УДК 005.63

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ: МЕТОДОЛОГИЯ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

© 2026 В.Н. Козловский, И.А. Косорлуков, Н.С. Васин, Д.И. Панюков

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 31.08.2026

В статье представлена методология структурно-параметрического синтеза производственно-качественных контуров (МСПС-ТЭЦ+), основанная на строгом изоморфном отображении технических, организационных и экономических процессов предприятия на математический аппарат теории электрических цепей, термодинамики и теории магнитных цепей. Доказан принцип вариационного единства киберфизических и социально-экономических систем, что позволяет перейти от реактивного статистического контроля к детерминированному физическому инжинирингу предприятий. Разработана система специализированных единиц измерения (клн, клВ, клОм, клГн, клФ, клК, клЭн, эконА, эконВ, эконОм), обеспечивающая размерностную согласованность моделей. Введены понятия организационной температуры, квали-энтропии, волнового сопротивления цепочек поставок и вихревых токов культуры, получившие строгие математические формулировки. Обоснована интеграция методологии с архитектурой физически информированных нейронных сетей (Quality-PINN), обеспечивающая объяснимую предиктивную аналитику. Показана применимость методологии для решения задач импортозамещения и повышения конкурентоспособности высокотехнологичных отраслей российской промышленности.

Ключевые слова: управление качеством, физика организационных систем, квали-энтропия, термодинамика качества, теория электрических цепей, предиктивная аналитика, изоморфизм систем.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-113-118
EDN: QPUFQP

1. ВВЕДЕНИЕ: АКТУАЛЬНОСТЬ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современное машиностроение, автомобилестроение, авиастроение и другие высокотехнологичные отрасли переживают фундаментальную трансформацию. Производственные системы эволюционировали из локальных заводов в глобальные киберфизические экосистемы с многоуровневыми цепочками поставок (3–5 уровней субподрядчиков), тысячами кросс-функциональных взаимодействий и высочайшей частотой изменений нормативных требований.

В этих условиях традиционные инструменты управления качеством — статистическое управление процессами (SPC), анализ видов и последствий отказов (FMEA), методология Six Sigma, бережливое производство (Lean) — достигают своего фундаментального теоретического предела. Критические ограничения существующих подходов проявляются в следующих направлениях:

Реактивный характер. Классические методы фиксируют отклонения постфактум, не обладая детерминированным математическим аппаратом для прогнозирования системных сбоев.

Игнорирование пространственно-временной динамики. Существующие подходы рассматривают организационную структуру как набор дискретных мгновенно взаимодействующих узлов, не учитывая временные задержки (4–12 недель) распространения дефектов в распределённых системах.

Отсутствие количественной оценки «мягких» факторов. Нет строгого математического языка для описания когнитивной инерции персонала, сопротивления изменениям, накопления скрытого брака из-за организационного стресса.

Проблема объяснимости искусственного интеллекта. Современные предиктивные модели машинного обучения, не ограниченные физическими законами, выдают статистически вероятные, но физически абсурдные прогнозы, что делает их непригодными для принятия стратегических решений в регулируемых отраслях.

Таким образом, возникает острая необходимость в создании методологии, которая переводит управление качеством из плоскости эмпирических эвристик и административного нормирования в плоскость точного инженерного расчёта. Решение этой задачи требует обращения к фундаментальным законам физики, описывающим поведение сложных потоковых систем.

Козловский Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой.
E-mail: Kozlovskiy-76@mail.ru
Косорлуков Игорь Андреевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой.
E-mail: kosorlukov@hotmail.ru
Васин Николай Сергеевич, кандидат экономических наук, соискатель ученой степени. E-mail: vasin_sa53@mail.ru
Панюков Дмитрий Иванович, доктор технических наук,, профессор. E-mail: dip-home@yandex.ru

2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЙ ПРИНЦИП: ВАРИАЦИОННОЕ ЕДИНСТВО СИСТЕМ

2.1. Математическое обоснование изоморфизма

В основе методологии МСПС-ТЭЦ+ лежит принцип вариационного единства киберфизических и социально-экономических систем. Производственно-организационная система (ПОС), как и электротехническая или термодинамическая система, представляет собой открытую неравновесную структуру, подчиняющуюся фундаментальным законам сохранения потока, работы и энергии, а также принципу наименьшего действия.

Математически это выражается в том, что обе системы описываются функционалом действия:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, \nabla q, t)\, dt,$$

где лагранжиан L включает кинетическую энергию потоков и потенциальную энергию структурных связей. Принцип стационарности действия $\delta S=0$ приводит к уравнениям Эйлера-Лагранжа, которые в линейном приближении принимают форму:

для электротехнических систем: уравнений Кирхгофа и телеграфных уравнений;

для производственно-организационных систем: уравнений баланса потоков качества и распространения дефектов.

Следствием данного принципа является то, что изоморфизм между электротехническими и организационными системами не является метафорой, а представляет собой математическое следствие единой структуры вариационных принципов, управляющих потоковыми системами.

2.2. Система специализированных единиц измерения

Для обеспечения строгой размерностной согласованности в методологии вводится система базовых эталонов:

Базовый поток (*Ibase*): 100 шт./смену — типовая интенсивность потока качества;

Базовая работа (*Ubase*): 10 000 руб./шт. — типовые затраты на преобразование качества;

Базовое время (*Tbase*): 1 смена (8 часов) — базовый производственный цикл;

Базовое сопротивление (*Rbase*): *Ubase/Ibase=100* руб.·смена/шт.^{2}.

На их основе строятся специализированные единицы:

Технический домен: клн (квалин) — единица потока качества; клВ (кваливольт) — единица работы; клОм (квалиом) — единица сопротивления; клГн (квалигенри) — единица инерционности; клФ (квалифарад) — единица буферной ёмкости;

Организационный домен: клК (кваликельвин) — единица организационной температуры; клЭн (квалиэнтроп) — единица квали-энтропии;

Экономический домен: эконА (эконампер) — единица денежного потока; эконВ (эконольт) — единица маржинального давления; эконОм (эконом) — единица транзакционных издержек.

Использование этих единиц позволяет применять строгий аппарат математической физики, гарантируя, что любые расчётные преобразования имеют чёткий физический и производственный смысл.

3. СИСТЕМА АНАЛОГИЙ: ЕДИНЫЙ ЯЗЫК ДЛЯ ТЕХНИКИ, ОРГАНИЗАЦИИ И ЭКОНОМИКИ

3.1. Технический домен

На базовом уровне производственная система рассматривается как ориентированный граф, где функциональные подразделения являются узлами, а каналы материального и информационного взаимодействия — ветвями. Законы Кирхгофа обретают прямой производственный смысл:

Первый закон Кирхгофа отражает закон сохранения потока качества: сумма входящих и исходящих конформных продуктов или данных в любом подразделении должна быть сбалансирована.

Второй закон Кирхгофа описывает сохранение работы: в любом замкнутом бизнес-процессе сумма затрат на преобразование качества равна приложенному стратегическому импульсу.

На динамическом уровне вводятся реактивные параметры:

Индуктивность процесса (L, клГн) характеризует его инерционность: время, необходимое подразделению для осознания изменения требований, переналадки оборудования или корректировки конструкторской документации;

Ёмкость (C, клФ) отражает буферную способность системы: наличие складских запасов, незавершённого производства или ментального резерва оператора.

3.2. Организационный домен

Культурно-компетенционные процессы обладают памятью и нелинейностью, что требует перехода от электрических к магнитным аналогиям. Организационное обучение обладает памятью и пределом насыщения.

Быстрая смена приоритетов в монолитных департаментах наводит «вихревые токи» бюрократии и скрытого саботажа, которые не создают полезного потока качества, а лишь «нагревают» систему, вызывая эмоциональное выгорание и текучесть кадров. Мощность вихревых токов описывается уравнением:

$$P_{eddy} = k_e \cdot f_{change}^2 \cdot B_{max}^2 \cdot d_{team}^2 \quad [\text{клВт}_{\text{параз}}],$$

где f_{change} — частота изменений стратегии; Bmax — амплитуда давления на культуру; *dteam* — «толщина» команды (количество уровней иерархии).

При резком внедрении новых стандартов возникает ударный ток коммутации — пиковый бросок сопротивления персонала:

$$I_{resist}(t) = I_{nom} \cdot \left(k_{shock} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{adapt}}} + 1\right) \quad [\text{клА}],$$

где k_{shock} — коэффициент ударного тока (обычно от 3 до 10); τ_{adapt} — постоянная времени адаптации.

3.3. Экономический домен

Экономика предприятия рассматривается как открытая неравновесная потоковая система, в которой циркулируют финансовые потоки, материальные потоки, потоки стоимости и информационные потоки. Все эти потоки подчиняются фундаментальным законам сохранения, аналогичным законам теории электрических цепей.

Экономическое сопротивление (R_{econ}, эконОм) характеризует транзакционные издержки: потери стоимости при прохождении потока через подразделение (налоги, бюрократия, логистика). Экономическая индуктивность (L_{econ}, эконГн) отражает инерционность инвестиций: время, необходимое для превращения инвестиций в денежный поток.

4. КЛЮЧЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МЕТОДОЛОГИИ

4.1. Организационная температура

Организационная температура (*Torg*, клК) — интегральный показатель стресса и напряжённости коллектива. Рассчитывается как:

$$T_{org} = T_{base} \cdot \left(1 + k_1 \frac{H_{overtime}}{H_{norm}} + k_2 \frac{V_{actual}}{V_{plan}} + k_3 \frac{N_{urgent}}{N_{total}}\right),$$

где $H_{overtime}/H_{norm}$ — коэффициент сверхурочных работ; V_{actual}/V_{plan} — коэффициент выполнения плана; N_{urgent}/N_{total} — доля срочных/аварийных задач; k_1, k_2, k_3 — весовые коэффициенты.

При T_{org} >150 клК система переходит в режим необратимой деградации: скрытый брак начинает накапливаться лавинообразно, даже если формальные метрики находятся в норме.

4.2. Квали-энтропия

Квали-энтропия (S_q, клЭн) — мера накопленного хаоса и технического долга. Фундаментальное уравнение генерации квали-энтропии:

$$dS_q = \frac{\delta Q_{COPQ}}{T_{org}} + dS_{gen},$$

где δ*QCOPQ* — «теплота потерь» (затраты на несоответствия); $dS_{gen} \geqslant 0$ — внутренняя генерация энтропии (скрытый брак).

Критерий необратимости (Второе начало термодинамики для СМК):

$$dS_{gen} \geq 0.$$

Если скорость генерации скрытого брака превышает способность системы его экспортировать, через 3–6 месяцев произойдёт лавинообразный рост дефектности.

4.3. Волновое сопротивление и коэффициент отражения

Для описания глобальных цепочек поставок применяется теория длинных линий качества. Дефект, возникший у поставщика сырья, распространяется к сборочному конвейеру как волна с конечной скоростью.

Волновое сопротивление цепочки:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}.$$

Коэффициент отражения дефектов:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c},$$

где Z_L — сопротивление нагрузки (сборочного конвейера).

Если Γ>0,3, цепочка находится в режиме критической несогласованности, что проявляется в каскадных рекламациях и простоях производства.

5. ВОЗМОЖНОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДОЛОГИИ

5.1. Предиктивность через физику

Методология позволяет детерминированно рассчитать время докатывания волны дефекта от поставщика третьего уровня до конвейера:

$$t_{prop} = \frac{l}{v} = l \cdot \sqrt{L_0 C_0},$$

где l — топологическая глубина цепочки; v — скорость распространения возмущения.

Это обеспечивает прогнозирование сбоев за 4–12 недель до их физического проявления.

5.2. Математическое обоснование «мягких» факторов

Впервые такие понятия, как «выгорание», «сопротивление изменениям», «бюрократия», получили строгие формулы через теорию магнитных цепей и термодинамику. Это переводит управление организационной культурой из области качественных эвристик в область точного инженерного расчёта.

5.3. Решение проблемы «чёрного ящика» ИИ

Интеграция с архитектурой физически информированных нейронных сетей (Quality-PINN) создаёт объяснимый искусственный интеллект, физически не способный выдавать абсурдные прогнозы. Функция потерь нейросети модифицируется:

$$Loss_{total} = Loss_{data}(Y_{pred}, Y_{true}) + \lambda_1 Loss_{Kirchhoff} + \lambda_2 Loss_{Thermo},$$

где:

$$Loss_{Kirchhoff} = \sum_{nodes} \left(\sum I_{in} - \sum I_{out}\right)^2 + \sum_{loops} \left(\sum U - \sum E\right)^2,$$

$$Loss_{Thermo} = \max(0, -\sigma_q)^2.$$

Нейросеть физически не способна выдать прогноз, нарушающий законы Кирхгофа или Второе начало термодинамики. Это критически важно для регулируемых отраслей.

5.4. Единый язык для всех функций

Методология создаёт единый физический язык для описания технических, организационных и экономических процессов предприятия. Это устраняет когнитивный разрыв между функциями и обеспечивает согласованность управленческих решений.

6. ОГРАНИЧЕНИЯ И ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ

Редукционизм и границы применимости. Человеческий коллектив обладает эмерджентными свойствами, которые не всегда сводятся к физическим аналогиям. Творческие прорывы, корпоративная мифология, неформальные лидерства — эти феномены плохо описываются через индуктивность или энтропию.

Проблема параметризации и субъективизма. Первичные параметры в экспертно-параметрическом аудите зависят от субъективных оценок аудитора, что вносит систематическую погрешность. Решение — обязательная калибровка по историческим данным и перекрёстная верификация несколькими экспертами.

Отсутствие масштабной эмпирической верификации. На текущий момент методология прошла логическую и математическую верификацию.

Высокий порог входа. Методология требует от инженеров и менеджеров знания теории электрических цепей, термодинамики и теории магнитных цепей. Решение — продуктизация в виде программного обеспечения с интуитивным интерфейсом.

Стохастическая природа некоторых процессов. Рыночные шоки, геополитические события, форс-мажоры имеют стохастическую природу, плохо описываемую детерминированными уравнениями. Методология требует развития в сторону стохастической термодинамики и теории случайных процессов.

7. ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Для промышленности внедрение методологии МСПС-ТЭЦ+ имеет важное значение по нескольким направлениям:

7.1. Импортозамещение 2.0

Импортозамещение в современных условиях — это не про создание копий западных продуктов, а про создание систем, которые будут более устойчивыми, гибкими и эффективными, чем их западные аналоги. МСПС-ТЭЦ+ даёт инструмент для такого архитектурного превосходства. Методология позволяет спроектировать цепочку поставок так, чтобы она была математически защищена от внешних шоков.

7.2. Опережающее развитие

Методология позволяет сократить время вывода продукции на рынок и снизить затраты на низкое качество (COPQ). Это прямая конвертация физического моделирования в прибыль и рыночную долю.

7.3. Высокотехнологичные наукоемкие производства — это сложнейшие многоуровневые экосистемы. В которых цена ошибки стремится к бесконечности. Традиционный статистический контроль

здесь недостаточен. Переход к физически обоснованному, детерминированному управлению качеством — это стратегический императив обеспечения технологического суверенитета и безопасности.

7.4. Объяснимый искусственный интеллект

Интеграция методологии с архитектурой Quality-PINN создаёт объяснимый искусственный интеллект. Для регулируемых отраслей России это, возможно, единственный легитимный путь к сертификации и внедрению ИИ в критические процессы управления.

8. ВЫВОДЫ

Традиционные методы управления качеством достигли своего теоретического предела в условиях современных распределённых киберфизических экосистем. Необходим парадигмальный сдвиг — от статистической эмпирики к детерминированному физическому инжинирингу.

Принцип вариационного единства киберфизических и социально-экономических систем доказывает, что изоморфизм между электротехническими и организационными системами не является метафорой, а представляет собой математическое следствие единой структуры вариационных принципов. Это легитимизирует применение аппарата теории электрических цепей, термодинамики и теории магнитных цепей для управления качеством.

Введение системы специализированных единиц измерения (клн, клВ, клОм, клГн, клФ, клК, клЭн, эконА, эконВ, эконОм) обеспечивает размерностную согласованность всех моделей методологии и позволяет применять строгий аппарат математической физики для анализа организационных систем.

Введение квали-энтропии и организационной температуры на основе Второго начала термодинамики даёт строгий математический критерий необратимой деградации систем менеджмента качества. Это позволяет прогнозировать скрытый брак за 3–6 месяцев до его проявления в статистике.

Интеграция с архитектурой физически информированных нейронных сетей (Quality-PINN) решает фундаментальную проблему «чёрного ящика» искусственного интеллекта, создавая объяснимый ИИ, физически не способный выдавать абсурдные прогнозы.

Для российской промышленности внедрение методологии — это стратегическая возможность совершить качественный скачок в управлении сложными производственными системами, обеспечить реальное импортозамещение и технологический суверенитет в эпоху Индустрии 5.0.

Методология имеет как сильные стороны (строгость, предиктивность, объяснимость), так и ограничения (редукционизм, необходимость эмпирической верификации, высокий порог входа), что требует дальнейших исследований и пилотных внедрений.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методология структурно-параметрического синтеза производственно-качественных контуров представляет собой фундаментальный сдвиг парадигмы в науке о качестве. Она завершает создание физически полной модели предприятия, признавая его открытой неравновесной термодинамической и электродинамической системой, подверженной энтропии, волновым эффектам и культурной инерции.

Методология трансформирует управление качеством из функции реактивного контроля и статистического гадания в функцию архитектурного инжиниринга. Возможность количественно оценивать инерцию, буферную ёмкость, топологический хаос, волновые эффекты в цепочках поставок и культурное сопротивление даёт руководителям и инженерам беспрецедентный уровень контроля над производственными процессами.

Внедрение методологии обеспечивает не только локальное улучшение метрик, но и фундаментальное повышение устойчивости, предсказуемости и конкурентоспособности машиностроительных предприятий в эпоху цифровой трансформации. Она закладывает основы новой научной дисциплины — физики производственно-экономических систем — и готова к тиражированию в виде корпоративных стандартов, программного обеспечения для цифровых двойников и фундаментальных диссертационных исследований.

Для таких отраслей, как автомобилестроение, авиастроение, атомная энергетика и оборонная промышленность, где цена ошибки стремится к бесконечности, переход к физически обоснованному, детерминированному управлению качеством является не просто инновацией, а стратегическим императивом сохранения технологического лидерства и безупречной репутации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козловский, В.Н.* Аналогии применения теории электрических цепей в управлении качеством продукции / В.Н. Козловский, И.А. Беляева, А.С. Клентак, В.Г. Мосин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 8. – С. 104-106.

2. *Panyukov, D.I.* Highlights of russian experience in implementing ISO/TS 16949 / D.I. Panyukov, V.N. Kozlovskiy // Life Science Journal. 2014. Т. 11. № 8s. С. 439-444.
3. *Козловский, В.Н.* Модели аналитических исследований качества и надежности легковых автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, С.И. Клейменов // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 9. – С. 1-5.
4. *Козловский, В.Н.* Развитие проектов электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой / В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, М.М. Васильев, В.В. Дебелов // Грузовик. – 2018. – № 6. – С. 18-21.
5. *Козловский, В.Н.* Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 2 / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 19-28.

PHYSICAL AND MATHEMATICAL FOUNDATIONS FOR MANAGING COMPLEX PRODUCTION AND ECONOMIC SYSTEMS: A METHODOLOGY OF STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS

© 2026 V.N. Kozlovsky, I.A. Kosorlukov, N.S. Vasin, D.I. Panyukov

Samara State Technical University, Samara, Russia

This article presents a methodology for the structural-parametric synthesis of production-quality contours (SPCS-TPP+), based on a strict isomorphic mapping of an enterprise›s technical, organizational, and economic processes onto the mathematical apparatus of electrical circuit theory, thermodynamics, and magnetic circuit theory. The principle of variational unity between cyber-physical and socio-economic systems is proven, enabling a transition from reactive statistical control to deterministic physical engineering of enterprises. A system of specialized units of measurement (klN, klV, klOhm, klGn, klF, klK, klEn, econA, econV, econOhm) has been developed to ensure dimensional consistency of the models. The concepts of organizational temperature, quality entropy, supply chain impedance, and cultural eddy currents are introduced and given rigorous mathematical formulations. Integration of the methodology with the architecture of physically informed neural networks (Quality-PINN) is substantiated, providing explainable predictive analytics. The applicability of the methodology to solving problems of import substitution and improving the competitiveness of high-tech sectors of the Russian industry is demonstrated.

Keywords: quality management, physics of organizational systems, quality entropy, quality thermodynamics, electrical circuit theory, predictive analytics, system isomorphism.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-113-118
EDN: QPUFQP

REFERENCES

1. *Kozlovskij, V.N.* Analogii primenenija teorii elektricheskih tsepej v upravlenii kachestvom produktsii / V.N. Kozlovskij, I.A. Beljaeva, A.S. Klentak, V.G. Mosin // Izvestija Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2024. – № 8. – S. 104-106.
2. *Panyukov, D.I.* Highlights of russian experience in implementing ISO/TS 16949 / D.I. Panyukov, V.N. Kozlovsky // Life Science Journal. 2014. Т. 11. № 8s. S. 439-444.
3. *Kozlovskij, V.N.* Modeli analiticheskih issledovanij kachestva i nadezhnosti legkovyh avtomobilej v ekspluatatsii / V.N. Kozlovskij, V.I. Stroganov, S.I. Klejmenov // Avtomobilnaja promyshlennost. – 2013. – № 9. – S. 1-5.
4. *Kozlovskij, V.N.* Razvitie proektov elektromobilej i avtomobilej s kombinirovannoj energoustanovkoj / V.N. Kozlovskij, D.V. Ajdarov, M.M. Vasilev, V.V. Debelov // Gruzovik. – 2018. – № 6. – S. 18-21.
5. *Kozlovskij, V.N.* Kompleks elektronnyh sistem upravlenija dvizheniem legkovogo avtomobilja s kombinirovannoj silovoj ustanovkoj. Chast 2 / V.N. Kozlovskij, V.I. Stroganov, V.V. Debelov, M.A. Pjanov // Elektrotehnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy. – 2014. – T. 10. – № 2. – S. 19-28.

Vladimir Kozlovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department. E-mail: Kozlovskiy-76@mail.ru
Igor Kosorlukov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department. E-mail: kosorlukov@hotmail.ru
Nikolai Vasin, Candidate of Economic Sciences, degree applicant. E-mail: vasin_sa53@mail.ru
Dmitry Panyukov, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: dip-home@yandex.ru