

Научная статья

УДК 658.511.3

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.5>

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ АДАПТИВНОЙ БИЗНЕС-МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЕ

Кирилл Даниленко*, Ирина Брусакова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация, danilenko@kirill-viktorovich.ru, brusakovai@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку: danilenko@kirill-viktorovich.ru

Аннотация

Статья посвящена разработке математической модели адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия, функционирующего в многокомпонентной среде, и доказательству условий ее устойчивости. Актуальность исследования обусловлена тем, что современные организации подвергаются одновременному воздействию физических, институциональных, рыночных и технологических факторов, однако существующие подходы рассматривают эти факторы изолированно и не обеспечивают формального обоснования условий выживаемости. Методологическую основу исследования составляет интеграция теории активных систем, системной динамики и нелинейной теории управления. Построены причинно-следственная диаграмма и диаграмма потоков и запасов в среде имитационного моделирования VENSIM. Для формального анализа устойчивости применена концепция Input-to-State Stability (ISS) и метод функций Ляпунова. В результате исследования разработана модель с двумя контурами обратной связи – контуром стабильности и контуром адаптации, переключение между которыми осуществляется через критический порог уровня стресса. Доказано, что система обладает ISS-устойчивостью при одновременном выполнении трех условий: ограниченности функции потока внешних возмущений, положительной чувствительности мощности адаптации к величине буферов и положительности функции восполнения буферов в периоды стабильности. Численное моделирование трех сценариев подтвердило теоретические предсказания и продемонстрировало наличие области притяжения равновесного состояния. Полученные результаты расширяют возможности количественного анализа организационной устойчивости и могут применяться для раннего выявления угроз, поддержки инвестиционных решений и разработки стратегий развития цифровых платформ.

Ключевые слова: устойчивость, адаптивная бизнес-модель, многокомпонентная среда, системная динамика, парадоксальное управление, Input-to-State Stability, функция Ляпунова, буферы ресурсов, критический порог.

Цитирование: Даниленко, К., Брусакова, И., 2025. Анализ устойчивости адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия в многокомпонентной среде. *Sustainable Development and Engineering Economics*. 4, 5. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.5>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Даниленко К., Брусакова И., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.5>

SUSTAINABILITY ANALYSIS OF AN ADAPTIVE DIGITAL ENTERPRISE BUSINESS MODEL IN A MULTI-COMPONENT SYSTEMS

Kirill Danilenko*, Irina Brusakova

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, danilenko@kirill-viktorovich.ru, brusakovai@mail.ru

*Corresponding author: danilenko@kirill-viktorovich.ru

Abstract

This paper develops a mathematical model of an adaptive business model for a digital enterprise operating in a multi-component environment and proves the conditions for its sustainability. The relevance of the research is determined by the fact that modern organizations are simultaneously exposed to physical, institutional, market, and technological factors; however, existing approaches consider these factors in isolation and do not provide formal justification for viability conditions. The methodological framework of the study integrates active systems theory, system dynamics, and nonlinear control theory. A causal loop diagram and a stock-flow diagram were constructed using the VENSIM simulation environment. The Input-to-State Stability (ISS) concept and the Lyapunov function method were applied for formal stability analysis. As a result, a model with two feedback loops was developed – a stability loop and an adaptation loop, with switching between them occurring through a critical stress threshold. The system was proven to possess ISS stability under three simultaneous conditions: boundedness of the external perturbation flow function, positive sensitivity of adaptation capacity to buffer magnitude, and positivity of the buffer replenishment function during stability periods. Numerical simulation of three scenarios confirmed the theoretical predictions and demonstrated the existence of an equilibrium attraction domain. The results expand the possibilities for quantitative analysis of organizational sustainability and can be applied for early threat detection, investment decision support, and digital platform strategy development.

Keywords: sustainability, adaptive business model, multi-component environment, system dynamics, paradoxical management, Input-to-State Stability, Lyapunov function, resource buffers, critical threshold.

Citation: Danilenko, K., Brusakova, I., 2025. Sustainability analysis of an adaptive digital enterprise business model in a multi-component systems. *Sustainable Development and Engineering Economics* 4, 5. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.5>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Danilenko K., Brusakova I., 2025. Published by Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University.

1. Введение

В современных условиях цифровизации экономика и бизнес выступают как сложные многокомпонентные системы, в которых предприятия интегрируются в бизнес-экосистемы, основанные на взаимосвязи платформ, партнерских сетей и цифровой инфраструктуры. Как показано в (Tsai et al., 2022), подобные экосистемы характеризуются высокой гетерогенностью участников, самоорганизацией процессов и динамическими контурами обратной связи, что формирует особые требования к устойчивости и адаптивности бизнес-моделей. Объектом исследования в данной работе выбрано цифровое предприятие, функционирующее в условиях такой многокомпонентной среды, а предметом – его адаптивная бизнес-модель, представляющая собой сложную организационную структуру с активными элементами и нелинейными взаимодействиями.

Актуальность исследования определяется тем, что цифровые предприятия, действующие в условиях постоянно возрастающей турбулентности внешней среды и ускоренного внедрения инновационных технологий, сталкиваются с новыми источниками риска и неопределенности. Как отмечается в (Irajifar et al., 2023) и в работе (Colombi et al., 2023), цифровая трансформация создает как новые возможности для повышения устойчивости, так и дополнительные уязвимости, что требует системного переосмысления подходов к обеспечению устойчивости бизнес-моделей. В отличие от классических предприятий, цифровые структуры опираются на сетевые эффекты, платформенные механики масштабирования и гибкие организационные формы, что приводит к принципиальной зависимости их развития от качества динамических связей между компонентами бизнес-модели и поведения ключевых стейкхолдеров.

Несмотря на значительное развитие теоретического аппарата в области управления организационными системами (Burkov et al., 2012), проблемы комплексного анализа адаптивных бизнес-моделей цифровых предприятий до сих пор не получили исчерпывающего решения. Так, в отечественной теории управления организационными системами, как показано в (Burkov et al., 2012), подробно рассмотрены структуры, где участники обладают собственными интересами и способны принимать эффективные управленческие решения, однако специфика цифровых экосистем и сетевых эффектов в этих подходах остается недостаточно раскрытой. Одновременно международная практика и обзоры демонстрируют значимость анализа экосистемной логики развития в условиях цифровизации, что легло в основу многих работ последних лет (Tsai et al., 2022; Evans & Schmalensee, 2016).

Дальнейший прогресс в понимании устойчивости цифровых бизнес-моделей невозможен без использования современных методов моделирования сложных систем. Методология причинно-следственных диаграмм и потоковых моделей для анализа бизнес-моделей была предложена в (Forrester, 1961) и существенно развита в (Senge, 1990), что позволило формализовать логику обратных связей, сценарные траектории развития и циклы адаптации бизнес-систем. Важным этапом стало применение подходов системной динамики для анализа нелинейности и множественности траекторий в эволюции бизнес-структур, о чем говорится, в частности, в (Schoenenberger et al., 2021), где подчеркивается сложность идентификации ключевых управляющих параметров в крупных моделях.

Однако, как показывают современные обзоры, до настоящего времени отсутствует интегрированная методология, позволяющая связать теорию активных организационных систем,

системную динамику и современные концепции цифровых бизнес-экосистем для задач анализа устойчивости именно адаптивных бизнес-моделей цифровых предприятий.

Целью исследования является разработка математической модели адаптивной бизнес-модели для класса цифровых предприятий, функционирующих в многокомпонентной среде, и доказательство условий ее устойчивости методом Input-to-State Stability (ISS).

2. Обзор литературы

В данном разделе представлен систематический обзор современных исследований, посвященных теоретическим и методологическим основам анализа устойчивости адаптивных бизнес-моделей цифровых предприятий. Обзор структурирован вокруг четырех ключевых направлений: теории управления организационными системами и активных систем; системной динамики и агентного моделирования; цифровых бизнес-экосистем и платформенных моделей; динамики и устойчивости бизнес-моделей в контексте цифровой трансформации и устойчивого развития. Анализ включает около сорока источников, с акцентом на публикации 2021–2024 гг., что позволяет выявить актуальные тенденции и существующие научные разрывы.

2.1. Теория управления организационными системами и концепция активных систем

Теоретическая база исследования опирается на разработки в области теории управления организационными системами и теории активных систем, представленные в работах отечественных авторов. В (Burkov et al., 2012) представлена комплексная методология системного анализа организационных структур, учитывающая целевую неоднородность элементов, конфликты интересов и необходимость построения эффективных механизмов управления. Авторы показывают, что в активных системах, где участники обладают собственными интересами и способны к самостоятельному выбору действий, требуются специальные инструменты координации и управления.

В последующих исследованиях концепция активных систем была адаптирована к анализу крупномасштабных экономико-производственных систем. В (Rodionov et al., 2018) подчеркивается, что устойчивость таких систем достигается через сочетание структурного и институционального анализа, что позволяет учитывать как внутренние взаимозависимости, так и внешние возмущения.

Однако, как отмечается в критическом анализе литературы, теория активных систем традиционно применялась к классическим иерархическим организациям и не в полной мере учитывает специфику цифровых бизнес-моделей, основанных на сетевых эффектах и платформенной логике. В (Alqahtani et al., 2020) показано, что цифровая трансформация требует новых подходов к организационной архитектуре, но формализация этих подходов в терминах активных систем остается незавершенной. Таким образом, существует методологический разрыв между теоретическим аппаратом управления организационными системами и практическими потребностями цифровых предприятий, что подтверждает актуальность разработки интегрированной методологии.

2.2. Системная динамика и агентное моделирование в анализе бизнес-моделей

Системная динамика и агентное моделирование представляют ключевые методы для формализации динамики сложных социально-экономических систем. Классический подход

системной динамики был предложен в (Forrester, 1961) и существенно развит в (Senge, 1990), где детально описана методология причинно-следственных диаграмм и диаграмм «запасы–поток» для анализа поведения организационных систем.

Важным направлением стало применение системной динамики к задачам цифровой трансформации и устойчивого развития. В (Pasqualino et al., 2021) представлена модель IN4.0-SD, основанная на системной динамике, которая позволяет анализировать взаимосвязь индустриальных инноваций, неравенства и инфляции в замкнутой экономической системе. Авторы показывают, что системная динамика эффективно справляется с моделированием переходных процессов в социально-экономических системах, что делает ее применимой для анализа адаптивных бизнес-моделей.

В работах последних лет активно исследуются методы агентного моделирования для описания поведения стейкхолдеров в цифровых экосистемах. В (Bonabeau et al., 1999) системная динамика сочетается с агентным подходом для моделирования инноваций бизнес-моделей в цифровых компаниях, где партнерские отношения и внешние возможности играют ключевую роль. В (Speich & Ulli-Beer, 2021) показано, как сочетание системной динамики и исследовательского модельного анализа позволяет оценивать перспективы технологических бизнес-моделей в условиях глубокой неопределенности.

Важным для нашего исследования является исследование (Schoenenberger et al., 2021), где подчеркивается, что идентификация влиятельных параметров в больших системных моделях является ключевой проблемой, особенно в условиях ограниченности данных и высокой размерности модели. Это напрямую относится к задаче анализа устойчивости адаптивных бизнес-моделей, где число взаимодействующих факторов может быть значительным. В работе по системной динамике в предпринимательстве и управлении инновациями (Hussain & De Vries, 2024) показано, что применение системной динамики в инженерии предприятий становится все более распространенным, но при этом отмечаются высокая фрагментация исследований и недостаток интегрированных подходов, сочетающих системную динамику с агентным моделированием.

2.3. Динамика и устойчивость бизнес-моделей в цифровых условиях

Ключевой блок литературы посвящен непосредственно динамике и устойчивости бизнес-моделей. В (Lambert & Davidson, 2019) критикуются статические фреймворки бизнес-моделей и предлагают подходы к включению временного измерения, контуров обратной связи и изменений конфигурации ценностного предложения. Это приближает традиционные концепции к логике системной динамики, но не связывает их с формальным анализом устойчивости активных систем.

В (Brenner & Guerrero, 2018) рассматриваются трансформативные устойчивые бизнес-модели в контексте цифрового императива, где подчеркивается необходимость переосмысления ценностных предложений и цепочек создания стоимости в сторону устойчивых решений. В (Østergaard et al., 2020) показано, что цифровизация изменяет промышленные цепочки создания стоимости, но сохраняются пробелы в понимании того, как трансформация бизнес-моделей позволяет достигать экологических и социальных эффектов устойчивости.

В работах по цифровой трансформации в розничной торговле и (Colombi et al., 2023) анализируются детерминанты преобразования традиционных бизнес-моделей, но динамический анализ устойчивости получающихся моделей не проводится. В (Tolstyykh, T. et al., 2020)

выделяются классические и экосистемные эффекты, влияющие на устойчивость высокотехнологичных бизнес-моделей.

Важные результаты получены в работах, сочетающих системную динамику с анализом бизнес-моделей. В (Speich & Ulli-Beer, 2021) показано, как сочетание системной динамики и исследовательского модельного анализа позволяет оценивать перспективы технологических бизнес-моделей в условиях глубокой неопределенности.

В работе по системной динамике в предпринимательстве (Hussain & De Vries, 2024) отмечается рост применения системной динамики в инженерии предприятий, но также фиксируется высокая фрагментация исследований и недостаток интегрированных подходов, сочетающих системную динамику с агентным моделированием. В (Macal & North, 2010) демонстрируется применение системной динамики для моделирования инноваций бизнес-моделей в цифровых компаниях с учетом партнерских сценариев.

2.4. Выводы по обзору литературы и выявленный научный разрыв

Анализ литературы выявил четыре направления исследований, каждое из которых вносит вклад в понимание адаптивных бизнес-моделей, но имеет ограничения. Теория активных систем (Burkov et al., 2012; Rodionov et al., 2018) предоставляет концептуальную основу для анализа организаций как многокомпонентных систем, однако не включает механизмы адаптации в динамичной среде. Системная динамика (Forrester, 1961; Senge, 1990; Schoenenberger et al., 2021) обеспечивает инструментарий для моделирования причинно-следственных связей и потоков, но не предоставляет формальных методов доказательства устойчивости. Агентное моделирование цифровых платформ (Tsai et al., 2022; Evans & Schmalensee, 2016) фокусируется на взаимодействиях стейкхолдеров, не рассматривая механизмы управления устойчивостью. Концепция устойчивых бизнес-моделей (Lambert et al., 2019; Macal & North, 2010; Vonabeau et al., 1999) подчеркивает важность адаптации, но остается на качественном уровне без математических методов анализа. Таким образом, выявляется значительный научный разрыв между, с одной стороны, развитым теоретико-методологическим аппаратом теории активных систем, системной динамики и моделирования цифровых экосистем, а с другой – практической потребностью в инструментах формального анализа устойчивости адаптивных бизнес-моделей цифровых предприятий в многокомпонентной среде.

Таким образом, существующие подходы не интегрируют теорию активных систем, системную динамику и методы формального анализа устойчивости в единую модель. Настоящая работа направлена на устранение этого пробела путем разработки математической модели адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия с формальным доказательством условий устойчивости ISS-методом.

3. Материалы и методы

В данном разделе описывается методологический подход к анализу устойчивости адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия как многокомпонентной активной системы с использованием методов системной динамики и агентного моделирования. Методика изложена таким образом, чтобы другой исследователь мог ее воспроизвести для аналогичного предприятия при наличии сопоставимых данных.

3.1. Общая схема методологического подхода

Исследование выполнено в рамках системно-динамического подхода с применением методов нелинейной теории управления. Общая логика работы включает четыре последовательных этапа, каждый из которых опирается на результаты предыдущего.

На первом этапе строится базовая модель бизнес-модели цифрового предприятия. Используются методы теории активных систем (Burkov et al., 2012) и системной динамики (Forrester, 1961; Sterman, 2000). Результатом этапа являются причинно-следственная диаграмма (Causal Loop Diagram, CLD) и диаграмма потоков и запасов (Stock-Flow Diagram, SFD), описывающие структуру и динамику бизнес-модели в стационарных условиях. Эта модель фиксирует ключевые переменные (пользовательская база, финансовые резервы, качество инфраструктуры, партнерская экосистема) и контуры обратной связи между ними.

На втором этапе базовая модель расширяется для учета многокомпонентной среды. Вводятся дополнительные элементы: вектор внешних возмущений $w(t)$, агрегированный уровень стресса $S(t)$, вектор буферов $B(t)$ и механизм парадоксального управления с критическим порогом S_{crit} . Статичные контуры обратной связи базовой модели трансформируются в два динамических режима – режим стабильности и режим адаптации. Результатом этапа являются расширенные CLD и SFD адаптивной бизнес-модели.

На третьем этапе проводится формальный анализ устойчивости расширенной модели. Применяются ISS-концепция и метод функций Ляпунова (Sontag, 2008; Khalil, 2002). Строится явная функция Ляпунова $V(S, B)$, доказываются условия ее положительной определенности и диссипативности, формулируется теорема об ISS-устойчивости адаптивной бизнес-модели.

На четвертом этапе выполняется численная верификация теоретических результатов. В среде имитационного моделирования VENSIM реализуется Stock-Flow-модель, проводится серия вычислительных экспериментов при различных сценариях внешних возмущений. Результаты моделирования сопоставляются с предсказаниями теоретического анализа.

3.2. Базовая модель бизнес-модели цифрового предприятия

Модель описывает четыре переменные состояния: пользовательская база $U(t)$, финансовые резервы $F(t)$, качество инфраструктуры $Q(t)$, партнерская экосистема $P(t)$.

На основе анализа взаимосвязей между переменными состояниями построена причинно-следственная диаграмма (рис. 1). Диаграмма отражает три усиливающих контура обратной связи (R1, R2, R3), обеспечивающих механизмы роста, и три балансирующих контура (B1, B2, B3), ограничивающих рост и создающих риски устойчивости.

Модель включает три усиливающих контура (R1 – сетевые эффекты, R2 – инновационный цикл, R3 – развитие партнерства) и три балансирующих контура (B1 – насыщение рынка, B2 – конкуренция, B3 – ресурсные ограничения).

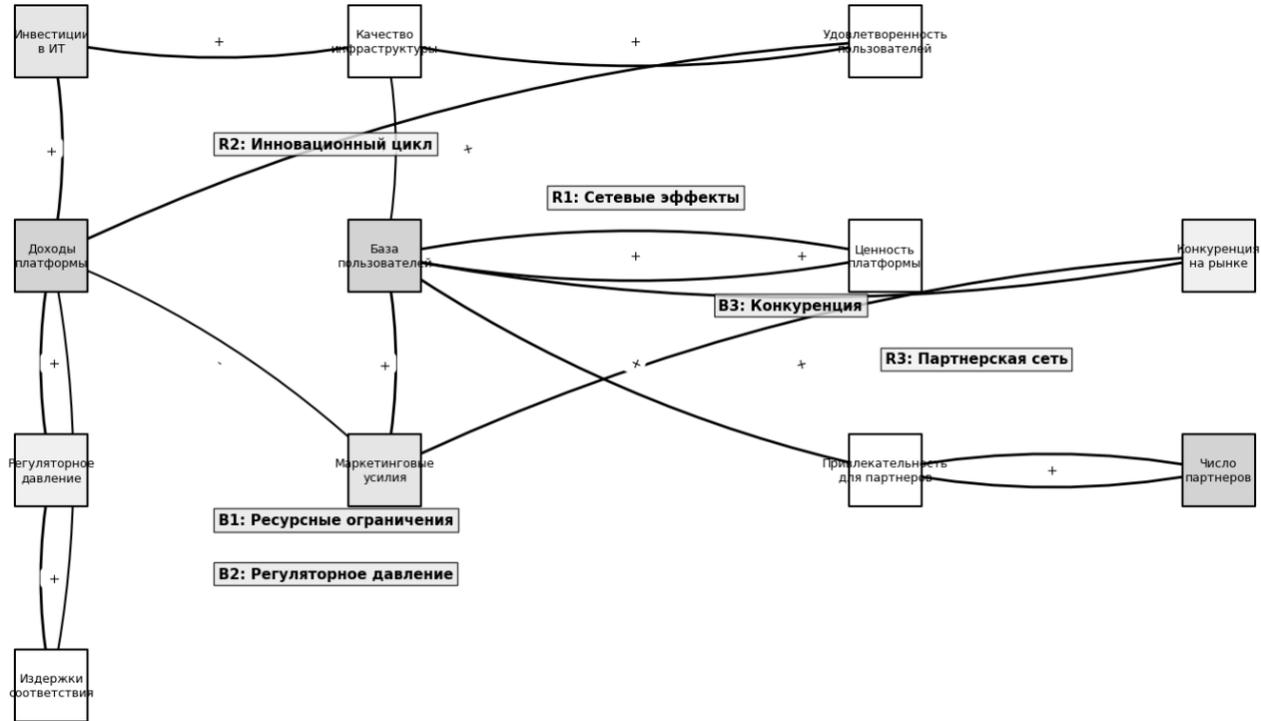


Рисунок 1. Причинно-следственная диаграмма бизнес-модели цифрового предприятия

Для количественного анализа причинно-следственная диаграмма формализована в виде диаграммы потоков и запасов (рис. 2). Каждая переменная состояния представлена как запас (stock), динамика которого определяется входящими и исходящими потоками (flows).

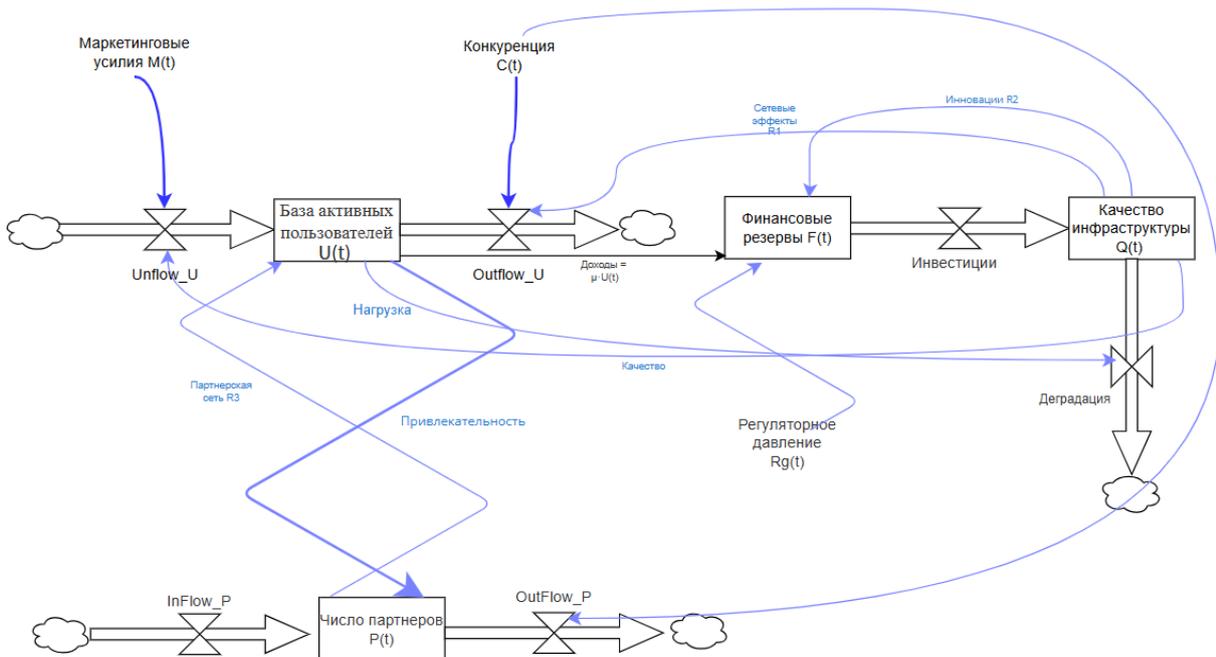


Рисунок 2. Модель «запасы–потоки» бизнес-модели цифрового предприятия

Математически динамика каждого запаса описывается дискретным уравнением:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + (Inflow(t) - Outflow(t)) \cdot \Delta t,$$

где X – значение запаса в момент времени t , $Inflow$ и $Outflow$ – потоки пополнения и выбытия, Δt – временной шаг моделирования. Каждый поток задается в виде функции от текущих значений запасов, управляющих параметров и параметров внешней среды.

Для базы пользователей потоки определяются следующим образом:

$$Inflow_U(t) = \alpha_m \cdot M(t) \cdot \left(1 - \frac{U(t)}{U_{max}}\right) + \alpha_n \cdot U(t) \cdot \frac{V(t)}{V_0}, Outflow_U(t) = \beta_u \cdot U(t) \cdot \left(1 - \frac{Q(t)}{Q_0}\right),$$

где $M(t)$ – маркетинговые усилия, α_m – коэффициент эффективности маркетинга, U_{max} – максимальная емкость рынка, α_n – коэффициент сетевых эффектов, $V(t)$ – ценность платформы, V_0 – базовая ценность, β_u – коэффициент оттока, $Q(t)$ – качество инфраструктуры, Q_0 – базовое качество. Аналогичным образом задаются функции потоков для других запасов.

Базовая модель адекватно описывает динамику бизнес-модели в условиях относительно стабильной внешней среды. Она имеет три ограничения: отсутствие явного учета внешних возмущений, единственный режим функционирования и отсутствие интегрального индикатора состояния системы.

Эти ограничения обуславливают необходимость расширения модели, которое выполняется на втором этапе исследования.

3.3. Расширение модели для многокомпонентной среды

Многокомпонентная среда характеризуется одновременным воздействием разнородных факторов, которые не могут быть сведены к единому источнику возмущений. Эти четыре компоненты объединяются в вектор возмущений $w(t)$, который является входом расширенной модели.

Для обеспечения возможности формального анализа устойчивости переменные базовой модели агрегируются в две переменные состояния:

1. Уровень стресса $S(t)$ – интегральный показатель напряженности системы. Он аккумулирует воздействие внешних возмущений и отражает степень отклонения системы от нормального функционирования. Уровень стресса связан с переменными базовой модели: когда пользовательская база падает, финансы истощаются, качество снижается или партнеры уходят – стресс растет.

2. Вектор буферов $B(t)$ – агрегированный запас ресурсов, обеспечивающий способность абсорбировать шоки. Включает финансовые резервы (соответствует $F(t)$ базовой модели), материальные запасы, резервные мощности (связано с $Q(t)$) и компетентностный буфер (связано с партнерскими компетенциями $P(t)$).

Таким образом, четыре переменные базовой модели (U, F, Q, P) трансформируются в две переменные расширенной модели (S, B), что упрощает анализ устойчивости при сохранении содержательной интерпретации.

3.3.1. Трансформация контуров обратной связи

Контур обратной связи базовой модели трансформируются в два метаконтур, реализующих концепцию парадоксального управления (Ricciardi et al., 2016; Smith & Lewis, 2011).

Контур стабильности R1 объединяет механизмы поддержания текущей деятельности. Он соответствует балансирующим контурам базовой модели (B1, B2, B3) и части усиливающих контуров, связанных с реинвестированием в текущие операции. Контур активен при низком уровне стресса и обеспечивает минимизацию отклонений, оптимизацию процессов и накопление буферов.

Контур адаптации R2 объединяет механизмы трансформации. Он соответствует усиливающим контурам базовой модели (R1, R3), связанным с поиском новых пользователей и развитием партнерской экосистемы. Контур активируется при высоком уровне стресса и обеспечивает поиск новых решений, реконфигурацию бизнес-модели и интенсивный расход буферов на трансформацию.

3.3.2. Механизм парадоксального управления

Центральным элементом расширенной модели является механизм парадоксального управления, осуществляющий переключение между контурами R1 и R2. Вводятся критический порог стресса S_{crit} и адаптивная функция переключения $\lambda(t)$.

При уровне стресса ниже критического порога ($S < S_{crit}$) доминирует контур стабильности: система работает в штатном режиме, минимизирует расход буферов, накапливает ресурсы. При уровне стресса выше критического порога ($S > S_{crit}$) активируется контур адаптации: система переходит в режим интенсивной трансформации, расходует буферы на поиск новых решений и реконфигурацию.

Функция переключения $\lambda(t)$ обеспечивает гладкий переход между режимами, избегая резких скачков в поведении системы.

Расширенная модель не отменяет базовую, а надстраивается над ней, добавляя элементы, необходимые для анализа устойчивости в многокомпонентной среде. Математическая формализация расширенной модели и доказательство условий устойчивости представлены в главе 4.

4. Результаты

4.1. Адаптивная бизнес-модель многокомпонентной среды: концептуальная основа

Современные бизнес-модели функционируют в условиях многокомпонентной среды, характеризующейся одновременным воздействием разнородных факторов: физических (инфраструктурные ограничения, логистические сети), институциональных (регуляторные изменения, стандарты), рыночных (конкурентное давление, изменение спроса) и технологических (инновационные сдвиги, устаревание технологий).

Формализуем вектор возмущений многокомпонентной среды следующим образом. Обозначим через $w_{fiz}(t)$ интенсивность физических возмущений, $w_{inst}(t)$ – интенсивность институциональных возмущений, $w_{ryn}(t)$ – интенсивность рыночных возмущений, $w_{tex}(t)$ – интенсивность технологических возмущений. Тогда вектор возмущений имеет вид:

$$w(t) = (w_{fiz}(t) \ w_{inst}(t) \ w_{ryn}(t) \ w_{tex}(t)),$$

где каждая компонента $w(t)$ представляет интенсивность соответствующего типа возмущений в момент времени t . Существенным отличием от моделей цифровых экосистем (Tsai et al., 2022) является отсутствие предположения о доминировании какого-либо одного типа возмущений – система должна сохранять устойчивость при произвольных комбинациях компонент вектора $w(t)$.

Центральный вопрос исследования: при каких условиях адаптивная бизнес-модель сохраняет устойчивость, то есть способность возвращаться к функциональному состоянию после воздействия возмущений ограниченной интенсивности. Традиционные подходы к обеспечению устойчивости бизнес-моделей основываются на принципе оптимизации – поиске единственной конфигурации параметров, максимизирующей целевую функцию при заданных ограничениях (Burkov et al., 2012). Однако в условиях многокомпонентной среды с высокой неопределенностью оптимальная конфигурация является динамической и зависит от текущего состояния системы и характера возмущений.

Концепция парадоксального управления, развитая в работах (Ricciardi et al., 2016; Smith & Lewis, 2011), предлагает альтернативный подход: вместо выбора между противоположными стратегиями (exploitation vs. exploration, stability vs. flexibility) организация должна развивать способность к динамическому переключению между ними. Применительно к проблеме устойчивости это означает наличие двух взаимодополняющих режимов функционирования.

Режим стабильности (контур R1). Система минимизирует отклонения от целевого состояния, используя накопленные буферы и стандартизированные процедуры. Математически это соответствует балансирующей обратной связи, которая имеет вид:

$$u_{stability}(t) = -K_1 \cdot (x(t) - x^*),$$

где x^* обозначает целевое состояние, $K_1 > 0$ – коэффициент стабилизации.

Режим адаптации (контур R2). Система активно трансформирует свою структуру в ответ на существенные изменения среды, что может временно увеличивать отклонения, но обеспечивает долгосрочную жизнеспособность. Это соответствует усиливающей обратной связи с элементами обучения:

$$u_{adaptation}(t) = K_2 \cdot \nabla_x J(x, w) + \eta(t),$$

где $J(x, w)$ обозначает функцию приспособленности к текущим условиям среды, $\eta(t)$ – стохастическая компонента поиска новых решений.

Ключевым элементом адаптивной бизнес-модели является узел парадоксального управления $u_{paradox}$, осуществляющий взвешенное переключение между режимами:

$$u_{paradox}(t) = (1 - \lambda(t)) \cdot u_{stability}(t) + \lambda(t) \cdot u_{adaptation}(t),$$

где $\lambda(t)$ обозначает адаптивную функцию переключения, принимающую значения в интервале от 0 до 1, и определяется текущим уровнем стресса системы.

В контексте адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды буферы представляют собой запасы ресурсов различной природы, позволяющие абсорбировать внешние шоки без немедленной деградации ключевых функций.

Вектор буферов формализуется следующим образом. Обозначим через $B_{finans}(t)$ финансовые резервы, $B_{zapas}(t)$ – материальные запасы, $B_{moshn}(t)$ – резервные мощности, $B_{komp}(t)$ – компетентностный буфер. Тогда:

$$B(t) = (B_{finans}(t) B_{zapas}(t) B_{moshn}(t) B_{komp}(t)).$$

Динамика буферов определяется балансом процессов пополнения и расхода:

$$\frac{dB_i}{dt} = \rho_i(S, B, \pi) - \delta_i(S, B, w) \cdot B_i(t),$$

где ρ_i – функция пополнения i -го буфера, зависящую от уровня стресса S , текущего состояния буферов B и прибыльности системы π ; δ_i – функция расхода, возрастающая при увеличении внешних возмущений w .

Критическим является понятие эффективности буфера – способности буферных запасов снижать уровень стресса системы:

$$\varepsilon_B(B) = \frac{\partial}{\partial B} \left(-\frac{dS}{dt} \right) > 0.$$

Положительность эффективности буфера означает, что увеличение буферных запасов при прочих равных условиях ускоряет снижение уровня стресса, что является необходимым условием устойчивости.

Для агрегированного описания состояния адаптивной бизнес-модели вводится понятие уровня стресса $S(t)$, которое представляет собой меру отклонения системы от устойчивого функционирования. Уровень стресса аккумулирует воздействие внешних возмущений и отражает степень напряженности адаптационных механизмов. Предполагается, что $S(t) \geq 0$.

Динамика уровня стресса описывается дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{dS}{dt} = \phi_{shock}(w(t)) - \alpha(S, B) \cdot S(t).$$

Первый член в правой части уравнения обозначает поток шоков, второй член обозначает адаптацию. Здесь функция ϕ_{shock} преобразует вектор внешних возмущений в скалярную величину притока стресса. Мощность адаптации $\alpha(S, B)$ характеризует скорость снижения стресса за счет внутренних механизмов системы, причем $\alpha(S, B) > 0$.

Функция потока шоков может быть специфицирована различными способами в зависимости от характера взаимодействия компонент среды. Приведем линейную спецификацию:

$$\phi_{shock}(w) = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot (0, w_i),$$

где $\omega_i > 0$ обозначает весовые коэффициенты, отражающие чувствительность системы к i -му типу возмущений.

Мощность адаптации $\alpha(S, B)$ является ключевым параметром, связывающим состояние буферов с динамикой стресса:

$$\alpha(S, B) = \alpha_0 + \alpha_B \cdot g(B) - \alpha_S \cdot h(S),$$

где:

1. $\alpha_0 > 0$ обозначает базовую мощность адаптации;
2. $g(B) \geq 0$ – возрастающая функция от агрегированного уровня буферов;
3. $h(S) \geq 0$ – возрастающая функция, отражающая снижение адаптационных способностей при высоком стрессе;
4. коэффициенты $\alpha(S)$ и $\alpha(B)$ положительны и характеризуют чувствительность.

Существенной особенностью адаптивной бизнес-модели является наличие критического порога стресса S_{crit} , при превышении которого происходит качественное изменение динамики системы. Данный порог определяет границу между режимами согласно следующей формуле:

$$\lambda(t) = \sigma\left(\frac{S(t) - S_{crit}}{\Delta S}\right),$$

где $\sigma(\cdot)$ обозначает сигмоидальную функцию (например, логистическую функцию), $\Delta S > 0$ – параметр ширины переходной зоны.

При значениях $S(t) < S_{crit}$ доминирует контур стабильности (при этом λ близко к нулю): система использует стандартные процедуры и минимизирует расход буферов. При значениях $S(t) > S_{crit}$ активируется контур адаптации (при этом λ близко к единице): система переходит в режим активной трансформации, интенсивно расходуя буферы для поиска новых конфигураций.

Математически это соответствует бифуркации седло-узел в расширенном фазовом пространстве, описываемом переменными S, B и λ , что объясняет возможность резких переходов между режимами функционирования при плавном изменении внешних условий (Strogatz, 2015).

Предложенная концепция адаптивной бизнес-модели согласуется с теорией динамических способностей (Teese et al., 1997; Teese, 2007), рассматривающей способность организации к sensing (восприятию возможностей и угроз), seizing (захвату возможностей) и transforming (трансформации) как ключевой фактор конкурентоспособности в динамичной среде.

4.2. Каузальная диаграмма адаптивной бизнес-модели

На основе концептуальной рамки, изложенной в разделе 4.1, построена CLD адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды (рис. 3).

Контур стабильности R1 (балансирующая петля) обеспечивает поддержание операционной стабильности системы. При увеличении уровня стресса активируется оперативная корректировка, которая через механизм мобилизации ресурсов повышает операционную стабильность.

Контур адаптации R2 (усиливающая петля) активируется при превышении критического порога стресса S_{crit} . Через узел парадоксального управления $u_{paradox}$ система переключается в режим активной трансформации: запускаются процессы НИОКР и реконфигурации, формируются новые способности, которые через механизм буферизации пополняют вектор буферов

$B(t)$. Усиленные буферы повышают мощность адаптации $\alpha(S, B)$, что позволяет системе справляться с возмущениями большей интенсивности.

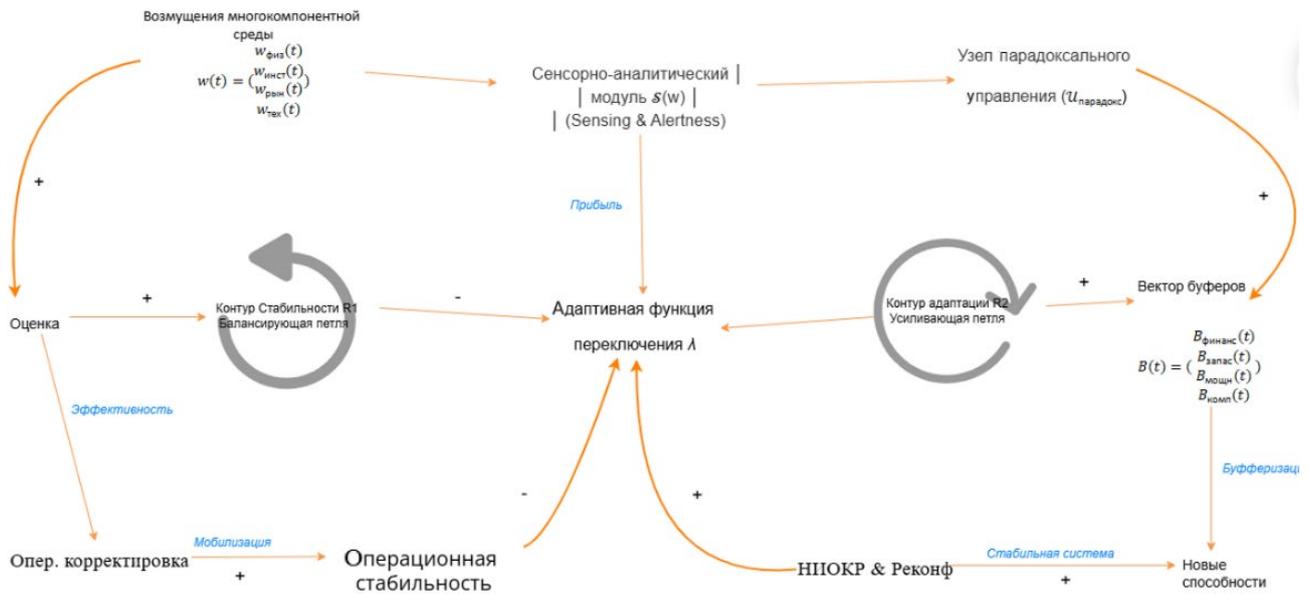


Рисунок 3. Причинно-следственная диаграмма адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды

Центральным элементом диаграммы является узел парадоксального управления $u_{paradox}$, осуществляющий взвешенное переключение между контурами R1 и R2 посредством адаптивной функции $\lambda(t)$. Данный механизм реализует концепцию «тройной парадоксальной конфигурации» (Ricciardi et al., 2016), обеспечивая динамический баланс между стабильностью и адаптивностью.

Вектор возмущений многокомпонентной среды $w(t)$ поступает на вход сенсорно-аналитического модуля $s(w)$, который формирует интегральную оценку внешних воздействий и передает ее в узел парадоксального управления. Модуль реализует функцию sensing в терминах теории динамических способностей (Теесе, 2007).

Правая часть диаграммы отображает динамику вектора буферов $B(t)$, включающего финансовые резервы $B_{finans}(t)$, материальные запасы $B_{zapas}(t)$, резервные мощности $B_{moshn}(t)$ и компетентностный буфер $B_{komp}(t)$. Процесс буферизации обеспечивает накопление ресурсов в периоды стабильного функционирования для их последующего использования при адаптации к возмущениям.

4.3. Диаграмма потоков и запасов адаптивной бизнес-модели

На основе причинно-следственной диаграммы (рис. 3) построена SFD в среде имитационного моделирования VENSIM (рис. 4).

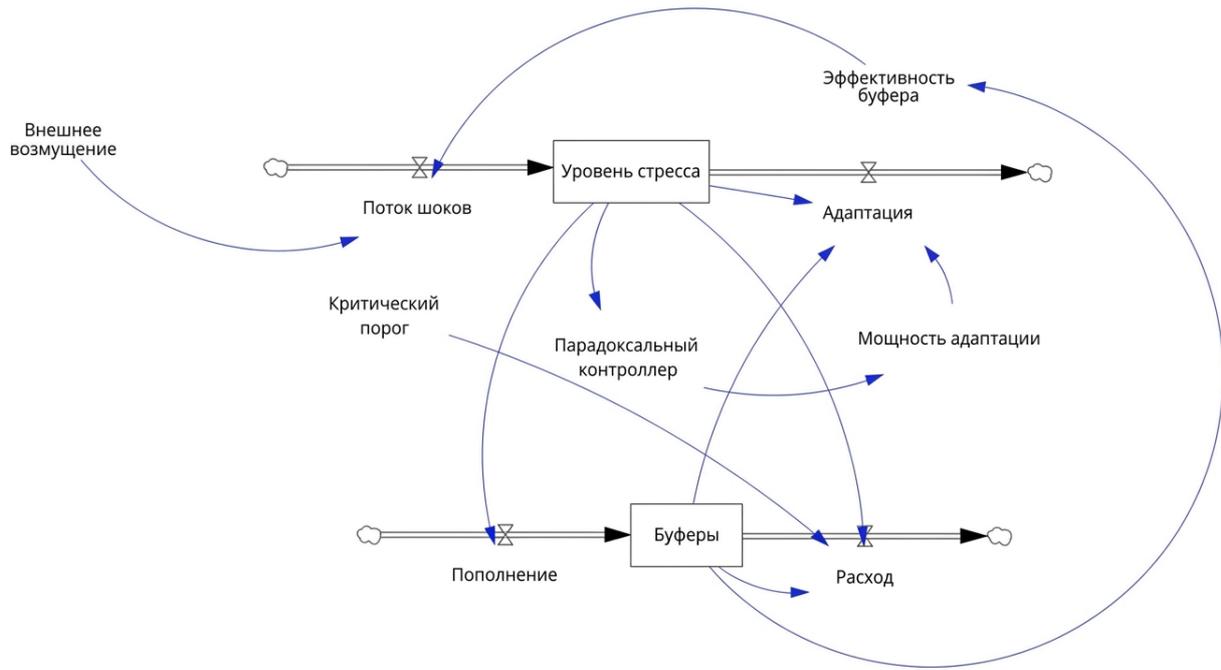


Рисунок 4. Диаграмма потоков и запасов адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды

Модель содержит два ключевых запаса (stocks), которые являются интегралами соответствующих потоков (flows) во времени. Первый запас представляет уровень стресса $S(t)$, который накапливает воздействие внешних возмущений и характеризует степень напряженности системы в каждый момент времени. Второй запас представляет буферы $B(t)$, то есть агрегированный запас организационных ресурсов различной природы, обеспечивающий способность системы абсорбировать внешние шоки без немедленной деградации ее основных функций.

Динамика запасов описывается двумя дифференциальными уравнениями. Для уровня стресса уравнение имеет вид:

$$\frac{dS}{dt} = \phi_{shock}(w(t)) - \alpha(S, B) \cdot S(t),$$

где первый член в правой части, обозначаемый как поток шок, представляет входящий поток, формируемый внешними возмущениями многокомпонентной среды, а второй член представляет исходящий поток адаптации, определяемый мощностью адаптации $\alpha(S, B)$ и текущим уровнем стресса. Для буферов уравнение имеет вид:

$$\frac{dB}{dt} = \rho(S, B, \pi) - \delta(S, B, w) \cdot B(t),$$

где функция пополнения $\rho(S, B, \pi)$ зависит от уровня стресса, текущего состояния буферов и прибыльности системы π , а функция расхода $\delta(S, B, w) \cdot B(t)$ возрастает при интенсивных внешних возмущениях и высоком уровне стресса.

4.4. Численное моделирование и результаты

Верификация предложенной модели выполнена методом имитационного моделирования в среде VENSIM на основе диаграммы потоков и запасов, представленной на рис. 2. Моделирование позволяет проследить совместную динамику уровня стресса $S(t)$ и буферов $B(t)$ при различных сценариях внешних возмущений $w(t)$ и проверить, согласуется ли поведение системы с качественными выводами ISS-анализа.

Для базового сценария (рис. 5) интенсивность внешних возмущений считается ограниченной и стационарной по порядку величины. Начальные условия выбираются в окрестности равновесной точки ($S(0) \approx S^*, B(0) \approx B^*$). В этом случае траектории $S(t)$ и $B(t)$ демонстрируют затухающие колебания: уровень стресса сначала возрастает под действием потока шоков, затем постепенно снижается за счет адаптации, а буферы после небольшого проседания возвращаются к устойчивому значению. Поведение системы остается ограниченным, а влияние начальных условий исчезает, что соответствует ISS-свойству при малых возмущениях.

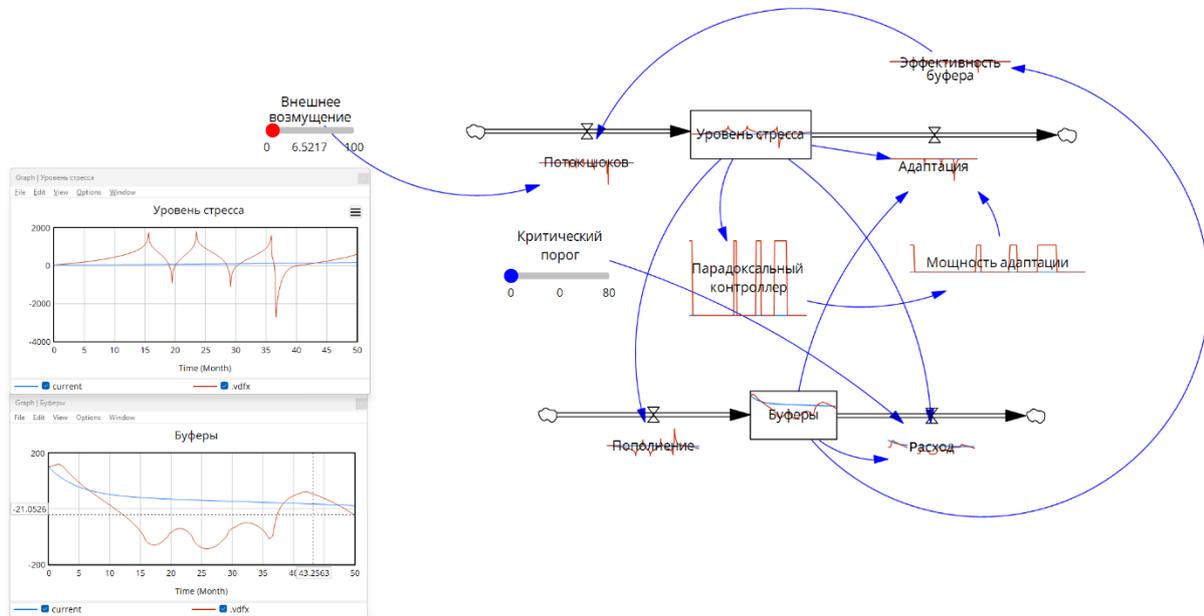


Рисунок 5. Тест 1

Во втором сценарии (рис. 6) моделируется серия кратковременных, но более мощных шоков, которые периодически выводят уровень стресса выше критического порога S_{crit} . В эти моменты активизируется парадоксальный контроллер: функция переключения $\lambda(t)$ быстро приближается к единице, система переходит в режим адаптации, и начинается интенсивный расход буферов на поддержание работоспособности. Графики показывают характерные «ступеньки» в динамике $B(t)$: при каждом крупном шоке буферы заметно снижаются, но затем, по мере возвращения стресса к допустимому уровню, снова пополняются за счет потока $\rho(S, B, \pi)$. При этом, несмотря на локальные всплески стресса, траектории не выходят за пределы разумных границ, что подтверждает устойчивость модели к повторяющимся возмущениям.

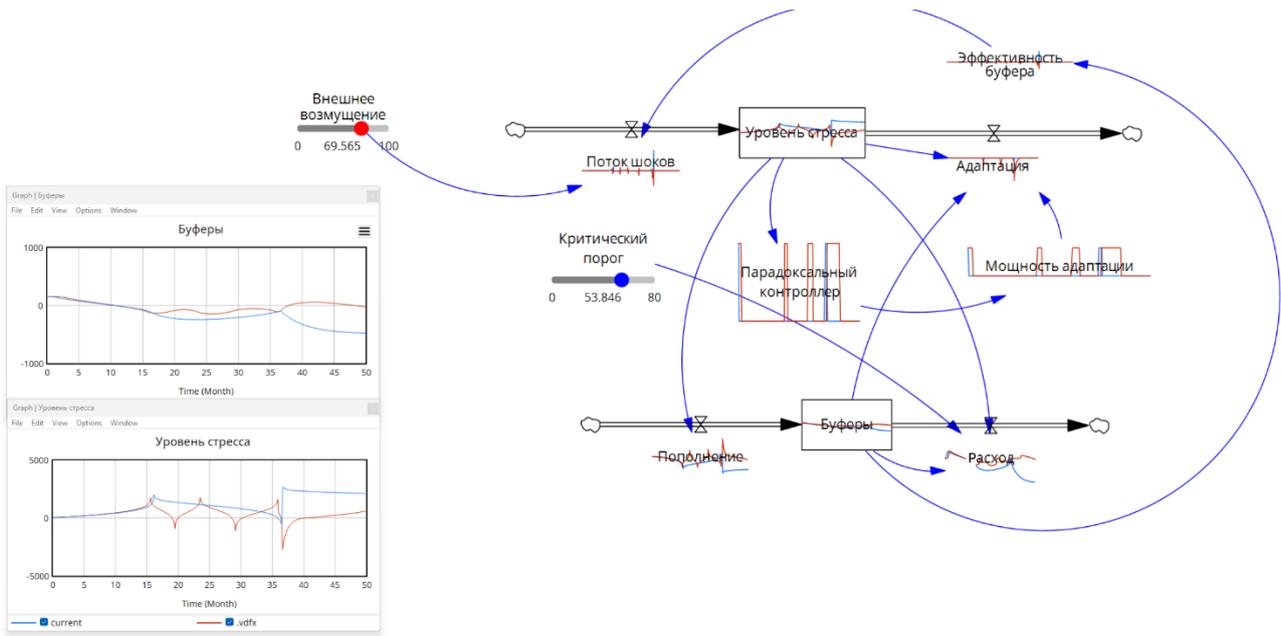


Рисунок 6. Тест 2

В третьем сценарии (рис. 7) рассматривается предельная ситуация, когда интенсивность внешних возмущений близка к верхней границе допустимого диапазона, а начальный уровень буферов $B(0)$ относительно низок. В этом режиме система большую часть времени проводит в зоне $S(t) > S_{crit}$, то есть в режиме адаптации. Моделирование показывает, что при недостаточном уровне буферов траектория $B(t)$ может приблизиться к нулю, после чего способность к адаптации резко падает, а стресс закрепляется на высоком уровне. Такой сценарий соответствует выходу за область притяжения равновесия и иллюстрирует важность поддержания минимально достаточного уровня буферов для сохранения устойчивости.

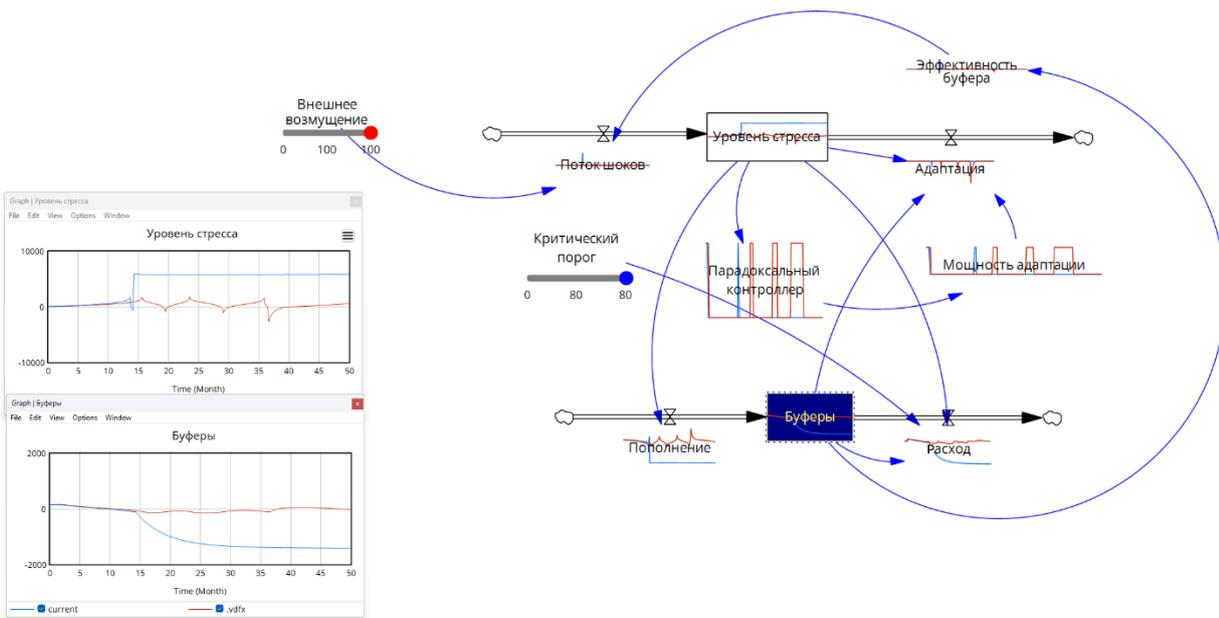


Рисунок 7. Тест 3

Сравнение сценариев демонстрирует, что при умеренных и повторяющихся шоках с сохранением буферов выше критического уровня система проявляет устойчивое поведение: стресс возвращается к допустимым значениям, а буферы успевают восстановиться. При экстремальных шоках и одновременном истощении буферов система утрачивает способность к самовосстановлению, что согласуется с выводами теоретического анализа о конечности области притяжения. Таким образом, численные эксперименты подтверждают два ключевых результата: во-первых, наличие ISS-устойчивости при ограниченных возмущениях и достаточном объеме буферов, во-вторых, критическую роль параметров адаптационного контура и начального уровня ресурсов для долгосрочной устойчивости адаптивной бизнес-модели.

4.5. Условия устойчивости адаптивной бизнес-модели

На основе построенной модели и результатов численного моделирования выявлены ключевые компоненты, определяющие устойчивость адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды. К ним относятся: вектор внешних возмущений $w(t)$, критический порог стресса S_{crit} , уровень буферов $B(t)$ и мощность адаптации $\alpha(S, B)$. Взаимосвязь этих компонент определяет, сохранит ли система способность возвращаться к равновесию после воздействия шоков.

Для формального доказательства устойчивости применяется метод функций Ляпунова в рамках ISS-концепции (Sontag, 2008). Строится квадратичная функция Ляпунова вида:

$$V(S, B) = \frac{1}{2} a_1 (S - S^*)^2 + \frac{1}{2} a_2 (B - B^*)^2,$$

где S^* и B^* – равновесные значения стресса и буферов. Данная функция положительно определена и радиально неограничена, то есть растет без предела при удалении от равновесия (Khalil, 2002).

Вычисление производной dV/dt вдоль траекторий системы показывает, что при выполнении трех условий производная отрицательна (Теесе, 2007; Gimranov et al., 2023):

Условие 1 (ограниченность возмущений). Функция потока шоков $\phi_{shock}(w(t))$ ограничена сверху: существует константа $L > 0$ такая, что $|\phi_{shock}(w(t))| \leq L \|w\|$. Это означает, что внешняя среда не порождает бесконечно больших шоков.

Условие 2 (эффективность буферов). Мощность адаптации возрастает с ростом буферов: $d\alpha/dB > 0$. Чем больше ресурсов накоплено, тем быстрее система снижает стресс.

Условие 3 (восполнение буферов). При $S < S_{crit}$ функция пополнения $\rho(S, B, \pi)$ положительна. Система накапливает ресурсы в периоды стабильности (Serman, 2000).

При выполнении этих условий справедливо неравенство:

$$\frac{dV}{dt} \leq -c \cdot V(S, B) + \gamma \cdot \|w\|^2,$$

где $c > 0$ – коэффициент диссипации, $\gamma > 0$ – константа (Mironchenko & Prieur, 2020). Отсюда по теореме Сонтага следует ISS-устойчивость системы: при ограниченных возмущениях состояние $(S(t), B(t))$ остается ограниченным, а влияние начальных условий со временем исчезает.

В рамках данной работы адаптивность бизнес-модели цифрового предприятия в многокомпонентной среде определяется как способность системы динамически переключаться

между режимом стабильности (оптимизация текущих операций при $S < S_{crit}$) и режимом адаптации (трансформация бизнес-модели при $S > S_{crit}$) в зависимости от уровня внешнего стресса, обеспечивая устойчивость траектории при ограниченных возмущениях. В отличие от традиционных трактовок адаптивности как постоянной готовности к изменениям (Teese et al., 1997; Teese, 2007) или балансировки противоречий (Smith & Lewis, 2011), предлагаемое определение формализует адаптивность через управляемое переключение между взаимоисключающими режимами с явным пороговым критерием.

Таким образом, устойчивость адаптивной бизнес-модели обеспечивается совместным действием трех механизмов: ограниченностью внешних шоков, наличием буферов с положительной эффективностью и способностью системы накапливать ресурсы в периоды низкого стресса. Критический порог S_{crit} играет роль переключателя между режимами парадоксального управления (Smith & Lewis, 2011), но сам по себе не нарушает устойчивость при выполнении указанных условий. Полученные результаты подтверждены численным моделированием в среде VENSIM (раздел 4.4) и согласуются с качественными выводами теории организационного динамизма (Ricciardi et al., 2016).

5. Обсуждение

Разработана двухуровневая математическая модель, в которой базовый уровень описывает динамику пользовательской базы, финансовых резервов, инфраструктуры и партнерской экосистемы, а расширенный уровень учитывает многокомпонентную среду через вектор возмущений, агрегированный уровень стресса и вектор буферов. Нелинейная функция воздействия отражает синергетическое взаимодействие физических, институциональных, рыночных и технологических факторов, что позволяет перейти от изолированного анализа отдельных компонент к исследованию их совместного эффекта. Работы по цифровым экосистемам (Tsai et al., 2022; Evans & Schmalensee, 2016) и устойчивым бизнес-моделям (Lambert et al., 2019; Brenner & Guerrero et al., 2018) используют преимущественно агентное моделирование и концептуальные схемы без математических условий устойчивости. Настоящая работа формализует многокомпонентность через вектор возмущений с синергетическим взаимодействием, дополняя существующие подходы математическим аппаратом.

Механизм парадоксального управления реализует переключение между контуром стабильности и контуром адаптации при превышении критического порога стресса. Противоречие между эксплуатацией существующих возможностей и поиском новых решений разрешается не через постоянный компромисс, а через управляемое переключение в зависимости от состояния системы. Концепция парадоксального управления (Ricciardi et al., 2016; Smith & Lewis, 2011) и организационной двойственности (O'Reilly & Tushman, 2013) описывает необходимость балансировки противоречий, однако не формализует критерий и момент переключения. Предложенная модель уточняет эти концепции через математически определенный критерий на основе уровня стресса, что делает механизм операционализируемым.

На этой основе уточняется понимание адаптивности применительно к многокомпонентной среде. Адаптивность выступает не как абстрактная способность к изменениям, а как количественно описываемая способность управлять переходами между режимами на основе объективного критерия стресса и состояния буферов. В многокомпонентной среде ключевой становится способность буферов поглощать синергетическое воздействие разнотипных факторов и восстанавливаться в стабильные периоды. Теория динамических способностей (Teese

et al., 1997; Teece, 2007) определяет адаптивность через процессы sensing, seizing и transforming, но не связывает их с ресурсными характеристиками и моментами активации. Концепция организационной устойчивости (Lengnick-Hall et al., 2011) не различает возврат к прежней конфигурации от перехода к новой. Предложенное уточнение формализует адаптивность через управляемое переключение с учетом буферов и синергетических возмущений, переводя дискуссию в плоскость количественного анализа.

Формальное доказательство устойчивости в ISS-терминах показывает, что при ограниченности функции воздействия, положительной чувствительности адаптации к буферам и положительности восполнения ресурсов траектория стресса и буферов остается ограниченной при ограниченных возмущениях. Эти три условия образуют неделимую систему: нарушение любого приводит к неустойчивости даже при значительных запасах ресурсов. Теория активных систем (Burkov et al., 2012) утверждает принцип системной целостности, но не предоставляет формального доказательства. Системная динамика (Forrester, 1961; Sterman, 2000) показала роль обратных связей и запасов, ограничиваясь численным моделированием. ISS-концепция развита для технических систем (Sontag, 2008; Khalil, 2002), но не применялась к организациям. Настоящая работа адаптирует ISS-метод для анализа организационной устойчивости, дополняя численное моделирование формальным доказательством.

6. Заключение

В данной работе разработана математическая модель адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия, интегрирующая теорию активных систем и системную динамику. Модель состоит из базового уровня, описывающего четыре переменные состояния (пользовательская база $U(t)$, финансовые резервы $F(t)$, качество инфраструктуры $Q(t)$, партнерская экосистема $P(t)$), и расширенного уровня, учитывающего многокомпонентную среду через вектор возмущений $w(t)$ и агрегированные переменные $S(t)$ (уровень стресса) и $B(t)$ (вектор буферов).

Формализован механизм парадоксального управления, реализующий переключение между режимом стабильности (контур R1, ориентированный на оптимизацию текущих операций) и режимом адаптации (контур R2, ориентированный на трансформацию бизнес-модели) через критический порог стресса S_{crit} . Доказаны условия устойчивости ISS-методом: система устойчива при выполнении трех необходимых и достаточных условий ограниченность функции потока возмущений, положительная чувствительность мощности адаптации к буферам и положительность функции восполнения буферов в периоды стабильности. Численная верификация в среде VENSIM на трех сценариях подтвердила теоретические предсказания и продемонстрировала наличие области притяжения равновесного состояния.

Модель может быть применена для раннего обнаружения угроз устойчивости, поддержки инвестиционных решений и разработки стратегий цифровых платформ. Важно отметить, что устойчивость, доказанная в работе, носит локальный характер и она гарантируется при условии, что система находится в определенной области фазового пространства и возмущения остаются в пределах ограниченности. При выходе за пределы этой области или при катастрофических возмущениях условия ISS-устойчивости могут нарушиться. Кроме того, модель не учитывает стохастическую природу возмущений, агрегирует многомерные буферы в одномерный вектор, что теряет специфику различных типов ресурсов и их взаимозаменяемости.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются, во-первых, расширение модели на случай многомерных буферов с явным учетом различной динамики их мобилизации и взаимозаменяемости, во-вторых, анализ поведения системы под влиянием стохастических и экстремальных возмущений с применением теории критических переходов. Особый интерес представляет применение теории пучков для формализации согласованности локальных состояний различных компонент среды и их агрегирования в глобальное воздействие на предприятие, что позволит строго описать синергетические эффекты между физическими, институциональными, рыночными и технологическими факторами. Кроме того, важной задачей является эмпирическая верификация модели на данных реальных цифровых предприятий различных отраслей для оценки параметров и проверки предсказательной способности.

Список литературы

- Alqahtani, F., Akhtar, A., Araban, S., 2020. Digital transformation and organizational agility: a systematic literature review. *Journal of Decision Systems* 29 (4), 317–336.
- Armstrong, M., 2006. Competition in two-sided markets. *The RAND Journal of Economics* 37 (3), 668–691. <https://doi.org/10.1111/j.1756-2171.2006.tb00037.x>
- Barreteau, O., Bousquet, F., Attonaty, J.M., 2001. Role-playing games for opening space to negotiation in natural resource management. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4 (2).
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., 1999. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, New York, Oxford.
- Brenner, B., Guerrero, M., 2018. Transformative Sustainable Business Models in the Light of the Digital Imperative – A Global Business Economics Perspective. *Sustainability* 10 (12), 4428. <https://doi.org/10.3390/su10124428>
- Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A., 2012. *Theory of active systems: an introduction*. Librocom, Moscow
- Colombi, C., Marengi, M.D., Gazzola, P., 2023. Fashion Digital Transformation: Innovating Business Models toward Circular Economy and Sustainability. *Sustainability* 15 (6), 4942. <https://doi.org/10.3390/su15064942>
- Evans, D.S., Schmalensee, R., 2016. *Matchmakers: The New Economics of Multisided Platforms*. Harvard Business Review Press, Boston.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Rodionov, D.G., Konnikov, E.A., Konnikova, O.A., 2018. Approaches to Ensuring the Sustainability of Industrial Enterprises of Different Technological Levels. *The Journal of Social Sciences Research (Special Issue 3)*, 277–282. <https://doi.org/10.32861/jssr.spi3.277.282>
- Granovetter, M., 1978. Threshold models of collective behavior. *American Journal of Sociology* 83 (6), 1420–1443. <https://doi.org/10.1086/226707>
- Hussain, H., De Vries, M., 2024. System dynamics applied in enterprise engineering: A systematic literature review. *Journal of Modelling in Management* 20 (1), 1–29. <https://doi.org/10.1108/JM2-05-2023-0082>
- Irajifar, L., Chen, H., Lak, A., Sharifi, A., Cheshmehzangi, A., 2023. The nexus between digitalization and sustainability: A scientometrics analysis. *Heliyon* 9 (5), e15172. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15172>
- Johnson, N.L., Kotz, S., Balakrishnan, N., 1994. *Continuous Univariate Distributions 1*. Wiley, New York.
- Khalil, H.K., 2002. *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Lambert, S., Davidson, R., 2019. Capturing Dynamics in Business Model Frameworks. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 5 (1), 8. <https://doi.org/10.3390/joitmc5010008>
- Lengnick-Hall, C.A., Beck, T.E., Lengnick-Hall, M.L., 2011. Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management. *Human Resource Management Review* 21 (3), 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2010.07.001>
- Macal, C.M., North, M.J., 2010. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation* 4 (3), 151–162. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Metcalf, R.M., 1995. Metcalfe's law: A network becomes more valuable as it reaches more users. *Infoworld* 17 (40), 53–54.
- Mironchenko, A., Prieur, C., 2020. Input-to-State Stability of Infinite-Dimensional Systems: Recent Results and Open Questions. *SIAM Review* 62 (3), 529–614. <https://doi.org/10.1137/19M1291248>
- O'Reilly, C.A., Tushman, M.L., 2013. Organizational Ambidexterity: Past, Present, and Future. *Academy of Management Perspectives* 27 (4), 324–338. <https://doi.org/10.5465/amp.2013.0025>
- Østergaard, P.A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., Kalogirou, S., 2020. Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy* 146, 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>
- Pasqualino, R., Demartini, M., Bagheri, F., 2021. Digital Transformation and Sustainable Oriented Innovation: A System Transition Model for Socio-Economic Scenario Analysis. *Sustainability* 13 (21), 11564. <https://doi.org/10.3390/su132111564>
- Ricciardi, F., Zardini, A., Rossignoli, C., 2016. Organizational dynamism and adaptive business model innovation: The triple paradox configuration. *Journal of Business Research* 69 (11), 5487–5493. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.04.154>
- Rochet, J.C., Tirole, J., 2003. Platform Competition in Two-Sided Markets. *Journal of the European Economic Association* 1 (4), 990–1029. <https://doi.org/10.1162/154247603322493212>
- Rogers, E.M., 2003. *Diffusion of Innovations*, 5th ed. Free Press, New York.
- Schoenenberger, L., Schmid, A., Tanase, R., Beck, M., Schwaninger, M., 2021. Structural Analysis of System Dynamics Models. *Simulation Modelling Practice and Theory* 110, 102333. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102333>
- Senge, P.M., 1990. *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Doubleday/Currency, New York.

- Smith, W.K., Lewis, M.W., 2011. Toward a Theory of Paradox: A Dynamic equilibrium Model of Organizing. *Academy of Management Review* 36 (2), 381–403. <https://doi.org/10.5465/amr.2009.0223>
- Sontag, E.D., 2008. Input to State Stability: Basic Concepts and Results, in: Nistri, P., Stefani, G. (eds.) *Nonlinear and Optimal Control Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 163–220. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77653-6_3
- Speich, M., Ulli-Beer, S., 2021. Combining Business Model Innovation and Model-Based Analysis to Tackle the Deep Uncertainty of Societal Transitions – A Case Study on Industrial Electrification and Power Grid Management. *Sustainability*, 13 (13), 7264. <https://doi.org/10.3390/su13137264>
- Sterman, J.D., 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill, Boston.
- Strogatz, S.H., 2015. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9780429492563>
- Teece, D.J., 2007. Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal* 28 (13), 1319–1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Teece, D.J., Pisano, G., Shuen, A., 1997. Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal* 18 (7), 509–533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)
- Tolstykh, T., Gamidullaeva, L., Shmeleva, N., 2020. Elaboration of a Mechanism for Sustainable Enterprise Development in Innovation Ecosystems. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 6 (4), 95. <https://doi.org/10.3390/joitmc6040095>
- Tsai, C.H., Zdravkovic, J., Stima, J., 2022. Modeling Digital Business Ecosystems: A Systematic Literature Review. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly (CSIMQ)* 30, 1–30 <https://doi.org/10.7250/csimq.2022-30.01>
- Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Теория активных систем: введение. М.: Либроком, 2012.
- Гимранов Р.Д., Лугачёв М.И., Тамбовцев В.Л. Динамические способности управленческих единиц в крупной компании // *Journal of Economic Regulation*. 2023. Т. 14. № 4. С. 31–47. <https://doi.org/10.17835/2078-5429.2023.14.4.031-047>
- Новиков Д.А. Кибернетика: навигатор. М.: ЛЕНАНД, 2016.

References

- Alqahtani, F., Akhtar, A., Araban, S., 2020. Digital transformation and organizational agility: a systematic literature review. *Journal of Decision Systems* 29 (4), 317–336.
- Armstrong, M., 2006. Competition in two-sided markets. *The RAND Journal of Economics* 37 (3), 668–691. <https://doi.org/10.1111/j.1756-2171.2006.tb00037.x>
- Barreteau, O., Bousquet, F., Attonaty, J.M., 2001. Role-playing games for opening space to negotiation in natural resource management. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4 (2).
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., 1999. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, New York, Oxford.
- Brenner, B., Guerrero, M., 2018. Transformative Sustainable Business Models in the Light of the Digital Imperative – A Global Business Economics Perspective. *Sustainability* 10 (12), 4428. <https://doi.org/10.3390/su10124428>
- Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A., 2012. *Theory of active systems: an introduction*. Librocom, Moscow.
- Colombi, C., Marengi, M.D., Gazzola, P., 2023. Fashion Digital Transformation: Innovating Business Models toward Circular Economy and Sustainability. *Sustainability* 15 (6), 4942. <https://doi.org/10.3390/su15064942>
- Evans, D.S., Schmalensee, R., 2016. *Matchmakers: The New Economics of Multisided Platforms*. Harvard Business Review Press, Boston.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Gimranov R.D., Lugachev M.I., Tambovtsev V.L., 2023. Dynamic Abilities of Management Units in a Large Company. *Journal of Economic Regulation* 14 (4), 31–47. <https://doi.org/10.17835/2078-5429.2023.14.4.031-047>
- Granovetter, M., 1978. Threshold models of collective behavior. *American Journal of Sociology* 83 (6), 1420–1443. <https://doi.org/10.1086/226707>
- Hussain, H., De Vries, M., 2024. System dynamics applied in enterprise engineering: A systematic literature review. *Journal of Modelling in Management* 20 (1), 1–29. <https://doi.org/10.1108/JM2-05-2023-0082>
- Irajifar, L., Chen, H., Lak, A., Sharifi, A., Cheshmehzangi, A., 2023. The nexus between digitalization and sustainability: A scientometrics analysis. *Heliyon* 9 (5), e15172. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15172>
- Johnson, N.L., Kotz, S., Balakrishnan, N., 1994. *Continuous Univariate Distributions 1*. Wiley, New York.
- Khalil, H.K., 2002. *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Lambert, S., Davidson, R., 2019. Capturing Dynamics in Business Model Frameworks. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 5 (1), 8. <https://doi.org/10.3390/joitmc5010008>
- Lengnick-Hall, C.A., Beck, T.E., Lengnick-Hall, M.L., 2011. Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management. *Human Resource Management Review* 21 (3), 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2010.07.001>
- Macal, C.M., North, M.J., 2010. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation* 4 (3), 151–162. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Metcalfé, R.M., 1995. Metcalfé's law: A network becomes more valuable as it reaches more users. *Infoworld* 17 (40), 53–54.
- Mironchenko, A., Prieur, C., 2020. Input-to-State Stability of Infinite-Dimensional Systems: Recent Results and Open Questions. *SIAM Review* 62 (3), 529–614. <https://doi.org/10.1137/19M1291248>
- Novikov D.A., 2016. *Кибернетика: навигатор [Cybernetics: navigator]*. LENAND, Moscow.
- O'Reilly, C.A., Tushman, M.L., 2013. Organizational Ambidexterity: Past, Present, and Future. *Academy of Management Perspectives* 27 (4), 324–338. <https://doi.org/10.5465/amp.2013.0025>
- Østergaard, P.A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., Kalogirou, S., 2020. Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy* 146, 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>
- Pasqualino, R., Demartini, M., Bagheri, F., 2021. Digital Transformation and Sustainable Oriented Innovation: A System Transition Model for Socio-Economic Scenario Analysis. *Sustainability* 13 (21), 11564. <https://doi.org/10.3390/su132111564>
- Ricciardi, F., Zardini, A., Rossignoli, C., 2016. Organizational dynamism and adaptive business model innovation: The triple paradox configuration. *Journal of Business Research* 69 (11), 5487–5493. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.04.154>

- Rochet, J.C., Tirole, J. (2003). Platform competition in two-sided markets. *Journal of the European Economic Association*, 1(4), 990-1029. <https://doi.org/10.1162/154247603322493212>
- Rogers, E.M., 2003. *Diffusion of Innovations*, 5th ed. Free Press, New York.
- Schoenenberger, L., Schmid, A., Tanase, R., Beck, M., Schwaninger, M., 2021. Structural Analysis of System Dynamics Models. *Simulation Modelling Practice and Theory* 110, 102333. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102333>
- Senge, P.M., 1990. *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Doubleday/Currency, New York.
- Smith, W.K., Lewis, M.W., 2011. Toward a Theory of Paradox: A Dynamic equilibrium Model of Organizing. *Academy of Management Review* 36 (2), 381–403. <https://doi.org/10.5465/amr.2009.0223>
- Sontag, E.D., 2008. Input to State Stability: Basic Concepts and Results, in: Nistri, P., Stefani, G. (eds.) *Nonlinear and Optimal Control Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77653-6_3
- Speich, M., Ulli-Beer, S., 2021. Combining Business Model Innovation and Model-Based Analysis to Tackle the Deep Uncertainty of Societal Transitions – A Case Study on Industrial Electrification and Power Grid Management. *Sustainability*, 13 (13), 7264. <https://doi.org/10.3390/su13137264>
- Sterman, J.D., 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill, Boston.
- Strogatz, S.H., 2015. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9780429492563>
- Teece, D.J., Pisano, G., Shuen, A., 1997. Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal* 18 (7), 509–533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)
- Teece, D.J., 2007. Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal* 28 (13), 1319–1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Tolstykh, T., Gamidullaeva, L., Shmeleva, N., 2020. Elaboration of a Mechanism for Sustainable Enterprise Development in Innovation Ecosystems. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 6 (4), 95. <https://doi.org/10.3390/joitmc6040095>
- Tsai, C.H., Zdravkovic, J., Stima, J., 2022. Modeling Digital Business Ecosystems: A Systematic Literature Review. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly (CSIMQ)* 30, 1–30 <https://doi.org/10.7250/csimq.2022-30.01>

Статья поступила в редакцию 30.09.2025, одобрена после рецензирования 15.11.2025, принята к публикации 30.11.2025.

The article was submitted 30.09.2025, approved after reviewing 15.11.2025, accepted for publication 30.11.2025.

Информация об авторах:

1. Даниленко Кирилл, аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0009-0001-7753-193X>, danilenko@kirill-viktorovich.ru
2. Ирина Брусакова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0003-2832-7833>, brusakovai@mail.ru

About the authors:

1. Danilenko Kirill, graduate student, St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0001-7753-193X>, danilenko@kirill-viktorovich.ru
3. Irina Brusakova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-2832-7833>, brusakovai@mail.ru