках, что вносит языковое смещение. (3) Эмпирическое: классификационная модель, шкала зрелости и контуры обратной связи являются авторскими конструкциями и не валидированы на представительной отраслевой выборке. (4) Селективность: возможен риск селективного цитирования; количественные оценки эффектов даны качественно. (5) Внешняя валидность: модель сформирована на материале крупных промышленных корпораций; перенос на средний бизнес и развивающиеся экономики требует отдельной валидации.

Заключение

В статье предложена классификационная пятиуровневая модель управленческих технологий для высокотехнологичного машиностроения, объединяющая методы понимания проблемы и системного проектирования (уровень А), стратегического целеполагания и портфельного управления (В), организации разработки и доставки (С), цифровой архитектуры предприятия (D) и операционного совершенства (Е).

Ключевые результаты, сделанные в рамках настоящей работы и подтверждаемые её материалом: (1) введена типология артефактов (метод, фреймворк, стандарт, эталонная архитектура, класс корпоративных систем, свод знаний, канон/методология), что снимает категориальную неоднородность управленческих технологий; (2) сформулирована фальсифицируемая гипотеза о связи полноты покрытия уровней и контуров обратной связи с показателями конкурентоспособности (см. раздел 1); (3) предложена пятиступенчатая шкала зрелости уровней (адаптация СММИ), позволяющая использовать модель как диагностический инструмент; (4) описана авторская рабочая модель шести межуровневых контуров обратной связи с явным указанием характера задержек и оговоркой о её предварительности.

Теоретический вклад работы состоит в адаптации принципа комплементарности организационных практик [Milgrom, Roberts, 1990, 1995] к контексту высокотехнологичного машиностроения; авторы не претендуют на новизну самого принципа.

Направления дальнейших исследований: (1) эмпирическая проверка фальсифицируемой гипотезы на выборке российских машиностроительных предприятий с использованием статистических данных Росстата и ЕМИСС; (2) построение системно-динамической имитационной модели контуров обратной связи и проверка условий, при которых возникает нарастающий разрыв между предприятиями; (3) валидация шкалы зрелости через экспертные опросы и кейс-исследования; (4) расширение списка сквозных функциональных подсистем (кибербезопасность, управление талантами, регуляторное соответствие).

Заявление об использовании инструментов обработки текста. В соответствии с редакционными политиками COPE/Elsevier/Springer 2024–2025, авторы заявляют, что при подготовке отдельных фрагментов текста использовались инструменты автоматизированной редактуры; концептуальный замысел, отбор источников, формулировки модели, гипотезы и выводов выполнены авторами; ответственность за все факты и формулировки несут авторы.

Библиография

1. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука: теория решения изобретательских задач. М.: Советское радио, 1979. 184 с.
2. Ahuja I.P.S., Khamba J.S. Total productive maintenance: literature review and directions // International Journal of Quality & Reliability Management. 2008. Vol. 25, No. 7. P. 709-756. DOI: 10.1108/02656710810890890.
3. BKCASE Editorial Board. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). Hoboken, NJ: The Trustees of the Stevens Institute of Technology, 2024. URL: <https://www.sebokwiki.org/>
4. Braun V., Clarke V. Using thematic analysis in psychology // Qualitative Research in Psychology. 2006. Vol. 3, No. 2. P. 77-101. DOI: 10.1191/1478088706qp0630a.
5. Brown T. Change by Design: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation. New York: Harper Business, 2009. 264 p.
6. Buer S.V., Strandhagen J.O., Chan F.T.S. The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda // International Journal of Production Research. 2018. Vol. 56, No. 8. P. 2924-2940. DOI: 10.1080/00207543.2018.1442945.
7. Carlgren L., Rauth I., Elmquist M. Framing Design Thinking: The Concept in Idea and Enactment // Creativity and Innovation Management. 2016. Vol. 25, No. 1. P. 38-57. DOI: 10.1111/caim.12153.

8. CMMI Institute. CMMI Model V2.0. Pittsburgh, PA: CMMI Institute, 2018. URL: <https://cmmiinstitute.com/>
9. DIN SPEC 91345:2016-04. Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Berlin: Beuth Verlag, 2016.
10. Doerr J. Measure What Matters: How Google, Bono, and the Gates Foundation Rock the World with OKRs. New York: Portfolio/Penguin, 2018. 320 p.
11. Forsgren N., Humble J., Kim G. Accelerate: The Science of Lean Software and DevOps. Portland, OR: IT Revolution Press, 2018. 288 p.
12. Glaessgen E., Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, Hawaii, 2012. AIAA 2012-1818. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
13. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / Kahlen F.J. et al. (eds). Cham: Springer, 2017. P. 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
14. Hankel M., Rexroth B. The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Frankfurt: ZVEI/VDI, 2015. 2 p.
15. IATF 16949:2016. Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. International Automotive Task Force, 2016.
16. IEC 61508:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.
17. INCOSE. Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2023. 320 p.
18. ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
19. ISO/IEC/IEEE 15288:2023. Systems and software engineering – System life cycle processes. Geneva: ISO, 2023.
20. Jiang S., Hu J., Magee C.L., Luo J. AutoTRIZ: Artificial Ideation with TRIZ and Large Language Models. Препринт. arXiv:2403.13002. 2024.
21. Kolberg D., Zühlke D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, No. 3. P. 1870-1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359.
22. Liedtka J. Perspective: Linking Design Thinking with Innovation Outcomes through Cognitive Bias Reduction // Journal of Product Innovation Management. 2015. Vol. 32, No. 6. P. 925-938. DOI: 10.1111/jpim.12163.
23. McKinsey Global Institute. McKinsey Technology Trends Outlook 2024. McKinsey & Company, 2024. URL: <https://www.mckinsey.com/>
24. Milgrom P., Roberts J. The Economics of Modern Manufacturing: Technology, Strategy, and Organization // American Economic Review. 1990. Vol. 80, No. 3. P. 511-528.
25. Milgrom P., Roberts J. Complementarities and fit: strategy, structure, and organizational change in manufacturing // Journal of Accounting and Economics. 1995. Vol. 19, No. 2-3. P. 179-208. DOI: 10.1016/0165-4101(94)00382-F.
26. Nakajima S. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988. 129 p.
27. Page M.J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews // BMJ. 2021. Vol. 372. n71. DOI: 10.1136/bmj.n71.
28. Plattform Industrie 4.0. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) – An Introduction. Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020. URL: <https://www.plattform-i40.de/>
29. Putta A., Paasivaara M., Lassenius C. Benefits and Challenges of Adopting the Scaled Agile Framework (SAFe): Preliminary Results from a Multivocal Literature Review // Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming (XP 2019). LNBP, vol. 355. Cham: Springer, 2019. P. 334-351. DOI: 10.1007/978-3-030-19034-7_24.
30. Pyzdek T., Keller P. The Six Sigma Handbook. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2018. 736 p.
31. Scaled Agile Inc. SAFe 6.0 Framework. Boulder, CO: Scaled Agile, 2023. URL: <https://scaledagileframework.com/>
32. Snee R.D. Lean Six Sigma – getting better all the time // International Journal of Lean Six Sigma. 2010. Vol. 1, No. 1. P. 9-29. DOI: 10.1108/20401461011033130.
33. Womack J.P., Jones D.T. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. Rev. ed. New York: Free Press, 2003. 400 p.
34. Zhu Q., Luo J. TRIZ-GPT: An LLM-augmented method for problem-solving. Препринт. arXiv:2408.05897. 2024.

A Multi-Level Classification Model of Management Technologies in High-Tech Machine Building

Aleksandr I. Kashirin

Doctor of Economic Sciences, Associate Professor,
Head of the Basic Department
of the State Corporation "Rostec" at RUDN University,
Deputy Chairman of the Scientific
and Technical Council of the State Corporation "Rostec",
Professor of the Basic Department of the State
Corporation "Rostec" at Plekhanov Russian University of Economics,
117198, 6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russian Federation;
e-mail: alexkashirin@mail.ru

Vadim V. Strenalyuk

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor of the Basic Department
of the State Corporation "Rostec" at RUDN University,
Project Manager for Advanced Innovative Development
of the Scientific and Technical Council of the State Corporation "Rostec",
Research Fellow of the Basic Department
of the State Corporation "Rostec" at Plekhanov Russian University of Economics,
117198, 6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russian Federation;
e-mail: vstren@mail.ru

Pavel G. Filippov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Project Manager for Scientific and Technical Expertise
of the Scientific and Technical Council of the State Corporation "Rostec",
125424, 75A, Volokolamskoe highway, Moscow, Russian Federation;
e-mail: p.g.filippov@rostec.ru

Abstract

Amid the transformation of high-tech machine building, a stable divergence of economic results is observed in global practice given comparable investment volumes: some enterprises achieve multiple growth in indicators, while others experience a limited effect. Existing reviews are generally devoted to individual management approaches (Lean, Agile, DevOps, OKR), which leaves open the question of an integrating framework. An analytical literature review for 2018–2025 was conducted using Scopus, Web of Science, and RSCI databases; the search strategy, inclusion/exclusion criteria, and coding scheme are described in Section 2. The authors propose an original classification five-level model of management technologies in machine building; a typology of artifacts is introduced (method, framework, standard, reference architecture, body of knowledge);

Kashirin A.I., Strenalyuk V.V., Filippov P.G.

four cross-cutting functional subsystems and six working feedback loops (3 reinforcing and 3 stabilizing) are described as an original construct subject to further empirical verification. A falsifiable hypothesis is formulated regarding the relationship between the completeness of level coverage and competitiveness indicators. The authors propose a five-level maturity scale (by analogy with CMMI). For specialty 5.2.3 – industry-specific operationalization of machine building competitiveness factors; for 5.2.6 – adaptation of the Milgrom–Roberts (1990, 1995) complementarity principle to the context of high-tech discrete manufacturing. Practical significance. The model is applicable as a diagnostic tool for assessing the managerial maturity of an enterprise and planning transformation.

For citation

Kashirin A.I., Strenalyuk V.V., Filippov P.G. (2026) Mnogourovnevaya klassifikatsionnaya model' upravlencheskikh tekhnologiy v vysokotekhnologichnom mashinostroenii [A Multi-Level Classification Model of Management Technologies in High-Tech Machine Building]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 16 (4A), pp. 154-166. DOI: 10.34670/AR.2026.39.30.014

Keywords

Management technologies, machine building, analytical literature review, complementarity of management practices, feedback loops, maturity scale, digital transformation of machine building, Industry 4.0.

References

1. Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: Literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(7), 709-756. <https://doi.org/10.1108/02656710810890890>
2. Altshuller, G. S. (1979). *Tvorchestvo kak tochnaya nauka: teoriya resheniya izobretatelskikh zadach* [Creativity as an exact science: Theory of inventive problem solving]. Sovetskoye Radio.
3. BKCASE Editorial Board. (2024). *Guide to the systems engineering body of knowledge (SEBoK)*. The Trustees of the Stevens Institute of Technology. <https://www.sebokwiki.org/>
4. Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp0630a>
5. Brown, T. (2009). *Change by design: How design thinking transforms organizations and inspires innovation*. Harper Business.
6. Buer, S. V., Strandhagen, J. O., & Chan, F. T. S. (2018). The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2924-2940. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442945>
7. Carlgren, L., Rauth, I., & Elmquist, M. (2016). Framing design thinking: The concept in idea and enactment. *Creativity and Innovation Management*, 25(1), 38-57. <https://doi.org/10.1111/caim.12153>
8. CMMI Institute. (2018). *CMMI model V2.0*. <https://cmmiinstitute.com/>
9. DIN SPEC 91345:2016-04. (2016). *Reference architecture model industrie 4.0 (RAMI 4.0)*. Beuth Verlag.
10. Doerr, J. (2018). *Measure what matters: How Google, Bono, and the Gates Foundation rock the world with OKRs*. Portfolio/Penguin.
11. Forsgren, N., Humble, J., & Kim, G. (2018). *Accelerate: The science of lean software and DevOps*. IT Revolution Press.
12. Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. AIAA 2012-1818. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
13. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F. J. Kahlen et al. (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85-113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
14. Hankel, M., & Rexroth, B. (2015). *The reference architectural model industrie 4.0 (RAMI 4.0)*. ZVEI/VDI.
15. IATF 16949:2016. (2016). *Quality management system requirements for automotive production and relevant service*

-
- parts organizations. International Automotive Task Force.
16. IEC 61508:2010. (2010). *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*. International Electrotechnical Commission.
 17. INCOSE. (2023). *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities* (5th ed.). Wiley.
 18. ISO 9001:2015. (2015). *Quality management systems – Requirements*. International Organization for Standardization.
 19. ISO/IEC/IEEE 15288:2023. (2023). *Systems and software engineering – System life cycle processes*. ISO.
 20. Jiang, S., Hu, J., Magee, C. L., & Luo, J. (2024). *AutoTRIZ: Artificial ideation with TRIZ and large language models*. arXiv preprint. arXiv:2403.13002.
 21. Kolberg, D., & Zühlke, D. (2015). Lean automation enabled by Industry 4.0 technologies. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1870-1875. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.359>
 22. Liedtka, J. (2015). Perspective: Linking design thinking with innovation outcomes through cognitive bias reduction. *Journal of Product Innovation Management*, 32(6), 925-938. <https://doi.org/10.1111/jpim.12163>
 23. McKinsey Global Institute. (2024). *McKinsey technology trends outlook 2024*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/>
 24. Milgrom, P., & Roberts, J. (1990). The economics of modern manufacturing: Technology, strategy, and organization. *American Economic Review*, 80(3), 511-528.
 25. Milgrom, P., & Roberts, J. (1995). Complementarities and fit: Strategy, structure, and organizational change in manufacturing. *Journal of Accounting and Economics*, 19(2-3), 179-208. [https://doi.org/10.1016/0165-4101\(94\)00382-F](https://doi.org/10.1016/0165-4101(94)00382-F)
 26. Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total productive maintenance*. Productivity Press.
 27. Page, M. J., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
 28. Plattform Industrie 4.0. (2020). *Reference architectural model industrie 4.0 (RAMI 4.0) – An introduction*. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. <https://www.plattform-i40.de/>
 29. Putta, A., Paasivaara, M., & Lassenius, C. (2019). Benefits and challenges of adopting the Scaled Agile Framework (SAFe): Preliminary results from a multivocal literature review. In *Agile processes in software engineering and extreme programming (XP 2019)* (LNBIP, Vol. 355, pp. 334-351). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19034-7_24
 30. Pyzdek, T., & Keller, P. (2018). *The six sigma handbook* (5th ed.). McGraw-Hill.
 31. Scaled Agile Inc. (2023). *SAFe 6.0 framework*. <https://scaledagileframework.com/>
 32. Snee, R. D. (2010). Lean Six Sigma – getting better all the time. *International Journal of Lean Six Sigma*, 1(1), 9-29. <https://doi.org/10.1108/20401461011033130>
 33. Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation* (Rev. ed.). Free Press.
 34. Zhu, Q., & Luo, J. (2024). *TRIZ-GPT: An LLM-augmented method for problem-solving*. arXiv preprint. arXiv:2408.05897.
-