УДК 005.63

МЕТОДОЛОГИЯ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРОИЗВОДСТВЕННО-КАЧЕСТВЕННЫХ КОНТУРОВ: ТЕХНИЧЕСКИЙ КЛАСТЕР УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

© 2026 В.Н. Козловский, И.А. Косорлуков, И.В. Тимонин, А.В. Барданов

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 31.08.2026

В статье представлен технический кластер методологии структурно-параметрического синтеза производственно-качественных контуров (МСПС-ТЭЦ+), основанный на строгом изоморфном отображении технических процессов предприятия на математический аппарат теории электрических цепей. Разработана система методов топологического, динамического и распределённого анализа, обеспечивающая детерминированное моделирование, оптимизацию и верификацию систем менеджмента качества. Введены специализированные единицы измерения (клн, клВ, клОм, клГн, клФ), обеспечивающие размерностную согласованность моделей. Показана применимость методологии для решения задач выявления структурных диссонансов, прогнозирования распространения дефектов в цепочках поставок, расчёта времени адаптации процессов и оптимизации кросс-функционального взаимодействия. Методология соответствует направлению научной специальности 2.5.22 и готова к внедрению в практику управления качеством высокотехнологичных производств.

Ключевые слова: управление качеством, теория электрических цепей, изоморфизм систем, метод узловых потенциалов, метод контурных токов, длинные линии качества, переходные процессы, волновое сопротивление.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-104-112
EDN: QDUCBI

1. ВВЕДЕНИЕ: АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

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 инерционности процессов. Нет строгого математического языка для описания времени адаптации процессов к изменениям, буферной ёмкости систем и волновых эффектов в цепочках поставок.

Локальность оптимизации. Существующие методы не учитывают взаимного влияния процессов друг на друга через общие ресурсы и информационные каналы.

Таким образом, возникает острая необходимость в создании математического аппарата, который переводит управление качеством из плоскости эмпирических эвристик и статистического контроля 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
Тимонин Игорь Валерьевич, аспирант. E-mail: igortimonin@icloud.com
Барданов Алексей Викторович, аспирант. E-mail: Bardanov.aleksey@yandex.ru

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ: ПРИНЦИП ВАРИАЦИОННОГО ЕДИНСТВА

2.1. Математическое обоснование изоморфизма

В основе технического кластера методологии МСПС-ТЭЦ+ лежит принцип вариационного единства киберфизических и производственных систем. Производственно-организационная система (ПОС), как и электротехническая система, представляет собой открытую неравновесную структуру, подчиняющуюся фундаментальным законам сохранения потока, работы и энергии, а также принципу наименьшего действия [1, 2].

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 уравнений теории электрических цепей (ТЭЦ).

Следствием данного принципа является то, что изоморфизм между электротехническими и производственными системами не является метафорой, а представляет собой математическое следствие единой структуры вариационных принципов, управляющих потоковыми системами. Это легитимизирует применение мощного математического аппарата ТЭЦ для задач управления качеством [2, 3].

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 технического домена:

клн (квалин) — единица потока качества (интенсивность прохождения конформной продукции через процесс за единицу времени);

клВ (кваливольт) — единица работы по преобразованию качества (ресурсоёмкость процесса);

клОм (квалиом) — единица сопротивления процесса (меры потерь из-за неэффективности, низкой готовности данных, субъективности решений);

клГн (квалигенри) — единица инерционности процесса (время адаптации к изменениям);

клФ (квалифарад) — единица буферной ёмкости (способность системы накапливать ресурсы для сглаживания колебаний).

Использование этих единиц позволяет применять строгий аппарат математической физики, гарантируя, что любые расчётные преобразования имеют чёткий физический и производственный смысл [4-6].

3. СИСТЕМА АНАЛОГИЙ В ТЕХНИЧЕСКОМ ДОМЕНЕ

3.1. Базовые физические аналоги

На базовом уровне производственная система рассматривается как ориентированный граф, где функциональные подразделения являются узлами, а каналы материального и информационного взаимодействия — ветвями. Каждой электрической величине соответствует строгий производственный аналог:

Таблица 1. Базовые аналогии технического домена

Электрическая величина	Производственный аналог	Единица	Физический смысл
Ток I	Поток качества	клн	Интенсивность прохождения конформной продукции через процесс
Напряжение U	Работа по преобразованию качества	клВ	Ресурсоёмкость процесса (затраты на контроль, переделки)
Сопротивление R	Коэффициент потерь процесса	клОм	Мера неэффективности, бюрократических барьеров, субъективности
Индуктивность L	Инерционность процесса	клГн	Время адаптации к изменениям, переналадке, обучению
Ёмкость C	Буферная ёмкость	клФ	Способность накапливать ресурсы (запасы, НЗП) для сглаживания колебаний
Проводимость G	Пропускная способность канала	клСм	Эффективность передачи качества между подразделениями
ЭДС E	Стратегический импульс	клВ	Внешнее нормативное или рыночное требование к процессу

Такая система аналогий обеспечивает строгую математическую основу для применения всех методов ТЭЦ к задачам управления качеством.

3.2. Производственная интерпретация параметров

Каждый параметр методологии имеет чёткую производственную интерпретацию:

Сопротивление (R, клОм) количественно характеризует потери качества при прохождении потока через процесс. Высокое сопротивление означает, что процесс генерирует много брака, требует больших затрат на контроль и переделки. Формула расчёта:

$$R = \frac{1}{\eta \cdot DRI \cdot (1 - R_{sub})},$$

где η — эффективность процесса (FTR или OEE); DRI — индекс готовности данных; Rsub — риск субъективных решений.

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

$$L = \tau_{decision} \cdot R,$$

где τdecision — среднее время принятия решения (в сменах).

Ёмкость (C, клФ) отражает буферную способность системы: наличие складских запасов, незавершённого производства или ментального резерва оператора, позволяющих сглаживать колебания входного потока без остановки конвейера. Формула расчёта:

$$C = \frac{\tau_{buffer}}{R},$$

где τbuffer — время буферизации (в сменах).

4. МЕТОДЫ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО И СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

4.1. Метод по законам Кирхгофа (МЗК)

Определение. Фундаментальный метод верификации структурной целостности, основанный на принципах непрерывности качественного потока и сохранения качественной работы.

Математический аппарат.

Первый закон Кирхгофа (закон сохранения потока):

$$\sum_{j \in N(i)} I_{ij} + I_i^{ext} = 0, \quad \forall i \in V,$$

где *N(i)* — множество соседей узла i; I_i^{ext} — внешний стратегический ток.

Производственная интерпретация: сумма входящих и исходящих конформных продуктов или данных в любом подразделении должна быть сбалансирована, исключая самопроизвольное возникновение или исчезновение ценности. Брак — это не исчезновение потока, а его ответвление в контур переделок.

Второй закон Кирхгофа (закон сохранения работы):

$$\sum_{k \in C_l} U_k = \sum E_l, \quad \forall l \in \{1, \ldots, m - n + 1\},$$

где C_l — множество ветвей контура *l*; E_l — стратегический потенциал контура.

Производственная интерпретация: в любом замкнутом бизнес-процессе (APQP, 8D, PDCA) сумма затрат на преобразование качества равна приложенному стратегическому импульсу.

Практическое применение. МЗК используется для первичной верификации данных MES/QMS. Если баланс не сходится, данные ошибочны.

4.2. Метод узловых потенциалов (МУП)

Определение. Вычислительно эффективный метод диагностики «узких мест», рассчитывающий интегральный «качественный потенциал» каждого подразделения.

Математический аппарат. Система линейных уравнений:

$$\mathbf{Y} \cdot \vec{\varphi} = \vec{I}^{ext},$$

где Y — матрица узловых проводимостей размером (n−1)×(n−1):

$$Y_{ii} = \sum_{j \neq i} G_{ij}, \quad Y_{ij} = -G_{ij} \quad (i \neq j).$$

$\vec{\varphi}$ – вектор неизвестных потенциалов узлов (подразделений); $\vec{I}^{ext}$ – вектор внешних стратегических требований.

Производственная интерпретация. Потенциал узла (ϕ_i, клВ) — это интегральная «сила качества» подразделения. Генеральный директор имеет потенциал 100 клВ (эталон). Если потенциал цеха падает до 30 клВ, это означает, что из-за высокого сопротивления связей (Rij) требования руководства доходят до исполнителей сильно искажёнными.

Практическое применение.

Диагностика «узких мест». Узлы с низким потенциалом (ϕ_i<40 клВ) — это подразделения, до которых стратегические требования доходят искажёнными.

Расчёт коэффициента структурной согласованности:

$$\beta_{KS} = \frac{\varphi_{avg}}{\varphi_{max}}.$$

Норма: βKS ⩾0.85.

Критическое значение: βKS<0.50.

Выявление структурных диссонансов. Разность потенциалов $\Delta\phi_{ij} = |\phi_i - \phi_j|$ показывает градиент требований между подразделениями. Критический градиент: Δϕ>50 клВ.

4.3. Метод контурных токов (МКТ)

Определение. Метод анализа замкнутых кросс-функциональных бизнес-процессов (APQP, 8D, PDCA), позволяющий рассчитать «сквозной поток качества».

Математический аппарат. Система уравнений:

$$\mathbf{Z} \cdot \vec{I}_c = \vec{E}_c\ ,$$

где Z — матрица контурных сопротивлений:

$$Z_{ll} = \sum_{k \in C_l} R_k, \quad Z_{lm} = \pm \sum_{k \in C_l \cap C_m} R_k\ ,$$

$\vec{I}_c$ — вектор контурных токов (интенсивность сквозного потока в бизнес-процессе).

Производственная интерпретация. Контурный ток показывает, насколько эффективно работает замкнутый цикл (например, 8D). Высокое собственное сопротивление контура (Zll) означает «петлю потерь» — процесс буксует из-за избыточных согласований.

Практическое применение. Расчёт контура 8D показал η=28%.

Вывод для производства. Процесс решения проблем неэффективен, требуется реинжиниринг этапов анализа первопричин.

4.4. Метод эквивалентных преобразований (МЭК)

Определение. Метод структурного упрощения и сценарного анализа, основанный на теоремах Тевенина и Нортона.

Математический аппарат. Любую сложную подсистему можно заменить эквивалентным генератором:

$$E_{eq} = U_{\text{холостого_хода}}\ ;$$
$$R_{eq} = \frac{U_{\text{холостого_хода}}}{I_{\text{короткого_замыкания}}}.$$

Производственная интерпретация. Вместо анализа 50 поставщиков 2-го уровня, мы сворачиваем их в один «усреднённый источник» с определённой надёжностью (Eeq) и рисками (Req).

Практическое применение. При оценке влияния нового поставщика на конвейер весь блок логистики и входного контроля сворачивается в Req. Вывод для производства. Быстрый сценарный анализ «что если» без пересчёта всей схемы предприятия.

4.5. Принцип наложения (суперпозиции)

Определение. Метод декомпозиции итогового качества на структурные вклады отдельных источников (стратегических, функциональных, операционных).

Математический аппарат.

$$I_k = \sum_{m=1}^{M} I_k^{(m)}\ ,$$

Ток в любой ветви равен алгебраической сумме токов, создаваемых каждым источником ЭДС в отдельности, при условии «обнуления» остальных источников.

Производственная интерпретация. Позволяет разделить ответственность за дефект. Сколько в него внесло R&D, сколько Закупки, сколько Производство?

Производственный пример. При росте брака на 20%, МН показал, что 15% вклада дало изменение конструкции (R&D), и только 5% — износ инструмента (Производство). Вывод для производства. Инвестиции нужно направлять в валидацию конструкции, а не в замену станков.

5. МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

5.1. Метод переходных процессов (МПП)

Определение. Динамический метод расчёта времени адаптации системы при скачкообразных изменениях (запуск нового продукта, смена поставщика).

Математический аппарат. Дифференциальное уравнение для RLC-контура:

$$L\frac{dI}{dt} + R \cdot I + \frac{1}{C}\int I\,dt = U(t)\ ,$$

где

$L\frac{dI}{dt}$ – противодействие инерции процесса изменению потока;

$R \cdot I$ – диссипация (потери) на преобразование качества;

$\frac{1}{C}\int I\,dt$ – накопление или отдача буферных запасов.

Постоянные времени:

$\tau_{RC} = R \cdot C$ (время адаптации буфера);

$\tau_{RL} = \frac{L}{R}$ (время реакции инерционного процесса).

Время переходного процесса:

$$t_{trans} \approx 4 \cdot \tau_{RL}\ .$$

Производственная интерпретация. При скачкообразном изменении требований (U(t)), поток качества (I) не меняется мгновенно из-за индуктивности (L) — времени на переналадку и обучение.

Производственный пример. Запуск новой модели электромобиля. При L=15 клГн и R=2.5 клОм, τRL=6 смен. ttrans≈24 смены (около месяца).

Вывод для производства. Руководство должно заложить месяц на адаптацию и создать буферные запасы (C), чтобы избежать дефицита в этот период.

5.2. Частотный анализ (АЧХ/ФЧХ)

Определение. Анализ отклика системы на периодические возмущения (циклические изменения требований, сезонность).

Математический аппарат.

Комплексное сопротивление (импеданс):

$$Z(j\omega) = R + j\left(\omega L - \tfrac{1}{\omega C}\right).$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ):

$$|Z(\omega)| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \tfrac{1}{\omega C}\right)^2}\ .$$

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ):

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\tfrac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right).$$

Резонансная частота:

$$\omega_0 = \tfrac{1}{\sqrt{LC}}\ .$$

Производственная интерпретация. Если частота обновлений ПО от поставщика совпадает с собственной частотой адаптации сборочной линии (ω_0), возникает резонанс, многократно усиливающий потери качества.

Производственный пример. Расчёт показал ω_0 для линии сборки батарей равной 1 обновлению в 14 дней.

Вывод для производства. Запретить поставщику выпускать обновления ПО чаще чем раз в 3 недели, чтобы избежать резонансного роста брака.

5.3. Баланс качественной мощности (МБКМ)

Определение. Метод анализа распределения ресурсов между полезной работой и паразитной циркуляцией.

Математический аппарат.

Баланс мощностей:

$$\sum P^{gen} = \sum P^{cons} + P_{loss}\cdot$$

Комплексная мощность:

$$\tilde{S} = P + jQ = \tilde{U} \cdot \tilde{I}^*\cdot$$

где:

$P = I^2R$ – активная мощность (полезные затраты на контроль и профилактику);

$Q = I^2X$ – реактивная мощность (паразитная циркуляция: лишние согласования, перемещения, ожидание).

Коэффициент мощности:

$$\cos\varphi = \tfrac{P}{|\tilde{S}|}\cdot$$

Производственная интерпретация. Если cosϕ=0.6, это значит, что 40% ресурсов предприятия тратится впустую на «реактивную» бюрократическую циркуляцию, не создающую ценности.

Производственный пример. Расчёт показал cosϕ=0.55 для процесса согласования изменений (ECN).

Вывод для производства. Требуется оптимизация маршрутов согласования для снижения реактивной мощности Q.

6. МЕТОД РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ: ДЛИННЫЕ ЛИНИИ КАЧЕСТВА (МДЛК)

6.1. Обоснование перехода к распределённым параметрам

Критерий перехода:

$$\frac{l}{\lambda} = \frac{l \cdot f}{v} \geq 0.1 ,$$

где l — топологическая глубина цепочки (уровни поставщиков); f — частота изменений требований; v — скорость распространения возмущения.

Для одного из крупнейших отечественных автопроизводителей это отношение равно 1.5 - 0.1. Применение сосредоточенных параметров недопустимо, необходимы распределённые параметры.

6.2. Телеграфные уравнения качества

Математический аппарат. Система телеграфных уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{\partial U(x,t)}{\partial x} = L_0 \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} + R_0 I(x,t) \\ -\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = C_0 \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} + G_0 U(x,t) , \end{cases}$$

где x — топологическая координата (0 = сборка, 3 = поставщик 3-го уровня).

Первичные параметры распределённой линии:

Таблица 2. Первичные параметры длинной линии качества

Параметр	Обозначение	Единица	Формула расчёта	Производственный смысл
Погонное сопротивление	R0	клОм/ур	$R_0 = \frac{1}{\tau_{control} \cdot DRI \cdot (1 - R_{sub})}$	Затраты на контроль на единицу глубины цепочки
Погонная индуктивность	L0	клГн/ур	$L_0 = \tau_{reaction} \cdot R_0$	Инерционность реакции поставщика
Погонная ёмкость	C0	клФ/ур	$C_0 = \frac{\tau_{buffer}}{R_0}$	Буферная ёмкость (страховые запасы)
Погонная проводимость утечки	G0	квСм/ур	$G_0 = \frac{1 - DRI}{R_0 \cdot l}$	Искажение информации при передаче

6.3. Волновое сопротивление и согласование

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).

Производственная интерпретация. Дефект — это волна. Она не появляется на конвейере мгновенно. Она «бежит» по цепочке поставок, затухая или усиливаясь. Если цепочка не согласована с конвейером, волна отражается.

Производственный пример. Если Z_c цепочки поставок = 4 клОм, а сопротивление входного контроля сборки Z_L= 10 клОм (жёсткий, забюрократизированный контроль), то Г=0.42. Это означает, что 42% проблем «отражаются» от конвейера обратно к поставщикам в виде каскадных рекламаций, создавая «стоячие волны брака» (хронические зоны дефектов).

Вывод для производства. Для устранения эха брака необходимо «согласовать» цепочку: либо снизить Z_L (внедрить быструю сортировку вместо тотальных остановок), либо повысить Zc поставщиков (цифровизация, снижение R_0).

6.4. Скорость распространения дефекта

Математический аппарат.

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad [\text{уровней/смена}] .$$

Практическое применение. Для рассмтриваемого автопроизводителя v=0.149 ур/смена → время распространения дефекта от поставщика 3-го уровня:

$$t_{prop} = \frac{l}{v} = \frac{3}{0.149} = 20 \text{ смен} \approx 4 \text{ недели} .$$

Вывод для производства. Дефект, возникший сегодня у поставщика 3-го уровня, ударит по конвейеру только через месяц. За это время нужно успеть перехватить проблему!

7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ

7.1. Типовые задачи и их решение

Задача 1. Выявление «узких мест» в структуре.

Традиционный подход: Экспертная оценка, интуиция.

Подход МСПС-ТЭЦ+:

Построить схему замещения предприятия.

Рассчитать потенциалы всех узлов методом МУП.

Выявить узлы с ϕ_i<40 клВ.

Рассчитать градиенты $\nabla\phi$ между подразделениями.

Разработать мероприятия по снижению сопротивления связей (R_{ij}).

Задача 2. Оптимизация кросс-функционального процесса (8*D*).

Традиционный подход: Ужесточение регламентов, увеличение числа согласований.

Подход МСПС-ТЭЦ+:

Смоделировать процесс 8*D* как замкнутый контур.

Рассчитать контурные токи методом МКТ.

Выявить этапы с максимальным собственным сопротивлением (Z_{ll}).

Рассчитать коэффициент мощности процесса (cosϕ).

Разработать мероприятия по снижению реактивной мощности

Q и собственного сопротивления Z_{ll}.

Задача 3. Прогнозирование распространения дефекта в цепочке поставок.

Традиционный подход: Реакция на уже возникший дефект.

Подход МСПС-ТЭЦ+:

Рассчитать первичные параметры длинной линии (*R0, L0, C0, G0*).

Рассчитать волновое сопротивление Z_c и коэффициент отражения Г.

Рассчитать время распространения дефекта tprop.

Разработать мероприятия по согласованию импедансов (Z_L=*Zc*).

Задача 4. Расчёт времени адаптации при запуске нового продукта.

Традиционный подход: Интуитивная оценка сроков.

Подход МСПС-ТЭЦ+:

Рассчитать индуктивность процесса (L) и сопротивление (*R*).

Определить постоянную времени $\tau RL=L/R$.

Рассчитать время переходного процесса $t_{trans}\approx 4\tau R_L$.

Спланировать буферные запасы (С) на период адаптации.

7.2. Интегральный алгоритм применения

Для инженера или руководителя внедрение методологии сводится к следующему строгому алгоритму:

Шаг 1. Топологическая диагностика и статика (МЗК, МУП, МКТ).

Собрать данные из MES/QMS. Построить схему замещения. Рассчитать потенциалы узлов (МУП) и контурные токи (МКТ). Выявить подразделения с критически низким потенциалом (ϕ<30 клВ) и бизнес-процессы с высокой «петлёй потерь» (η<50%).

Шаг 2. Декомпозиция ответственности и упрощение (МН, МЭК).

Разложить итоговый дефект на вклады источников (МН). Свернуть сложные блоки поставщиков в эквивалентные генераторы (МЭК).

Шаг 3. Динамический и энергетический аудит (МБКМ, МПП, АЧХ).

Рассчитать баланс мощностей (МБКМ) и коэффициент мощности (cosϕ). Смоделировать запуск нового продукта через МПП. Проверить частоту изменений на резонанс (АЧХ).

Шаг 4. Анализ распределённых эффектов (МДЛК).

Рассчитать волновое сопротивление цепочки поставок (Z_c) и коэффициент отражения (Г). Рассчитать время распространения дефекта (t_{prop}). Согласовать цепочку поставок для устранения стоячих волн брака.

Шаг 5. Формирование отчёта.

Сводная таблица всех параметров с цветовой индикацией. Приоритизированный план мероприятий. Прогноз экономического эффекта.

8. ОГРАНИЧЕНИЯ И ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ

Научная добросовестность требует признать фундаментальные ограничения технического кластера методологии:

Линейное приближение. Базовые методы (МЗК, МУП, МКТ, МДЛК) предполагают линейность системы. В реальности производственные процессы обладают нелинейностями (насыщение, гистерезис, пороговые эффекты). Для их описания требуется расширение методологии нелинейными моделями.

Проблема параметризации. Первичные параметры (*R, L, C, G*) рассчитываются на основе производственных данных, качество которых может быть недостаточным. Решение — обязательная калибровка по историческим данным и перекрёстная верификация несколькими методами.

Стационарность процессов. Базовые методы предполагают стационарность процессов в течение периода анализа. В условиях высокой волатильности требуется применение нестационарных моделей.

Игнорирование человеческого фактора. Технический кластер методологии не учитывает культурные, психологические и организационные аспекты. Для их описания требуется интеграция с организационным кластером (вихревые токи культуры, организационная температура).

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

9. ВЫВОДЫ

Принцип вариационного единства киберфизических и производственных 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 для управления качеством.

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

Методы топологического анализа (МЗК, МУП, МКТ, МЭК, МН) позволяют детерминированно выявлять структурные диссонансы, рассчитывать реальные потенциалы подразделений и оптимизировать кросс-функциональные взаимодействия.

Методы динамического анализа (МПП, АЧХ/ФЧХ, МБКМ) обеспечивают расчёт времени адаптации процессов, выявление резонансных частот организационных изменений и оценку паразитной реактивной мощности.

Метод распределённых систем (МДЛК) обеспечивает математический аппарат для моделирования распределённых цепочек поставок с учётом временных задержек и волновых эффектов. Расчёт волнового сопротивления и коэффициента отражения позволяет устранять стоячие волны брака и согласовывать импедансы цепочки поставок с конвейером.

Разработанный интегральный алгоритм применения методологии обеспечивает непрерывную инженерную ниточку от первичных данных до экономического эффекта, делая методологию доступной для инженеров и руководителей.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технический кластер методологии структурно-параметрического синтеза производственно-качественных контуров представляет собой фундаментальный сдвиг парадигмы в науке об управлении качеством.

Методология трансформирует управление качеством из функции реактивного контроля и статистического гадания в функцию архитектурного инжиниринга. Возможность количественно оценивать инерцию, буферную ёмкость, волновые эффекты в цепочках поставок и структурные диссонансы 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 производственных систем — и готова к тиражированию в виде корпоративных стандартов, программного обеспечения для цифровых двойников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Строганов, В.И.* Итоги и перспективы развития электромобилей и автомобилей с гибридными силовыми установками / В.И. Строганов, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 2-3. – С. 2-8.
2. *Козловский, В.Н.* Перспективные системы диагностики управления автономным транспортным объектом / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, О.И. Деев, А.Ф. Колбасов, С.В. Петровский, А.П. Новикова // Грузовик. – 2017. – № 6. – С. 21-28.

3. *Козловский, В.Н.* Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей: автореф. дисс. … докт. техн. наук / В.Н. Козловский. – Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т). – Тольятти, 2010.
4. *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.
5. *Panyukov, D.* Development and research FMEA expert team model / D. Panyukov, V. Kozlovsky, Y. Klochkov // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. – 2020. – Т. 27. – № 5. – С. 2040015.

METHODOLOGY FOR STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF PRODUCTION-QUALITY CONTOURS: A TECHNICAL CLUSTER OF QUALITY MANAGEMENT

© 2026 V.N. Kozlovsky, I.A. Kosorlukov, I.V. Timonin, A.V. Bardanov

Samara State Technical University, Samara, Russia

This article presents a technical cluster for the methodology of structural-parametric synthesis of production-quality contours (MSPS-TEC+), based on a strict isomorphic mapping of an enterprise›s technical processes onto the mathematical apparatus of electrical circuit theory. A system of topological, dynamic, and distributed analysis methods has been developed, enabling deterministic modeling, optimization, and verification of quality management systems. Specialized units of measurement (kln, klV, klOhm, klHn, klF) are introduced to ensure dimensional consistency of the models. The methodology›s applicability is demonstrated for solving problems such as identifying structural dissonances, predicting the propagation of defects in supply chains, calculating process adaptation times, and optimizing cross-functional interactions. The methodology aligns with scientific specialty 2.5.22 and is ready for implementation in quality management practices in high-tech manufacturing.
Keywords: quality management, electrical circuit theory, system isomorphism, nodal potential method, loop current method, long quality lines, transient processes, wave impedance.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-104-112
EDN: QDUCBI

REFERENCES

1. *Stroganov, V.I.* Itogi i perspektivy razvitija elektromobilej i avtomobilej s gibridnymi silovymi ustanovkami / V.I. Stroganov, V.N. Kozlovskij // Elektronika i elektrooborudovanie transporta. – 2012. – № 2-3. – S. 2-8.
2. *Kozlovskij, V.N.* Perspektivnye sistemy diagnostiki upravlenija avtonomnym transportnym obektom / V.N. Kozlovskij, V.V. Debelov, O.I. Deev, A.F. Kolbasov, S.V. Petrovskij, A.P. Novikova // Gruzovik. – 2017. – № 6. – S. 21-28.
3. *Kozlovskij, V.N.* Obespechenie kachestva i nadezhnosti sistemy elektrooborudovanija avtomobilej: avtoref. diss. … dokt. tehn. nauk / V.N. Kozlovskij. – Mosk. gos. avtomobil.-dorozh. in-t (tehn. un-t). – Togliatti, 2010.
4. *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.
5. *Panyukov, D.* Development and research FMEA expert team model / D. Panyukov, V. Kozlovsky, Y. Klochkov // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. – 2020. – T. 27. – № 5. – S. 2040015.

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
Igor Timonin, Postgraduate Student. E-mail: igortimonin@icloud.com
Alexey Bardanov, Postgraduate Student. E-mail: Bardanov.aleksey@yandex.ru