УДК 519.71:519:86:007.5

DOI: https://doi.org/10.25728/pu.2018.6.1

МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ В РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

В.Б. Гусев

Представлен обзор состояния проблемы разработки и применения моделей автономного управления в развивающихся системах. Предложено формализованное описание класса моделей автономного управления развивающимися системами с воспроизводством. Кратко описана концепция сочетания механизмов индикативного планирования и регулирования в условиях технологических и информационных ограничений. Сформулированы проблемные моменты и даны рекомендации для построения систем автономного управления в условиях нестабильности и внешних возмущений, основанные на примерах индикативного планирования и управления региональным развитием.

Ключевые слова: модель, развивающаяся система, автономное управление, индикативное планирование, регулирование, технологические и информационные ограничения.

ВВЕДЕНИЕ

Развивающиеся системы, такие как социально-экономические, организационные, медико-биологические, экологические и другие, отличаются рядом характерных свойств. С одной стороны, они обладают элементами целенаправленности, возможностями воспроизводства внутренних ресурсов, функционирования в неблагоприятной среде, адаптации к изменяющимся условиям [1—3]. С другой стороны, эти системы могут демонстрировать циклический характер развития, непредсказуемые спады и кризисы или даже хаотические изменения своего состояния [4—6]. Примеры такой динамики дает мировая экономическая система [7].

Проблема автономного управления развивающимися системами особенно актуальна для национальной экономики в ситуации внешнеэкономических санкций, приводящей к локализации производственной деятельности. Аналогичная проблема возникает у регионов освоения ископаемых ресурсов или у моногородов, когда ведущая отрасль постепенно сворачивает свою деятельность [8, 9]. Очевидный путь решения — диверсификация экономики за счет внутренних инвестиций [10]. Функции одной только «невидимой руки рынка» для выхода из критической ситуации в данном случае не достаточно. Для этого требуется разработка и реализация индикативного плана долгосрочного режима накопления и инвестирования в развитие экономики, сочетаемого с контуром обратной связи [11—14]. Расчет плана должен учитывать специфику и ограничения автономного режима, в частности, оценку технологического потенциала экономической системы (потенциала продуктивности и связанной с ним предельной рентабельности и предельных темпов роста для замкнутой модели экономики [15]). Для реализации автономного режима развития экономической системы с применением методов индикативного планирования требуются механизмы, позволяющие автоматически подстраиваться к текущей ситуации в соответствии с выработанной стратегией [16, 17].

Моделирование процессов социально-экономического развития, как правило, ориентировано на достижение режима стабильного роста. В его задачи входят:

- исследование качественного поведения процессов в развивающейся системе;
- разработка методов и процедур формирования управляющих воздействий и индикативного планирования;
- изучение влияния различных механизмов автономного управления на динамику развития.

При этом учитывается существенное влияние факторов неопределенности, а также различные гипотезы поведения агентов.

Точность математических моделей рассматриваемых систем обычно недостаточна для построения эффективных механизмов управления, применяемых, например, в технических устройствах и системах [18—20]. Это связано с открытостью развивающихся систем, нестабильностью внешней среды, трудностями формализации и информационного обеспечения применяемых моделей.

Неопределенность и дефицит точности наблюдаемых данных находят отражение в специфике применяемых моделей развивающихся систем. С одной стороны, у них, как правило, нет однозначной зависимости показателей состояния среды от расчетных показателей системы (отсутствует свойство наблюдаемости), т. е. конкретный результат функционирования модели может реализовываться при различных значениях состояния среды из некоторого множества, что можно трактовать как предпосылку ее автономного функционирования при соответствующем механизме управления. С другой стороны, совокупность типов разрабатываемых моделей развивающихся систем отличается разнообразием, отражая доступную степень информированности и возможные целевые установки при принятии решений. Эта совокупность включает в себя динамические модели макроэкономических процессов [21—23], имитационные модели микроэкономических процессов [24—26], игровые модели выбора решений [27, 28], экспертные модели оценивания ситуаций [29, 30], автоматные модели самовоспроизводства [31], сетевые модели организационных структур [32, 33], когнитивные модели анализа сценариев и управления [34, 35], нейронные модели реализации и управления проектами [36, 37], вероятностные модели эконометрического анализа данных [38, 39] и др. Особо отметим класс моделей активных систем [40—42], сочетающих стратегическое целеполагание и учет локальных интересов, наиболее близко соответствующий рассматриваемой концепции управления. Этот класс включает в себя преимущественно статические модели.

В настоящей работе рассмотрены возможные формализованные подходы к анализу рассматриваемого класса систем. Обобщением класса моделей управляемых динамических систем служит их метамодель. Дано определение наблюдаемости для рассматриваемых систем, показана ее связь с понятием автономности модели развивающейся системы. Затронуты вопросы реализации и применения моделей целенаправленных систем с автономным управлением, учитывающие многоцелевые постановки задач управления, модели роста, воспроизводства, сбалансированности саморазвития систем, автономного управления с оптимизирующим регулятором. Приведено описание проблемы монопродуктовой экономики и ее решения путем диверсификации в рамках методологии автономного управления. Дано краткое описание собственных результатов автора в рамках рассматриваемой тематики.

1. МЕТАМОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Под *метамоделью открытой управляемой динамической системы* будем понимать совокупность

$$\langle \mathbf{Y}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{X}, \mathbf{T}, \boldsymbol{\Omega} \rangle,$$

где $\mathbf{Y}$ — множество значений динамического вектора состояния системы, $\mathbf{P}$ — множество значений вектора параметров системы, $\mathbf{U}$ — множество значений векторов управления, $\mathbf{X}$ — множество значений вектора состояния внешней среды, $\mathbf{T}$ — множество значений параметра модельного времени, $\boldsymbol{\Omega}$ — оператор действия системы

$$\mathbf{W} \xrightarrow{\Omega} \mathbf{Y}.$$

Здесь $\mathbf{W}$ — множество условий функционирования — прямое произведение множеств $\mathbf{X}$, $\mathbf{P}$, $\mathbf{U}$

$$\mathbf{W} = \mathbf{X} \otimes \mathbf{P} \otimes \mathbf{U}.$$

Если множество условий функционирования $\mathbf{W}$ не зависит от множества значений вектора состояния внешней среды $\mathbf{X}$,

$$\mathbf{W} = \mathbf{P} \otimes \mathbf{U},$$

то совокупность $\langle \mathbf{Y}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{X}, \mathbf{T}, \boldsymbol{\Omega} \rangle$ будем называть *метамоделью замкнутой управляемой динамической системы.*

Под вектором состояния системы понимается векторная функция времени $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{Y}$, под вектором параметров — числовой вектор $\mathbf{p} \in \mathbf{P}$, под вектором управлений — векторная функция времени $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{U}$, под вектором состояния внешней среды — векторная функция времени $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{X}$, $t \in \mathbf{T}$.

Множества $\mathbf{Y}$, $\mathbf{U}$, $\mathbf{X}$ принадлежат соответствующим нормированным функциональным пространствам; множество $\mathbf{P}$ принадлежит многомерному, а множество $\mathbf{T}$ — одномерному евклидову пространству.

При фиксированном векторе параметров $\bar{\mathbf{p}} \in \mathbf{P}$ и векторе состояния внешней среды $\bar{\mathbf{x}}(t) \in \mathbf{X}$ множество состояний $\mathbf{Y}$ сужается до множества $\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}^{\Omega}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{p}}, \mathbf{U})$, и таким образом модель становится *замкнутой.*

Если отображение, задаваемое оператором $\boldsymbol{\Omega}$, является однозначным, а вектор состояния внешней среды $\mathbf{x}(t)$ и вектор параметров $\mathbf{p}$ детерминированы, такую модель будем называть *детерминированной.* Для детерминированной модели множество состояний $\mathbf{Y}$ однозначно определяется множеством условий функционирования $\mathbf{W}$, т. е.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{X},\ \mathbf{P},\ \mathbf{U}).$$

Примерами *недетерминированной* модели служат модель, включающая в себя стохастический вектор состояния внешней среды $\mathbf{x}(t)$ или вектор параметров $\mathbf{p}$, и модель с неоднозначным оператором $\mathbf{\Omega}$.

1.1. Дискретная модель динамической системы

Если $\mathbf{T}$ — дискретное множество, то модель будем называть *дискретной.*

Если множество $\mathbf{T}$ состоит из единственного элемента, то модель будем называть *статичной.*

Множество $\mathbf{T}$ может иметь сложную структуру, включая подмножества внутреннего $\mathbf{T}^I$ и внешнего $\mathbf{T}^O$ времени. В этом случае вектор состояния системы $\mathbf{y}(t)$ определен на подмножестве внутреннего времени $t \in \mathbf{T}^I$, а вектор состояния внешней среды $\mathbf{x}(\tau)$ — на подмножестве внешнего времени $\tau \in \mathbf{T}^O$. Синхронизация подмножеств времени может осуществляться с помощью взаимно-однозначного отображения $t = \varphi(\tau)$ [43, 44].

Дискретную модель динамической системы, построенную на основе формализма теории автоматов [31], назовем *автоматной.* В предположении, когда $\mathbf{Y}$ — множество значений вектора состояния системы и $\mathbf{W}$ — множество условий функционирования совпадают, один такт такого автомата в момент t_i реализуется так:

$$\mathbf{W}(t_i) \xrightarrow{\mathbf{\Omega}_i} \mathbf{W}(t_{i+1}).$$

1.2. Наблюдаемость и автономность модели управляемой динамической системы

Функционирование системы позволяет задавать ее формализованное описание, на основании которого определяется порядок вычислений вектора состояния системы $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{Y}$ при численной реализации оператора действия $\mathbf{\Omega}$.

Свойство наблюдаемости оператора $\mathbf{\Omega}$ на подмножестве допустимых состояний системы $\bar{\mathbf{Y}} \subseteq \mathbf{Y}$ находится в определенной связи со свойством автономности и может определяться следующим образом. Пусть данному вектору состояния системы $\mathbf{y}$ соответствует подмножество состояний внешней среды $\mathbf{X}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{y}) \subseteq \mathbf{X}$,

$$\forall \mathbf{y} \in \bar{\mathbf{Y}},\quad \exists \mathbf{X}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{y}),\quad \mathbf{p} \in \mathbf{P},\quad \mathbf{u} \in \mathbf{U},$$

$$\forall \mathbf{x} \in \mathbf{X}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{y}) : \mathbf{y} \in \mathbf{Y}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{x},\ \mathbf{p},\ \mathbf{u}).$$

Имеет место $\mathbf{\Omega}$-*наблюдаемость* модели, если множество состояний внешней среды $\mathbf{X}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{y})$, соответствующее данному вектору состояния системы $\mathbf{y}$, состоит из одного элемента, что означает однозначную зависимость состояния системы от состояния внешней среды (*наблюдаемость* в классическом понимании). Пусть множество *допустимых* состояний внешней среды $\bar{\mathbf{X}} \subseteq \mathbf{X}$ включает в себя только те состояния, которые определяют допустимые состояния системы:

$$\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^{\mathbf{\Omega}}(\bar{\mathbf{Y}}) = \bigcup_{\mathbf{y} \in \bar{\mathbf{Y}}} \mathbf{X}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{y}).$$

Если множество $\mathbf{X}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{y})$ пусто, а $\bar{\mathbf{X}}$ не пусто, это означает, что состояние $\mathbf{y}$ нереализуемо (недопустимо). В случае, когда любому элементу множества допустимых состояний системы $\bar{\mathbf{Y}} \subseteq \mathbf{Y}$ соответствует все множество допустимых состояний внешней среды $\bar{\mathbf{X}}$,

$$\forall \mathbf{y} \in \bar{\mathbf{Y}} : \bar{\mathbf{X}} \subseteq \mathbf{X}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{y}),$$

модель системы *автономна* на допустимом множестве $\bar{\mathbf{Y}}$. Например, модель системы автономна, когда множество $\bar{\mathbf{x}}$ пусто или состоит из единственного элемента. В последнем случае имеют место одновременно наблюдаемость и автономность. Когда условие автономности нарушается, можно говорить о *частичной автономности* модели системы на допустимом множестве $\bar{\mathbf{Y}}$, если найдется собственное подмножество $\bar{\bar{\mathbf{Y}}} \subset \bar{\mathbf{Y}} \subseteq \mathbf{Y}$, на котором выполняется условие автономности. Аналогично можно говорить о частичной автономности на множестве $\bar{\mathbf{X}}$, если найдется собственное подмножество $\bar{\bar{\mathbf{X}}} \subset \bar{\mathbf{X}} \subseteq \mathbf{X}$, на котором выполняется условие автономности.

Модель системы, находящейся в полной изоляции от внешней среды, а также когда условие наблюдаемости выполняется на единственной траектории $\mathbf{x}(t)$ внешней среды из $\bar{\mathbf{X}}$ для любой векторной функции состояния системы $\mathbf{y}(t) \in \bar{\mathbf{Y}}$, автономна.

2. РЕАЛИЗУЕМОСТЬ МОДЕЛЕЙ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ СИСТЕМ С АВТОНОМНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

2.1. Вычислимый оператор модели динамической системы

Для детерминированной динамической модели оператор $\mathbf{\Theta}_\varepsilon$ назовем ε-*вычислимым* относительно оператора $\mathbf{\Omega}$, если при $t \in \mathbf{T}$ и для заданного $\varepsilon > 0$ имеет место представление

$$\mathbf{y}_\varepsilon(t) = \mathbf{\Theta}_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}, (\tau), \mathbf{u}(\tau), t), \quad \tau < t,$$

где правая часть — непрерывная функция своих аргументов и для $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{Y}^{\mathbf{\Omega}}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u})$ выполняется неравенство

$$\|\mathbf{y}_\varepsilon(t) - \mathbf{y}(t)\| < \varepsilon.$$

Назовем семейство операторов $\mathbf{\Omega}_\varepsilon$ — *ε-вычислимым* относительно оператора Ω, если при $t \in \mathbf{T}$ и для любого $\varepsilon > 0$ найдется оператор $\mathbf{\Theta}_\varepsilon \in \mathbf{\Omega}_\varepsilon$ такой, что выполняется неравенство

$$\|\mathbf{\Theta}_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), t) - \mathbf{y}(t)\| < \varepsilon.$$

К операторам такого семейства относятся, например, операторы, представленные задачей Коши для системы обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений с начальными условиями, включенными в вектор параметров **p**. Применительно к моделям социально-экономических систем ε-вычислимые операторы в том или ином виде содержат информацию о технологическом уровне экономики, а также о процессах производства и потребления благ [45—47]. Семейства ε-вычислимых операторов находят применение в значительном числе работ, посвященных расчету прогнозов, анализу перспектив и последствий принимаемых решений, стратегического и индикативного планирования развития социально-экономических систем [48, 49].

2.2. Вычислимый автоматный оператор

Автоматная модель за n тактов реализует оператор

$$\mathbf{\Omega}_a = \mathbf{\Omega}_1\mathbf{\Omega}_2 \ldots \mathbf{\Omega}_n,$$

осуществляющий многократное отражение (*рефлексию*) состояния системы **w** в себя и реализующий *вычислимый* автоматный оператор $\mathbf{\Theta}_a$:

$$\mathbf{w}(t) = \mathbf{\Theta}_a(\mathbf{p}, \mathbf{u}(\tau)), \quad \tau \le t, \quad \mathbf{p} = \mathbf{w}_0.$$

Пусть оператор такта $\mathbf{\Omega}_i$ задается с помощью матрицы $\mathbf{A}_i = \mathbf{A}(u(t_i))$, $i = \overline{1, n}$ и операций сложения $\oplus$ и умножения $\otimes$ векторной алгебры (вообще говоря, нелинейной). Процесс вычислений состояния системы на такте i дает результат:

$$\mathbf{w}(t_i) = \bigotimes_{j=1}^{i} \mathbf{A}_j \otimes \mathbf{w}(t_0),$$

где $\mathbf{w}(t_0) = \mathbf{w}(u(t_0))$. Автоматные модели такого типа широко применяются в процедурах принятия решений на основе экспертных данных [35, 50, 51].

Если операторы $\mathbf{\Omega}_i$ ограничены, процесс рефлексий может иметь циклический характер или расходиться. Если операторы $\mathbf{\Omega}_i$ сжимающие, процесс $\mathbf{w}(t_i)$ сходится к состоянию $\bar{\mathbf{w}}$, называемому *транзитивным замыканием* для исходного состояния $\mathbf{w}(t_0)$.

2.3. Вычислимое управление

Будем говорить, что управление $\mathbf{u}(t)$ *вычислимое*, если его можно представить как результат отображения $\mathbf{\Psi}$ тройки векторов $\langle\mathbf{y}, \mathbf{x}, \mathbf{p}\rangle$ на множество $\mathbf{U}$, где функции $\mathbf{x}(\tau)$, $\mathbf{y}(\tau)$ заданы на подмножестве $\mathbf{T}$, предшествующем t, т. е.

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{\Psi}(\mathbf{y}(\tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), t), \quad \tau \ge t.$$

Для вычисления вектора управлений $\mathbf{u}(t)$ могут применяться различные средства и подходы, например, датчик случайных чисел, программируемый автомат [31], оптимизационные алгоритмы поиска экстремума для *целевого функционала* $F(t, \mathbf{y}(\tau), p, \mathbf{x}(\tau))$; $t, \tau \in \mathbf{T}$ [52]. В последнем случае управление называется *одноцелевым*, а отображение $\mathbf{\Psi}$ вычисляется по схеме:

$$\mathbf{u}(t) = \operatorname{argextr} \bar{F}(\mathbf{u}(\tau)), \quad t, \tau \in \mathbf{T}; \quad t \ge \tau.$$

Для ε-вычислимого оператора

$$\bar{F}(\mathbf{u}(\tau')) = F(t, \mathbf{\Theta}(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau'), \mathbf{u}(\tau'), \tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau)),$$
$$t, \tau, \tau' \in \mathbf{T}; \quad t \ge \tau \ge \tau'; \quad \mathbf{\Theta} \in \mathbf{\Omega}_\varepsilon.$$

Для автоматного оператора

$$\bar{F}(\mathbf{u}(t)) = F(t, \mathbf{w}(\mathbf{u}(\tau))).$$

Для открытой модели вычисление управления $\mathbf{u}(t)$ требует знания вектора состояния внешней среды на всем множестве времени $\mathbf{T}$, что редко реализуется на практике. Вычислимое управление в случае, когда известен вектор $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{X}$, $t \in \mathbf{T}$, удовлетворяет уравнению рефлексии, отображающему действие обратной связи по управлению в рассматриваемой системе:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{\Psi}(\mathbf{\Theta}(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), t'), \mathbf{p}, \mathbf{x}(t'), t),$$
$$\tau \le t' \le t, \quad \mathbf{\Theta} \in \mathbf{\Omega}_\varepsilon. \qquad (1)$$

Если это уравнение имеет решение, то можно говорить, что такая вычислимая модель обладает свойством ε-*управляемости*. В общем случае для отображения Ψ уравнение (1) может не иметь решения. В таком случае можно говорить, что система противоречит свойству ε-*управляемости*. Уравнение рефлексии можно применять для организации итеративного процесса расчета управления $\mathbf{u}(t)$. Этот процесс может как сходиться, так и расходиться. Компоненты управления могут изменяться в процессе итераций монотонно, циклически, хаотически — в зависимости от свойств отображения $\mathbf{\Psi}$.

2.4. Автономное управление

Возможный ответ на неопределенность, присущую моделям развивающихся систем, и нестабильность их поведения заключается в локализации объекта и системы управления, позволяющей уменьшить влияние извне, уменьшить требования к информационному обеспечению, упростить и сделать механизмы управления более эффективными.

Вычислимое управление $\mathbf{u}(t)$ является *автономным*, если оно при фиксированном значении вектора параметров системы $\mathbf{p} \in \mathbf{P}$ определяется только на основании значений $\mathbf{y}(\tau)$ состояний системы из *допустимого подмножества* $\bar{\mathbf{Y}}$ множества $\mathbf{Y}$, т. е. может быть представлено как результат отображения

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{\Psi}^a(\mathbf{y}(\tau), \mathbf{p}, t); \quad \tau \in \mathbf{T}, \quad \mathbf{y}(\tau) \in \bar{\mathbf{Y}} \subseteq \mathbf{Y}.$$

Например, вычислимое управление автономно, когда фиксированы вектор параметров $\mathbf{p}$ и вектор состояния внешней среды $\mathbf{x}(\tau)$, $\tau \in \mathbf{T}$, а отображение $\mathbf{\Omega}$ однозначно. Более общим условием автономного управления служит наличие свойства $\mathbf{\Psi}$-*наблюдаемости* отображения $\mathbf{\Omega}$: для любого состояния $\mathbf{y}(\tau) \in \bar{\mathbf{Y}}$ и $\mathbf{p} \in \mathbf{P}$ найдется $\mathbf{x}(\tau) \in \mathbf{X}$ такое, что

$$\mathbf{\Psi}^a(\mathbf{y}(\tau), \mathbf{p}, t) = \mathbf{\Psi}(\mathbf{y}(\tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), t); \quad t, \tau \in \mathbf{T}.$$

Понятие автономного управления может охватывать несколько своих разновидностей.

Управление $\mathbf{u}(t)$ называется автономным с *ограниченной предысторией*, если оно зависит от состояний системы на ограниченном отрезке времени, предшествующем текущему моменту, т. е. может быть представлено как результат отображения

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{\Psi}^a(\mathbf{y}(\tau), t); \quad \mathbf{y}(\tau) \in \bar{\mathbf{Y}} \subseteq \mathbf{Y},$$
$$\tau \in [t - \varepsilon, t], \ \varepsilon \geq 0.$$

При $\varepsilon = 0$ такое $\mathbf{u}(t)$ называется автономным управлением *без предыстории.*

Модель динамической системы с автономным управлением

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{\Theta}(\mathbf{p}, \mathbf{x}, \mathbf{\Psi}^a(\mathbf{y}, \tau), t), \quad \mathbf{y}(\tau) \in \bar{\mathbf{Y}} \subseteq \mathbf{Y}, \quad \mathbf{\Theta} \in \mathbf{\Omega}_\varepsilon$$

становится автономной, если вычислимый оператор Θ не зависит от состояния внешней среды $\mathbf{x}$ либо при фиксированном значении этого вектора.

Развивающиеся системы с автономным управлением так же, как аналогичные технические системы, характеризуются ограниченным использованием материальных и информационных ресурсов. Назначение таких систем — в условиях изменяющейся (возможно, дестабилизирующей поведение системы) внешней среды благодаря применению моделей и механизмов управления разумной сложности обеспечить стабильный режим развития с требуемой (позитивной) динамикой, избегая при этом нежелательных режимов функционирования. Последнее обеспечивается внутренними механизмами выбора управляющих воздействий, критериев принятия решений в соответствии с состоянием самой системы и внешней среды [29].

2.5. Режим роста системы

Пусть $\mathbf{H}(\mathbf{y})$ — *оператор ресурсов*, зависящий от компонент вектора $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{Y}$ и определяющий показатели, которые интерпретируются как ресурсные. Условие неубывания ресурсов

$$\exists \varepsilon > 0, \quad \forall \delta, \ 0 < \delta \leq \varepsilon, \ t,$$
$$(t - \delta) \in \mathbf{T} : \mathbf{H}(\mathbf{y}(t)) \geq \mathbf{H}(\mathbf{y}(t - \delta))$$

определяет режим *роста*. Подмножество всех состояний $\mathbf{Y}^\mathbf{H} \subseteq \mathbf{Y}$, на котором оно может выполняться, назовем *внутренней областью состояний роста*.

Множество состояний (значений вектора состояния) внешней среды $\mathbf{X}^\mathbf{H} \subseteq \mathbf{X}$, для которого выполняются условия роста, будем называть *внешней областью роста*. Определение *области автономного роста* с помощью ε-вычислимого оператора $\mathbf{\Theta}_\varepsilon$ представляется условием:

$$\exists \varepsilon > 0, \quad \forall 0 < \varepsilon < \mathrm{E}: \exists u(\tau), \ \delta > 0, \ \mathbf{X}^\mathbf{H}(u), \ \mathbf{x} \in \mathbf{X}^\mathbf{H}(u):$$
$$\mathbf{H}(\mathbf{\Theta}_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau_1), \mathbf{u}(\tau_1), t_1)) \geq \mathbf{H}(\mathbf{\Theta}_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau_2), \mathbf{u}(\tau_2), t_2)),$$
$$\tau_1 < t_1, \quad \tau_2 < t_2, \quad t_2 = t_1 - \delta.$$

Область автономного роста расширяется на объединение областей автономного роста по управлениям $\mathbf{u} \in \bar{\mathbf{U}}$, удовлетворяющим условию автономного роста:

$$\mathbf{X}^\mathbf{H} = \bigcup_{\mathbf{u} \in \bar{\mathbf{U}}} \mathbf{X}^\mathbf{H}(\mathbf{u}).$$

Для выполнимости условия роста (существования соответствующих значений $\mathbf{p}$, $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$) достаточно, чтобы в области допустимых значений вектора ресурсов $\mathbf{h} \in \bar{\mathbf{H}}$ и области допустимых состояний системы $\mathbf{Y}^\mathbf{H}$ выполнялось свойство $\mathbf{H}$-*наблюдаемости* оператора ресурсов:

$$\forall \mathbf{h} \in \bar{\mathbf{H}}, \ \exists \mathbf{y} \in \mathbf{Y}^\mathbf{H} : \mathbf{H}(\mathbf{y}) = \mathbf{h}$$

и в области допустимых значений вектора допустимых состояний внешней среды $\mathbf{X}^{\varepsilon}$ выполнялось условие ε-*наблюдаемости* оператора $\mathbf{\Omega}$:

$$\forall y \in \mathbf{Y}^{\mathbf{H}},\ \varepsilon > 0,\ \exists \mathbf{p} \in \mathbf{P},\ \mathbf{u} \in \mathbf{U},\ \mathbf{X}^{\varepsilon},$$

$$\forall \mathbf{x} \in \mathbf{X}^{\varepsilon} :| \mathbf{y} - \mathbf{\Theta}_{\varepsilon}(\mathbf{p},\ \mathbf{x}(\tau_1),\ \mathbf{u}(\tau_1),\ t_1)| \le \varepsilon.$$

Совокупность этих условий означает $\mathbf{H}_{\varepsilon}$-*наблюдаемость* оператора действия $\mathbf{\Omega}$. Область допустимых состояний внешней среды $\mathbf{X}^{\varepsilon}$ определяется областью допустимых состояний системы $\mathbf{Y}^{\mathbf{H}}$, которая, в свою очередь, соответствует области допустимых значений вектора ресурсов $\overline{\mathbf{H}}$. Если область допустимых состояний внешней среды $\mathbf{X}^{\varepsilon}$ совпадает со всем множеством $\mathbf{X}$, то условие роста выполнимо при любых внешних условиях.

Режим *стабильного роста* определяется условием гарантированного возрастания ресурсов

$$\exists \delta,\ \delta \ge \tau > 0,\ k > 1 : \mathbf{H}(\mathbf{y}(t)) \ge k(t,\ \tau) \cdot \mathbf{H}(\mathbf{y}(t - \tau)),$$

где $k(t, \tau)$ — показатель роста на интервале $[t - \tau, t] \subset \mathbf{T}$.

С помощью вычислимого оператора Θ_{ε} условие стабильного роста можно представить в виде

$$\exists \varepsilon > 0,\ \forall 0 < \varepsilon < \mathrm{E}\text{: } \exists k > 1,\ \exists \delta > 0\text{:}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{\Theta}_{\varepsilon}(\mathbf{p},\ \mathbf{x}(\tau_1),\ \mathbf{u}(\tau_1),\ t_1)) \ge k\mathbf{H}(\mathbf{\Theta}_{\varepsilon}(\mathbf{p},\ \mathbf{x}(\tau_2),\ \mathbf{u}(\tau_2),\ t_2)),$$

$$\tau_1 < t_1,\quad \tau_2 < t_2,\quad t_2 = t_1 - \tau.$$

Под моделью *саморазвивающейся* системы будем понимать модель динамической (развивающейся) системы воспроизводства с автономным управлением

$$\exists \delta > 0,\ \forall \tau,\ \tau \le \delta\text{: } \mathbf{y}(t) = \mathbf{\Theta}(\mathbf{p},\ \mathbf{x},\ \mathbf{\Psi}^{a}(\mathbf{y},\ \tau),\ t),$$

$$\mathbf{y}(\tau) \in \overline{\mathbf{Y}} \subseteq \mathbf{Y},\ \mathbf{\Theta} \in \mathbf{\Omega}_{\varepsilon},\ \mathbf{H}(\mathbf{y}(t)) \ge \mathbf{Z}(\mathbf{y}(t - \tau)).$$

Общее свойство моделей саморазвивающихся систем состоит в строгой вложенности множества состояний внешней среды, для которого выполняются условия воспроизводства (область воспроизводства $\overline{\mathbf{X}} \subset \mathbf{X}$ может составлять часть пространства состояний внешней среды).

2.6. Модели воспроизводства ресурсов системы

Процесс *воспроизводства* может характеризоваться потреблением и выпуском ресурсов, описываемых компонентами вектора состояния системы [45]. Если оператор $\mathbf{H}(\mathbf{y}(t))$ интерпретировать как вектор выпуска, а вектор затрат, имеющий ту же размерность, обозначить как $\mathbf{Z}(\mathbf{y}(t))$, то условие воспроизводства принимает вид:

$$\exists \delta > 0,\quad \forall \tau,\ \tau \le \delta : \mathbf{H}(\mathbf{y}(t)) \ge \mathbf{Z}(\mathbf{y}(t - \tau)).$$

Множество состояний (значений вектора состояния) внешней среды $\mathbf{X}^{\mathbf{V}} \subseteq \mathbf{X}$, для которого выполняются условия воспроизводства ресурсов, будем называть *областью воспроизводства*.

Область *автономного воспроизводства* определяется по аналогии с областью автономного роста:

$$\exists \mathrm{E} > 0,\ \forall 0 < \varepsilon < \mathrm{E} : \exists u(\tau),\ \delta > 0,\ \forall \mathbf{x} \in \mathbf{X}^{Z}(u)\text{:}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{\Theta}_{\varepsilon}(\mathbf{p},\ \mathbf{x}(\tau_1),\ \mathbf{u}(\tau_1),\ t_1)) \ge \mathbf{Z}(\mathbf{\Theta}_{\varepsilon}(\mathbf{p},\ \mathbf{x}(\tau_2),\ \mathbf{u}(\tau_2),\ t_2)),$$

$$\tau_1 < t_1,\quad \tau_2 < t_2,\quad t_2 = t_1 - \delta.$$

Под моделью *развивающейся* системы будем понимать модель динамической системы воспроизводства с вычислимым управлением.

Процесс *сбалансированного воспроизводства* системы может характеризоваться динамикой потребления и выпуска ресурсов, описываемых компонентами вектора состояния системы [53]:

$$\exists \tau,\ \lambda > 1,\quad t_2 = t_1 - \tau,\quad \mathbf{H}(\mathbf{y}(t_1)) \ge \lambda \mathbf{Z}(\mathbf{y}(t_2)).$$

В данном условии величина $\lambda(\mathbf{y}(t)) - 1$ означает долю прироста ресурсов и может интерпретироваться как показатель *продуктивности* системы [54].

Верхняя грань показателя продуктивности $\lambda - 1$ может быть определена путем решения экстремальной задачи

$$\lambda(\mathbf{y}) \to \sup_{\mathbf{y} \in \mathbf{Y}(\mathbf{x},\, \mathbf{p},\, \mathbf{U})}$$

при условии

$$\exists \tau,\ t_2 = t_1 - \tau,\ \mathbf{H}(\mathbf{y}(t_1)) \ge \lambda \mathbf{Z}(\mathbf{y}(t_2)).$$

Если вектор состояния $\mathbf{y}(t)$ интерпретировать как объемы выпусков продукции, то полученное решение дает их индикативные уровни в режиме сбалансированного воспроизводства [46]. Если вектор состояния $\mathbf{y}(t)$ интерпретировать как цены на продукцию, то решение дает их индикативные уровни [47].

Будем считать, что $\mathbf{p}$, $\mathbf{x}(\theta)$, $\mathbf{y}(\theta)$, t_2 $(\theta \le t_2)$ заданы, а затраты ресурса могут быть представлены как функция управления $\mathbf{Z}(\mathbf{\Theta}_{\varepsilon}(\mathbf{p},\ \mathbf{x}(\tau),\ \mathbf{u}(\tau),\ t))$. Показатель продуктивности $\lambda - 1$ может быть использован в качестве целевого функционала при вычислении управления $\mathbf{u}(\theta)$ путем решения экстремальной задачи

$$\lambda(\mathbf{u}(\theta)) \to \sup_{\mathbf{u}}$$

при условии

$$\exists \mathrm{E} > 0,\ \forall 0 < \varepsilon < \mathrm{E}\text{:} \exists \tau,\ t_2 = t_1 - \tau,\ \tau_2 = \tau_1 - \tau,\ \exists \lambda > 0\text{:}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{\Theta}_{\varepsilon}(\mathbf{p},\ \mathbf{x}(\tau_1),\ \mathbf{u}(\tau_1),\ t_1)) \ge \lambda \mathbf{Z}(\mathbf{\Theta}_{\varepsilon}(\mathbf{p},\ \mathbf{x}(\tau_2),\ \mathbf{u}(\tau_2),\ t_2)).$$

Экстремум $\bar{\lambda}$ функционала $\lambda(\mathbf{u})$, полученный в результате решения этой задачи, определяет *потенциал продуктивности* экономической системы [54]. Если $\bar{\lambda} > 1$, то процесс воспроизводства потенциально реализуем. Если затраты $\mathbf{Z}$ начинают превышать уровень $\mathbf{H}/\bar{\lambda}$, режим сбалансированного воспроизводства становится *невозможным*. Это можно интерпретировать следующим образом: технологический уровень экономики задает определенный предельный уровень рентабельности $\bar{\lambda}$ для имеющихся видов экономической деятельности, функционирующих в режиме сбалансированного воспроизводства [15]. Кроме того, величина $\bar{\lambda}/\tau$ дает верхнюю оценку темпа роста экономической системы с заданным технологическим уровнем.

Функционирование системы в режиме сбалансированного воспроизводства при наличии автоматных операторов такта $\mathbf{\Omega}_i$, задаваемых с помощью матриц влияний $\mathbf{A}_i$, можно трактовать как форму автономного режима функционирования, определяемого только состоянием системы.

2.7. Многоцелевое управление

Целевой функционал $F(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x})$ априори может не иметь явного аналитического или вычислимого представления. Так, если динамика механической системы описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, целевой функционал может быть представлен в виде функционала действия. С другой стороны, при постановке задачи управления могут фигурировать несколько целевых функционалов (критериев) $F_i(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x})$, $i = 1, ..., k$. Для расчета одноцелевого управления в таком случае можно воспользоваться, вообще говоря, нелинейной операцией свертки $\mathbf{\Phi}$ [55]:

$$F(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x}) = \Phi(F_1(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x}), ..., F_k(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x})).$$

При фиксированных $\mathbf{p}$, $\mathbf{x}(\tau)$ можно обозначить целевые функционалы как целевые функции управления

$$f_i(t, \mathbf{u}) = F_i(t, \mathbf{\Theta}(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau'), \mathbf{u}(\tau'), \tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau)).$$

Тогда целевая функция принимает вид:

$$f(t, \mathbf{u}) = \Phi(f_1(t, \mathbf{u}), ..., f_k(t, \mathbf{u})),$$

и для реализации операции свертки можно воспользоваться:

- аналитическим (линейным или нелинейным) заданием функции свертки $\Phi(f_1, ..., f_k)$;
- суперпозицией функций свертки малой размерности, которые можно задавать либо таблично (сверткой двух переменных $\Phi_i(f_{i-1}, f_i)$, применяемой в методе комплексного оценивания [56]), либо аналитически, например,

$$\Phi(f_1, f_2, ..., f_k) = \Phi_1(f_1, \Phi_2(...\Phi_k(f_{k-1}, f_k)));$$

- выделением одной функции в качестве целевой и включением остальных в ограничения

$$\sup_{f_i(t,\,\mathbf{u}) \le a_i,\; i = 1, ..., k} f_0(t, \mathbf{u});$$

- разделением компонент вектора управления $\mathbf{u}$ на группы $\mathbf{u}_i$, соответствующие целевым функциям $f_i(\mathbf{u})$ и выбором управления с помощью вложенных экстремумов [57]:

$$\sup_{\mathbf{u}_1} f_1(t, \mathbf{u}) \mid \sup_{\mathbf{u}_2} f_2(t, \mathbf{u}) \mid ... \mid \sup_{\mathbf{u}_k} f_k(t, \mathbf{u})$$

(заметим, что такой метод поиска управления применяется в игровых моделях [58], а также в методах теории активных систем [40—42]; каждая перестановка целевых функций в порядке их следования при решении соответствующей оптимизационной задачи может давать свой вектор управления $\mathbf{u}^l$);
- смешанным сбалансированным решением, полученным из управлений $\mathbf{u}^l$ с весами α_l, таким, что

$$\sum_l \alpha_l f_i(t, \mathbf{u}^l) = \sum_l \alpha_l f_j(t, \mathbf{u}^l), \quad i, j = 1, ..., k,$$

где веса α_i интерпретируются как частоты применения соответствующего решения (аналог смешанной стратегии в теории игр [59]).

2.8. Прогноз вектора состояния

Когда целевой функционал содержит значения вектора состояния для предстоящих моментов времени, требуется знание *прогноза* вектора состояния $\mathbf{y}(t_p)$, $t_p > t$, где t — текущее время. При расчете прогноза вектора состояния $\mathbf{y}(t_p)$, $t_p > t$, необходимо принимать во внимание наблюдаемые значения вектора параметров $\mathbf{p}$, вектора состояния внешней среды $\mathbf{x}(\tau) \in \mathbf{X}$, $\tau \le t$ и прогноз последнего $\mathbf{x}(\tau) \in \mathbf{X}$, $t_p \ge \tau \ge t$, а также прогноз вектора управления $\mathbf{u}(\tau)$, $t_p \ge \tau \ge t$. Прогноз вектора состояния внешней среды $\mathbf{x}(\tau)$, $t_p \ge \tau \ge t$, для саморазвивающихся систем может содержать неопределенность. Это делает неопределенным также прогноз управления $\mathbf{u}(\tau)$, $t_p \ge \tau \ge t$ и вектора состояния $\mathbf{y}(t_p)$, $t_p > t$.

При наличии свойства управляемости вектор состояния зависит от управления и наоборот. Таким образом, в процедуре вычисления вектора управлений $\mathbf{u}(\tau) = \mathbf{\Psi}(\mathbf{y}(\tau'), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau'), \tau)$ используются результаты расчета прогноза вектора состояния, получаемого в результате решения уравнения

$$\mathbf{y}(t_p) = \mathbf{\Theta}(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{\Psi}(\mathbf{y}(\tau'), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau'), \tau), t_p),$$

$$t_p \geq \tau \geq t \geq \tau' \geq t, \quad \mathbf{\Theta} \in \mathbf{\Omega}_\varepsilon,$$

которое учитывает рефлексию между векторами состояния и управления и предполагает, что известен прогноз состояния среды $\mathbf{x}(\tau)$ [60]. Если уравнение прогноза имеет решение (что связано с наличием свойства управляемости модели [61]), оно может быть применено в качестве схемы итеративного процесса уточнения прогноза $\mathbf{y}(t_p)$ для вектора состояния.

Из сказанного следует, что прогноз для целенаправленных саморазвивающихся систем имеет ограниченную точность (неустранимую погрешность, связанную с погрешностью оценки прогноза состояния среды $\mathbf{x}(\tau)$), а вычислимое управление в общем случае приводит к состояниям, не соответствующим экстремуму целевого функционала, и не гарантирует стабильного поведения системы. Проблема заключается в выборе механизмов вычислимого управления, свободных от указанных недостатков. Очевидно, автономное управление не использует прогноза состояния системы, что снижает неопределенность при выборе управления динамической системой, но ухудшает качество управления.

2.9. Автономное оптимизирующее регулирование

Локализация системы управления может проявляться, с одной стороны, в ограничении доступных ресурсов, а с другой — способствовать большей стабильности и предсказуемости поведения системы. Благодаря этому автономные системы управления нашли широкое применение в таких областях, как робототехника, разработка беспилотных устройств, в устройствах искусственного интеллекта, обеспечивая надежное выполнение требуемых функций [62—66].

Степень информированности системы автономного управления об объекте находит отражение в методах моделирования и формирования управляющих воздействий. Минимальная информированность об объекте (модель «черного ящика») предполагает наличие только значений управляющих воздействий и ответной реакции объекта. Более высокий уровень информированности допускает знание зависимости целевого показателя от значений управляющих воздействий. На следующем уровне информированности (характерном, например, для экспертных моделей [35]) могут быть известны структура объекта, а также качественные или полуколичественные зависимости показателей (факторов) объекта [37]. Наиболее информационно обеспеченные модели характеризует наличие количественных зависимостей для полной структуры факторов [52]. Примером такой модели может служить многоотраслевая модель региона с группой обрабатывающих отраслей, финансовым сектором, потоками экспорта и импорта; механизмами автономного управления промежуточными затратами, инвестициями в основные фонды отраслей а также долей отчислений из регионального фонда на инвестиции [67, 68]. В целенаправленных развивающихся системах применяются механизмы оптимизирующего управления, нацеленного на максимизацию целевой функции, например, валового выпуска [67, 69].

Для того, чтобы система могла воспроизводить условия функционирования при определенном диапазоне изменения состояний внешней среды, механизмы автономного управления требуют соответствующей настройки [70]. Такие механизмы целесообразно исследовать с помощью соответствующих математических моделей процессов и систем [71].

В модели целенаправленной автономной системы применяется целевой функционал

$$\hat{F}(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}) = F(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x}),$$

где состояние внешней среды $\mathbf{x}(t)$ либо не учитывается, либо считается фиксированным.

Целевой функционал облегчает формализацию описания системы, изучение ее свойств, получение прогнозов. Классическим примером такого подхода в классической механике служит принцип Гамильтона — Остроградского [72], позволяющий свести формализацию поведения механической системы к задаче на экстремум функции Гамильтона.

Задача построения механизмов управления для моделей автономных систем имеет много общего с проблемой регуляторов, отличаясь видом целевой функции. У регуляторов это сигнал рассогласования (отклонения от заданного уровня), значение которого необходимо приблизить к нулю. Для решения этой задачи предназначены ПИД-регуляторы [73, 74]:

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt + T_d\frac{de(t)}{dt},$$

где e — сигнал рассогласования или ошибки, u — выходная величина регулятора, K — коэффициент пропорциональности (безразмерный), T_i — постоянная интегрирования (размерность времени) и T_d — постоянная дифференцирования (размерность времени) регулятора.

Применение этих конструкций в механизмах автономного управления [51] требует формирования новой целевой функции, аналогичной функции рассогласования.

В математическом аппарате автономного управления предусмотрен механизм обратной связи, ориентированный на приближение к экстремуму целевой функции. Ее значение определяется состоянием системы, внешней среды, а также прямо и опосредованно управляющими воздействиями. В отличие от вычислительного алгоритма оптимизации, динамический процесс не дает возможности делать пробные шаги в различных направлениях. Здесь может варьироваться только размер шага в зависимости от изменения целевой функции. При этом размер шага может настраиваться по мере развития управляемого процесса.

Обозначим $f(t, u)$ целевую функцию, максимизируемую по u в каждый текущий момент t. Пусть эта функция — ограниченной вариации по аргументу t, дважды дифференцируемая по аргументам и выпуклая вверх по u (при ее максимизации по этому аргументу).

Оптимальное управление $u(t)$ удовлетворяет необходимому условию

$$\partial f(t, u)/\partial u = 0.$$

Аппроксимируем целевую функцию в окрестности фиксированной точки $\bar{u}$ рядом Тейлора до второго порядка

$$f(t, u) \cong f(t, \bar{u}) + \partial f/\partial u(u - \bar{u}) + \partial^2 f/\partial u^2(u - \bar{u})^2.$$

Необходимое условие оптимальности по u для квадратичного приближения целевой функции в малой окрестности оптимальной точки u примет вид

$$\partial f/\partial u + 2\partial^2 f/\partial u^2(u(t) - \bar{u}(t)) = 0,$$

откуда шаг приближения к оптимальной точке (аналог метода Ньютона) определяется как

$$u - \bar{u} = \left.\frac{\partial f/\partial u}{2\partial^2 f/\partial u^2}\right|_{t,\,\bar{u}} = h\partial f/\partial u. \qquad (2)$$

Рассогласование e модели роста первого порядка для механизма оптимизирующего ПИД-регулятора определяется в соответствии с правой частью выражения (2). Здесь

$$h = \left(\frac{2\partial^2 f}{du^2}\right)^{-1}.$$

При максимизации целевой функции $h > 0$. Шаг по управлению должен быть совмещен с шагом по времени. Чтобы учесть изменение оптимального управления по времени, продифференцируем необходимое условие (2) по t:

$$\partial^2 f/\partial u\partial t + \partial^2 f/\partial u^2 \partial u/dt = 0.$$

Откуда изменение оптимального управления $\mathbf{u}(t)$ с учетом зависимости целевой функции от времени определяется как

$$u(t_i) = u(t_{i-1}) - \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\partial^2 f/\partial u\partial t}{\partial^2 f/\partial u^2} dt \cong$$

$$\cong u(t_{i-1}) + h(\partial f/\partial u - \partial^2 f/\partial u\partial t(t_i - t_{i-1})).$$

Таким образом, рассогласование для механизма оптимизирующего ПИД-регулятора второго порядка

$$e = \partial f/\partial u - \partial^2 f/\partial u\partial t(t_i - t_{i-1}),$$

а выбор управления $u(t_i)$ на следующем шаге осуществляется в зависимости от предыстории процесса, управляемого дискретным набором последовательных шагов (приближений) $u(t_0)$, ..., $u(t_{i-1})$.

Экспериментальное исследование механизмов автономного управления [16, 17] на моделях динамики организационных систем показало их эффективность: при адекватном подборе параметров оптимизирующих регуляторов траектории процессов сходятся к оптимальным.

3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ В РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

Достижение системой экстремума целевого функционала в процессе ее функционирования можно интерпретировать как выход на *равновесный* (*сбалансированный*) режим, а процесс достижения — как переходный процесс. Состояние равновесия может иметь несколько различных интерпретаций. Это: игровое равновесие взаимодействующих сторон [58]; динамическое равновесие системы, находящейся под влиянием разнонаправленных воздействий; достижение экстремума соответствующего функционала благодаря перераспределению ресурсов системы. Именно последняя интерпретация имеется здесь в виду.

3.1. Балансировка структуры экономики в долгосрочном плане

Рассмотрен подход, основанный на идее балансировки воспроизводства структурных компонентов автономной экономической системы в долгосрочном плане [47]. Объектами балансировки служат пропорции ресурсопотребления в стоимостном и натуральном выражении. Предполагается, что заданы $\mathbf{Z}$ — затраты, $\mathbf{V}$ — выпуски продукции и услуг. На основе этих данных вычисляются a_{ij} — коэффициенты удельных затрат $a_{ij} = Z_{ij}/V_j$.

Сбалансированность пропорций ресурсопотребления трактуется как соответствие задаче оптимизации структуры выпусков по критерию максимума коэффициента роста:

$$\max_{V_i} v,$$

$$V_i(t) \geq v \sum_{j=1}^{n} a_{ij} V_j(t),$$

где v — коэффициент роста.

Если иметь в виду, что коэффициенты удельных затрат измеряются на предыдущем этапе цикла в соответствии с изменением цен p_i,

$$a_{ij}^c = Z_{ij} p_i/(V_j p_j) = a_{ij} p_i/p_j,$$

то задачу балансировки ценовых пропорций в неравновесном режиме можно представить в виде

$$\max_{P_i} v^c,$$

$$P_i(t) \geq v^c \sum_{j=1}^{n} a_{ji}^c P_j(t),$$

$$k_i \geq P_i(t) \geq 1, \quad i = 1, ..., n,$$

где $P_i(t)$ — индекс цены на благо i.

Продуктивность экономической системы определим как $\pi = Y/Z \cdot 100$ %, где Z — промежуточные затраты, Y — добавленная стоимость. Обозначим материалоемкость $m = Z/X$, валовой выпуск $X = Y + Z$. Тогда $\pi = (1/m - 1) \cdot 100$ %.

В результате решения задачи балансировки получаем оптимальное значение коэффициента роста v*. Потенциал продуктивности экономической системы $\pi^0 = (v* - 1) \cdot 100$ % представляет собой максимум доли добавленной стоимости в стоимости промежуточного потребления, достигаемый при неизменной технологии производственной сферы и равновесном режиме экономической системы.

Поскольку равновесные пропорции цен могут значительно отличаться от существующих, будем решать серию задач оптимизации при возрастающем ряде значении k ($k = 1, ..., 5$), т. е. в ограничении допускается не более, чем 50%-е изменение пропорций в сторону роста. Для данных по многоотраслевой экономике РФ были получены кривые индикативной динамики индексов цен, приводящие через определенное число шагов к сбалансированной структуре цен (рис. 1).

Индикативная динамика показателя продуктивности $\pi = (v - 1) \cdot 100$ % представлена на рис. 2.

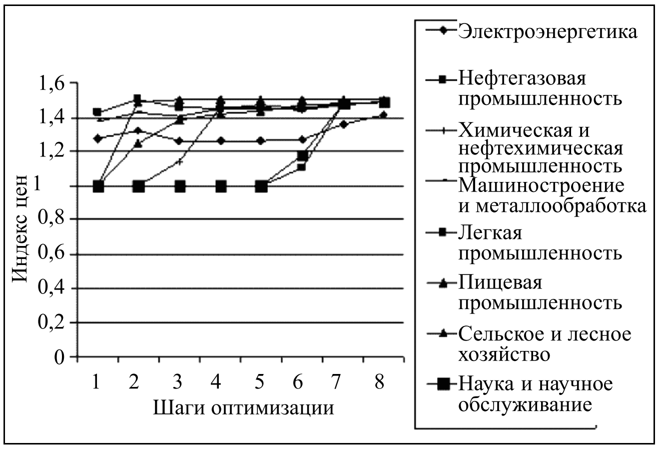

Рис. 1. Индикативная динамика индексов цен с границей шага изменения 0,5

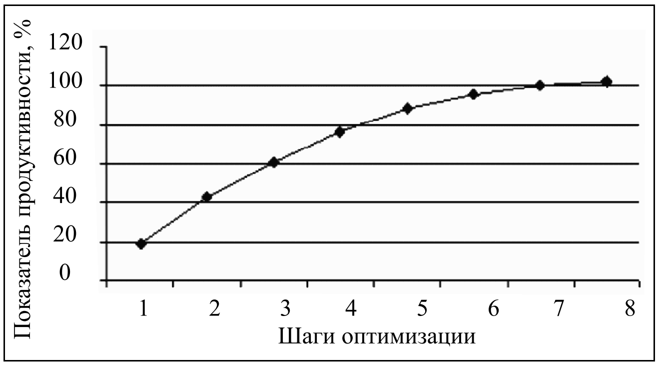

Рис. 2. Индикативная динамика показателя продуктивности

Как видно из рис. 1 и 2, чем ближе структура цен к сбалансированной, тем меньшее влияние оказывают изменения цен на показатель роста.

Для определения границ диапазона бескризисного функционирования экономической системы использовались показатели толерантности экономической системы к вариациям отраслевых показателей (предельные приращения), означающие относительное приращение отраслевого показателя в процентах при неизменности остальных, дающее 1 % приращения потенциала продуктивности. Если толерантность (нечувствительность) к изменению цен определить как $Mp_i = dp_i/dv$, то для сбалансированной структуры цен p_i^* имеем $Mp_i \leq Mp_i^*$. Аналогичное соотношение справедливо для показателя толерантности к изменению выпусков $MV_i = dV_i/dv$.

При приближении саморазвивающейся системы к равновесному состоянию все ее компоненты получают сбалансированную нагрузку, а удаление от состояния равновесия связано с диспропорциями, неравномерной нагрузкой отдельных ее подсистем. Потенциальная способность многопродуктовой экономической системы к саморазвитию определяется фундаментальным свойством технологических взаимосвязей. Реальная же способность к саморазвитию определяется к тому же степенью освоения этих технологий, сбалансированностью системы [46].

Потенциал продуктивности экономической системы по статистическим данным определен на уровне $\pi^0 = 29{,}6$ %, текущая продуктивность — на уровне $\pi = 10{,}7$ %. Относительное значение показателя продуктивности экономической системы $u = \pi/\pi_0$ определено на уровне $u = 0{,}36$. Для определения системной зависимости продуктивности экономики от отраслевых показателей использовался квазиравновесный режим (равновесный с учетом дополнительных ограничений) после адаптации модели к уровню текущей продуктивности. В качестве примера выбран режим, выводящий экономику на уровень продуктивности $\pi = 16$ % ($u = 0{,}47$), для которого рассчитаны индикативные приросты цен и выпусков.

В таблице приведены предельные приращения выпусков MV_i отраслей, значения предельных приращений цен Mp_i на продукцию отрасли, значения индикативных приростов цен и выпусков.

Курсивом здесь выделены отрасли, для которых экономическая система имеет наименьшую толерантность (наибольшую чувствительность) по отношению к приращению выпусков. Эти отрасли дают наибольший вклад в продуктивность экономической системы при увеличении объемов их выпусков, инвестировании, внедрении инноваций.

Толерантности в этой таблице отрицательны, поскольку приращение цен на отдельные виды продукции вызывает уменьшение потенциала продуктивности. Повышение ценовой рентабельности этих отраслей наиболее критично сказывается на падении продуктивности экономической системы.

Приведенные квазиравновесные показатели представляют собой индикативные (предпочти-

Предельные приращения выпусков (толерантность по выпускам и по ценам продукции) отраслей, индикативные значения приростов цен или выпусков продукции отраслей

Отрасль	Толерантность по выпускам, %	Толерантность по ценам, %	Прирост выпуска, %	Прирост цены, %
Электроэнергетика	22	−185	28	19
Нефтегазовая промышленность	22	−73	0	28
Угольная промышленность	115	−520	0	0
Прочая топливная промышленность	8434	−226 728	0	0
Черная металлургия	34	−100	0	23
Цветная металлургия	44	−90	0	30
Химическая и нефтехимическая промышленность	17	−49	9	25
Машиностроение и металлообработка	9	−32	96	26
Лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность	38	−129	0	0
Промышленность строительных материалов (включая стекольную и фарфоро-фаянсовую)	82	−517	0	0
Легкая промышленность	9	−17	354	0
Пищевая промышленность	8	−24	107	27
Прочие отрасли промышленности	60	−758	0	0
Строительство	46	−6101	0	19
Сельское и лесное хозяйство	12	−48	63	22
Транспорт и связь	11	−207	62	26
Торговля, посредническая деятельность и общественное питание	10	−132	93	23
Прочие виды деятельности по производству товаров и услуг	110	−2923	0	0
Здравоохранение, физическая культура и социальное обеспечение, образование, культура	22	−692	0	24
Жилищно-коммунальное хозяйство и непроизводственные виды бытового обслуживания населения	39	−3902	0	25
Финансы, кредит, страхование, управление, общественные объединения	67	−236	0	2
Наука и научное обслуживание, геология и разведка недр, геодезическая и гидрометеорологическая	46	−1310	0	24
Конечное потребление домашних хозяйств	3	−33 828 052	660	22

тельные) пропорции выпусков и цен продукции отраслей экономики, направленные на приближение к равновесному режиму и рассматриваемые в системной совокупности либо по вектору прироста цен, либо по вектору прироста выпусков.

3.2. Динамическая многоотраслевая модель диверсификации экономики ресурсодобывающего региона

Модели автономного управления эффективны в системах региональной экономики. Сочетание свойств гибкости и управляемости в определенной степени реализуется в методах индикативного планирования, успешно применявшихся и применяемых различными странами для управления региональной экономикой [8—10, 13, 14]. Регионы, обладая автономностью в части управления местным хозяйством, должны решать задачи стратегического планирования и управления с опорой на доступные им ресурсы. Особенно актуальна проблема диверсификации экономики монопродуктового региона. Потребности долгосрочного развития (сбалансированного воспроизводства) экономики с преобладанием сырьевого компонента вызвали необходимость разработки и исследования динамических моделей, описывающих переходные процессы, связанные с наработкой технологического потенциала для диверсификации хозяйственной деятельности, перехода на иные сферы производства помимо добычи природных ресурсов [51, 67].

В качестве примера достаточных условий стабилизации рассматривается динамическая многопродуктовая модель диверсификации автономно (без дотаций) функционирующей экономики региона, учитывающая эффект исчерпания на определенном этапе товарного запаса ресурсов. Модель включает в себя автономные механизмы управления, обеспечивающие жизнедеятельность региона после прекращения деятельности ресурсодобывающей отрасли.

Сценарий, который воспроизводится путем моделирования, состоит в ограниченном по времени функционировании сырьевой отрасли, сопровождающимся развитием сопутствующих отраслей, а также развитием хозяйственного взаимодействия с соседними регионами. Управление сценарием осуществляется с помощью автономных механизмов, которые можно интерпретировать как набор индикативных правил или норм, предписанных участникам хозяйственной деятельности рассматриваемого региона. Эти правила сформированы как на основе анализа известных методов автономного управления динамическими объектами, так и на основе логического анализа результатов моделирования экономических процессов.

Разработанная многопродуктовая модель региона, помимо сырьевой и инновационной отраслей, включает в себя также финансовый сектор. Имитируется локализованный по времени спад в доходах от реализации продукции сырьевой отрасли. Рассмотрим возможные механизмы регулирования экономики в процессе диверсификации. Приведем часть соотношений модели, содержащих управляющие факторы.

Объемы располагаемой (выпускаемой и импортируемой) продукции определяются в соответствии с производственной функцией Леонтьева

$$v_i = \max(0, \min_j (i_i/a_{ji})) + im_i.$$

Накопление пропорционально располагаемой сумме финансов отрасли m_i с регулируемой долей накопления x:

$$nk_i = \max(0, xm_i).$$

Объем финансовых накоплений отрасли m_i определяется притоком средств от чистого экспорта $ex_i - im_i$, расходами на накопления и инфляционными издержками:

$$\frac{d}{dt} m_i = ex_i - im_i - nk_i - m_i km,$$

где im_i и ex_i — объем импорта и экспорта в i-й отрасли.

Объем финансовых накоплений m представляет собой сумму финансовых накоплений отраслей:

$$\frac{d}{dt} m = \sum_i \frac{d}{dt} m_i.$$

Импорт определяется объемом финансовых накоплений, регулируемой долей импорта и индикаторами затрат в соответствии с системой уравнений:

$$\sum_i im_i = m \cdot im,$$

где im — доля импорта,

$$im_i/zf_i = im_{i+1}/zf_{i+1},\ i = 1, ..., N - 1.$$

zf_i — индикатор затрат продукции i, определяемый как верхняя оценка затрат продукции

$$zf_i = \sum_j a_{ij} f_i,$$

a_{ij} — коэффициент удельных промежуточных затрат продукции i при производстве продукции j; f_i — основные фонды отрасли i.

Этот автономный механизм управления импортом подобран и опробован в процессе экспериментов на модели с целью обеспечить возможность и устойчивость режима роста.

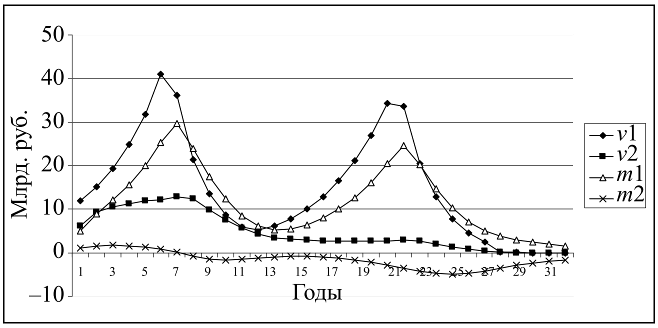

Рис. 3. Выпуски продукции и объемы финансов при *im* = 0,8

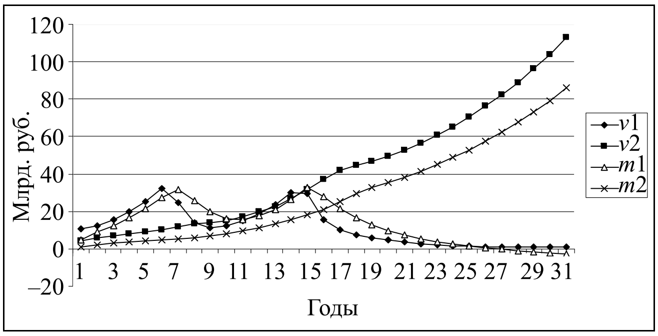

Рис. 4. Выпуски продукции и объемы финансов в режиме роста, *im* = 0,2

Оптимизирующая обратная связь нацелена на максимизацию валового выпуска $v = \sum_i v_i$.

Доля накопления определяется с помощью механизма пропорционально-интегрального оптимизирующего регулятора вида

$$\frac{d}{dt}x = kx((v(t) - v(t-1))/(x(t) - x(t-1)) + x(0) - x(t)).$$

Доля импорта определяется аналогично:

$$\frac{d}{dt}im = kim(v(t) - v(t-1))/(im(t) - im(t-1)),$$

где kx и kim — коэффициенты усиления, подбираемые экспериментально.

Включение в модель оптимизирующих регуляторов позволяет расширить диапазон параметров модели, для которого осуществляется режим роста.

Численные расчеты проводились с использованием условных параметров экономики региона. Подбором исходных констант модели удалось получить интерпретируемые режимы динамики системы — роста и спада. Режим роста осуществляется только при определенном диапазоне изменения доли импорта *im*. При подключении оптимизирующей обратной связи диапазон роста увеличивается, исключая **Н**ε-наблюдаемость системы, что обеспечивает автономное развитие экономики региона.

Режим спада, полученный при начальном уровне доли импорта *im* = 0,8, отображен на рис. 3.

В этом режиме избыточный импорт приводит к необходимости переброски значительных денежных средств на закупку продукции перерабатывающей отрасли и делает финансовые накопления недостаточными для фондообразования. В режиме спада нет возможности перераспределять финансовые средства отраслей, на развитие обрабатывающей отрасли не выделяется достаточное количество средств. В этом режиме внешнеторговая деятельность региона постепенно прекращается после остановки добычи сырья.

Режим роста, полученный при начальном уровне доли импорта *im* = 0,2, отображен на рис. 4. Видно, что финансирование поставок сырья после исчерпания собственных запасов происходит благодаря обрабатывающей отрасли, т. е. из общего фонда.

Набор мер оздоровления экономики в условиях неблагоприятных внешних воздействий обеспечивает самодостаточность экономики путем ее диверсификации и снижения зависимости от внешних факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиальная недостижимость точного прогноза динамики открытых развивающихся систем, показанная выше, хорошо демонстрируется макроэкономическими моделями, принятыми в курсе «Экономикс» [75], описывающими наблюдаемую динамику, но не способными предсказать грядущие кризисные явления. Развивающиеся системы могут иметь разную степень автономности, зависящую от объема и характера связей с внешним миром. Локализация системы управления развивающейся системы уменьшает наблюдаемость и степень зависимости расчетного прогноза от внешних условий, снижает объем используемых ресурсов и эффективность управляющих воздействий в ответ на внешние возмущения, что может привести к регулярным и нерегулярным осцилляциям и потребовать привлечения дополнительных механизмов в систему управления.

По временным масштабам оказываемого эффекта механизмы автономного управления могут быть отнесены к краткосрочным или долгосрочным. Так, субъективные решения участников хозяйственной деятельности чаще носят краткосрочный характер [76], что может находиться в противоречии с долгосрочными интересами участников. В долгосрочном плане большое значение имеют механизмы, контролирующие показатели роста и устойчивости процессов воспроизводства и развития [53, 54, 77].

Определение, исследование, применение целевого функционала представляется важным этапом при формировании механизмов управления саморазвивающейся системы. Определение такого функционала (или набора функционалов) для реальной системы начинается с ее экспертного анализа. На этом этапе может быть сформирована экспертная оценка функционала, отражающего целевые устремления системы — в виде формализованной схемы оценивания (целенаправленной свертки оценок отдельных компонент в соответствующих шкалах оценивания) [78].

Одна из центральных задач анализа механизмов автономного управления состоит в определении условий их применимости в соответствии с предъявляемыми требованиями и критериями. Построение механизмов обратной связи на основе целевых показателей в контуре управления, порождающих сходящийся итерационный процесс, служит конструктивным приемом в управленческой практике [79, 80]. Автономное управление в развивающихся системах может приводить к состояниям, не совпадающим с целевыми. В случае, когда поведение системы становится неудовлетворительным (нежелательные спады, осцилляции и др.), необходимо менять существующий алгоритм автономного управления, в том числе подключая механизмы внешнего управления. Такие подключения требуют дополнительных затрат ресурсов и могут носить временный характер [81].

При определенных ситуациях, например, когда состояние внешней среды $\mathbf{x}(t)$ претерпевает значительные изменения, может потребоваться перестройка системы управления, обуславливаемая условиями выживания и стабильности. Автономная целенаправленная система в этой ситуации должна допускать возможность изменения целевого функционала или даже применяемой модели объекта в соответствии с изменением этого состояния. Выбор модели определяется свойствами доступных данных об объекте. Если данные носят преимущественно качественный характер, применяются экспертные модели [82—86].

Применение моделей развивающихся систем с автономным управлением служит эффективным инструментом стратегического планирования и управления. Такие модели предназначены для решения конкретных задач — например, формирования план-прогноза ВРП и других макроэкономических показателей развития [45, 87], индикативного планирования развития региона [11—14] и др. Динамическая многоотраслевая модель экономической системы с сырьевой направленностью учитывает эффект исчерпания запаса ресурсов, а также неблагоприятное воздействие окружающей среды [8—10, 88]. Наличие в моделях внутреннего контура оптимизирующего регулирования обеспечивает в долгосрочном плане выход на динамику роста.

В рамках рассматриваемой тематики автору принадлежит ряд результатов.

- Разработана и исследована замкнутая динамическая модель многоотраслевой национальной экономики, с помощью которой выявлен эффект предельной рентабельности отраслей, превышение которой приводит к отрицательной динамике [15].
- Разработан метод расчета сбалансированных цен и объемов выпуска отраслей, соответствующих максимальной (потенциальной) продуктивности экономической системы [46, 47].
- Исследованы механизмы оптимизирующего регулятора применительно к различным моделям развивающихся систем [16, 17].
- Разработаны динамические модели диверсификации монопродуктовой экономики с выходом на режим роста. Проведена адаптация модели к региону интенсивного освоения недр в условиях экологических ограничений [8—10].
- Разработаны процедуры анализа и выбора оптимальных вариантов на иерархических графах с непрерывными шкалами оценивания [51, 55, 78].
- Разработаны процедуры расчета транзитивного замыкания оценок, предназначенные для экспертного анализа связей в многофакторных системах с применением операций линейной алгебры и многозначной логики. Области применения этих процедур: расчет полных оценок взаимного влияния факторов, оценок системных рисков, полных затрат временных и материальных ресурсов. Проведены сравнительные расчеты оценок долгосрочного эффекта управляющих воздействий для финансово-кредитной системы и реального сектора экономики в условиях глобализации и локализации хозяйственной деятельности [82—86].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Leontief W.* (in collaboration with A. Carter and P. Petri) The Future of the World Economy. — N.-Y.: Oxford University Press, 1977.
2. *Вишневский А.Г.* Воспроизводство населения и общество: История, современность, взгляд в будущее — М: Финансы и статистика, 1982. — 287 с.
3. *Разумовский С.М.* Закономерности динамики биогеоценозов — М.: Наука, 1981. — 231 с.
4. *Bambi M., Gozzi F., Licandro O.* Endogenous growth and wave-like business fluctuations // Journal of Economic Theory. — 2014. — Vol. 154, N 11. — P. 68—111.
5. *Asea P.K., Zak P.J.* Time-to-build and cycles // Journal of Economic Dynamics & Control. —1999. — Vol. 23, iss. 8. — P. 1155—1175.
6. *Lin H.C.* Computing Transitional Cycles for a Deterministic Time-to-Build Growth Model // Computational Economics. —

2018. — Vol. 51, iss. 3. — P. 677—696. — DOI: 10.1007/s10614-016-9633-9.
7. *Mesarovic M., Pestel E.* Mankind at the Turning Point: Second Report to the Club of Rome. —N.-Y.: Dutton, 1974.
8. *Васильев С.Н., Пащенко Ф.Ф., Гусев В.Б.* Моделирование динамики развития региона с сырьевой специализацией // Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование. — 2012. — № 5. — С. 52—62.
9. *Гусев В.Б.* Индикаторы стабильного развития крупномасштабной экономической системы в условиях диверсификации реального сектора // Тр. восьмой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015» в 2 т. / ИПУ РАН. — М., 2015. — Т. 1. — С. 27—36.
10. *Гусев В.Б.* Модель диверсификации производства для региона интенсивного освоения недр // Сибирский журнал индустриальной математики. — 2012. — Т. XV, № 3 (51). — С. 24—36.
11. *Гусев В.Б., Ефременко В.Ф., Левинталь А.Б.* и др. Методы индикативного планирования в региональном управлении. — М.: Научная книга», 2006. — 144 с.
12. *Левинталь А.Б., Ефременко В.Ф., Гусев В.Б., Пащенко Ф.Ф.* Расчет показателей индикативного планирования для программ развития региона. — М.: ИПУ РАН, 2006. — 54 с.
13. *Гусев В.Б., Ефременко В.Ф., Левинталь А.Б.* и др. Индикативное планирование и проведение региональной политики. — М.: Финансы и статистика, 2007. — 368 с.
14. *Белкин В.Д., Стороженко В.П.* Индикативное планирование и наращивание инвестиций — необходимые предпосылки повышения темпов роста // Экономическая наука современной России. — 2002. — № 4. — С. 44—56.
15. *Бурков В.Н., Гусев В.Б., Черкашин А.М.* Финансовая продуктивность монополизированных экономик // Приборы и системы управления. — 1994. — № 11.
16. *Гусев В.Б.* Модели автономного управления системами с индикативным целеполаганием // Тр. четвертой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2010), 4—6 окт. 2010 г., ИПУ РАН, Москва, Россия. — М., 2010. — Т. 1. С. 294—296.
17. *Gusev V.B.* Models of Autonomous Control in the Organizational Systems // Proc. of the 2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC) 23—25 May 2011, Mianzhou Hotel. — Mianyang, China. Mianyang, China: Northeastern University. — P. 283—288.
18. *Murillo M.H., Limache A.C., Rojas P.S.F., and Giovanini L.L.* Generalized nonlinear optimal predictive control using iterative state-space trajectories: applications to autonomous flight of UAVs // Int. Journal of Control, Automation, and Systems. — 2015. — Vol. 13, N 2. — P. 361—370.
19. *Li X.F., Chu Y.D., and Andrewy Y.T.* Synchronization of uncertain chaotic systems via complete-adaptive-impulsive controls // Chaos Solitons & Fractals. — July 2017. — Vol. 100. — P. 24—30.
20. *Yao D., Lu R., Xu Y.,* et al. Adaptive sliding mode control of switched systems with different input matrix // Int. Journal of Control, Automation and Systems. — 2017. — Vol. 15, iss. 6. — P. 2500—2506. — URL: https://doi.org/10.1007/s12555-016-0570-0 (дата обращения 12.09.2018).
21. *Леонидов А.В., Серебрянникова Е.Е.* Динамическая модель несовершенной конкуренции в многосекторной экономике // Проблемы управления. — 2017. — № 4. — С. 8—16.
22. *Сидоров А.А.* Методологический подход к интегральной оценке состояния и динамики многомерных объектов социально-экономической природы // Проблемы управления. — 2016. — № 3. — С. 32—40.
23. *Афанасьев В.Н.* Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами. — М.: URSS, 2015. — 224 с.
24. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Оценка синергетического эффекта деятельности предприятий по динамике нематериальных активов // Материалы 10-й междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2017, Москва, ИПУ РАН. — 2017. — Т. 1. — С. 263—265.
25. *Белов М.В.* Математическое моделирование жизненных циклов сложных социально-экономических и бизнес-систем // Проблемы управления. — 2016 — № 2. — С. 49—61.
26. *Горбанева О.И., Угольницкий Г.А.* Учет коррупции в моделях сочетания общественных и частных интересов в иерархических системах управления // Проблемы управления. — 2016. — № 2. — С. 26—71.
27. *Подиновский В.В.* Согласительные решения многокритериальных задач выбора // Проблемы управления. — 2017. — № 2. — С. 17—26.
28. *Стенников В.А., Пеньковский А.В., Хамисов О.В.* Поиск равновесия Курно на рынке тепловой энергии в условиях конкурентного поведения источников тепла // Проблемы управления. — 2017. — № 1. — С. 2—9.
29. *Сидельников Ю.В.* Формирование понятийно-терминологического аппарата экспертологии // Проблемы управления. — 2017. — № 5. — С. 18—30.
30. *Пайсон Д.Б.* Матричное моделирование взаимодействия участников цепочек создания ценности в задачах управления структурными преобразованиями ракетно-космической промышленности // Проблемы управления. — 2016. — № 6. — С. 26—34.
31. *Нейман Дж.* Теория самовоспроизводящихся автоматов. — М.: Мир,1971.
32. *Еналеев А.К.* Согласованные разбиения в сетевых организационных структурах // Проблемы управления. — 2016. — № 6. — С. 18—25.
33. *Ратнер С.В.* Применение сетевого анализа среды функционирования в задачах регионального экологического менеджмента // Проблемы управления. — 2016. — № 6. — С. 35—46.
34. *Кулинич А.А.* Семиотические когнитивные карты. Ч. 1. Когнитивный и семиотический подходы в информатике и управлении // Проблемы управления. — 2016. — № 1. — С. 2—10; Ч. 2. Основные определения и алгоритмы. — № 2. — С. 24—40.
35. *Модели* и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем: в 2-х кн. / под ред. В.Л. Шульца, В.В. Кульбы. — М.: Наука, 2012.
36. *Асанов А.З., Мышкина И.Ю.* Исследование возможности применения нейронных сетей при решении задачи отбора команды для реализации проекта // Проблемы управления. — 2017. — № 1. — С. 19—30.
37. *Методы* робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учеб. / под ред. Н.Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 744 с.
38. *Гребенюк Е.А., Малинкина А.В.* Сравнение методов эконометрического анализа данных для идентификации финансовых пузырей // Проблемы управления. — 2017. — № 4. — С. 17—25.
39. *Добровидов А.В., Тевосян В.Э.* Непараметрическая оценка волатильности и ее параметрические аналоги // Проблемы управления. — 2017. — № 4. — С. 26—36.
40. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. — М.: Наука, 1977. — 256 с.
41. *Бурков В.Н. Кондратьев В.В., Цыганов В.В., Черкашин А.М.* Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма. — М.: Наука, 1984. — 272 с.
42. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Сетевые активные системы: модели планирования и стимулирования // Проблемы управления. — 2018. — № 1. — С. 47—57.
43. *Гусев В.Б.* Фактор времени в моделях целеполагания // Материалы междунар. научно-практ. конф. «Теория активных систем (ТАС-2014)», Москва, ИПУ РАН, 2014. — С. 71—74.
44. *Ватанабэ С, Икэда Н.* Стохастические дифференциальные уравнения и диффузионные процессы: пер. с англ. под ред. А.Н. Ширяева. — М.: Наука, 1986. — 448 с.
45. *Антипов В.И., Пащенко Ф.Ф.* Модель воспроизводства ВВП России Р1-4К. Материальный аспект. — М.: ИПУ РАН, 2009. — 90 с.
46. *Гусев В.Б.* Равновесные модели многоресурсных саморазвивающихся систем // Проблемы управления. — 2007. — № 3. — С. 18—25.

47. *Гусев В.Б.* Ценовые индикаторы в модели технологического равновесия // Тр. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем», Москва, ИПУ РАН, 2008. — С. 158—164.
48. *Акаев А.А.* Проекты и риски будущего: Концепции, модели, инструменты, прогнозы / отв. ред. А.А. Акаев, А.В. Коротаев, Г.Г. Малинецкий, С.Ю. Малков. — М.: КРАСАНД, 2011. — 432 с.
49. *Гусев В.Б., Косьяненко А.В.* Оценка влияния государственного заказа на воспроизводство ВВП // Проблемы управления. — 2009. — № 1. — С. 36—42.
50. *Кулинич А.А.* Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. — 2010. — № 3. — С. 2—16.
51. *Гусев В.Б.* Модели систем с автономным управлением. — М.: ИПУ РАН, 2014. — 284 с.
52. *Егоров А.И.* Основы теории управления. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 504 с.
53. *Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сулакшин С.С.* Применение вычислимых моделей в государственном управлении. — М.: Научный эксперт, 2007. — 304 с.
54. *Гусев В.Б.* Продуктивность и устойчивость моделей воспроизводства. — Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. — 113 с.
55. *Гусев В.Б., Павельев В.В.* Использование непрерывных шкал при оценивании и принятии решений в сложных проблемных ситуациях. — М.: ИПУ РАН, 2013. — 118 с.
56. *Глотов В.А., Павельев В.В.* Векторная стратификация. — М.: Наука, 1984.
57. *Миллер Дж.* Правила инвестирования Уоррена Баффетта. — М.: Альпина Паблишер, 2017. — 374 р.
58. *Нейман Дж., Моргенштерн О.* Теория игр и экономическое поведение. — М.: Наука, 1970.
59. *Гермейер Ю.Б.* Игры с непротивоположными интересами. — М.: Наука, 1976. — 326 с.
60. *Белоусов Д.Р., Солнцев О.Г., Хромов М.Ю.* Построение долгосрочного научно-технологического прогноза для России методом Форсайт // Проблемы прогнозирования. — 2008. — № 1. — С. 18—32.
61. *Воронов А.А.* Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. — М.: Наука, 1979. — 336 с.
62. *Goldberg B., Zufferey R., Doshi.N.*, et al. Power and Control Autonomy for High-Speed Locomotion With an Insect-Scale Legged Robot // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2018. — Vol. 3, iss. 2. — P. 987—993.
63. *Sardarmehni T., Heydari A.* Sub-optimal scheduling in switched systems with continuous-time dynamics: A gradient descent approach // Neurocomputing. — 2018. — Vol. 285. — P. 10—22.
64. *Arunkumar G.K., Sabnis A., Vachhani L.* Robust Steering Control for Autonomous Homing and its Application in Visual Homing under Practical Conditions // Journal of Intelligent & Robotic Systems. — 2018. — Vol. 89, iss. 3-4. — P. 403—419. — DOI: https://doi.org/10.1007/s1084.
65. *Zhai D.-H., Xia Y.* Adaptive Control of Semi-Autonomous Teleoperation System With Asymmetric Time-Varying Delays and Input Uncertainties // IEEE Trans. on Cybernetics — 2017. — Vol. 47, iss. 11. — P. 3621—3633.
66. *Zachariah S.K., Kurian T.* Hybrid-state driven autonomous control for planar bipedal locomotion over randomly sloped non-uniform stairs // Robotics and Autonomous Systems. — 2017. — Vol. 97. — P. 18—39.
67. *Гусев В.Б.* Многопродуктовая модель ресурсодобывающего региона с автономными механизмами управления // Тр. четвертой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2010), 4—6 окт. 2010 г., ИПУ РАН, Москва, Россия. — М., 2010. — Т. II.— С. 233—239.
68. *Ивантер В.В.* Прикладное прогнозирование национальной экономики: учеб. пособие / под ред. В.В. Ивантера, Н.И. Буданова, А.Г. Коровкина, В.С. Сутягина. — М.: Экономистъ, 2007. — 218 с.
69. *Гусев В.Б.* Согласование критериев принятия решений при целевом планировании // Сибирский журнал индустриальной математики. — 2005. — Т. VIII, № 2 (22) — С. 32—45.
70. *Ротач В.Я.* К расчету оптимальных параметров реальных ПИД-регуляторов по экспертным критериям // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2006. — № 2. — С. 22—29.
71. *Емельянов А.А., Власова Е.А., Дума Р.В.* Имитационное моделирование экономических процессов. — М.: Финансы и статистика, 2014. — 416 с.
72. *Ostrogradsky M.* In.: Mem. de 1'Acad. des Sci. de St-Petershourg. — 1850. — Т. 8, N 3. — P. 33—48.
73. *Astrom K.J., Hagglund T.* Advanced PID control. — ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. — 460 p.
74. *Li Y., Ang K.H. and Chong G.C.Y.* PID control system analysis and design — Problems, remedies, and future directions // IEEE Control Systems Magazine. — 2006. — Vol. 26, iss. 1. P. 32—41. — URL: http://eprints.gla.ac.uk/3815/ (дата обращения 18.09.2018).
75. *Макконелл К., Брю С.Л.* Экономикс: проблемы и политика: в 2-х т., пер. с англ. — Таллин, 1993. — Т. 1. — 399 с.; Т. 2. — 400 с.
76. *Трахтенгерц Э.А.* Субъективность в компьютерной поддержке управленческих решений. — М.: СИНТЕГ, 2001. — 256 с.
77. *Канторович Л.В., Макаров В.Л.* Цены и эффективность производства // Экономика и математические методы. — 1984. — Т. XX, вып. 1. — С. 28—41.
78. *Гусев В.Б.* Отладка многопараметрических непрерывных шкал // Проблемы управления. — 2008. — № 1. — С. 36—42.
79. *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления. — М.: МЭИ, 2004. — 400 с.
80. *Astrom K.J., Hagglund T.* Advanced PID control. — ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. — 460 p.
81. *Поспелов И.Г.* Математическое моделирование экономических структур. — М.: ФАЗИС, 2003. — 194 с.
82. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Экспертный анализ системы управления нематериальными активами с учетом оценок рисков // Проблемы управления. — 2017. — № 1. — С. 31—39.
83. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Анализ влияния нематериальных активов на инновационные процессы // Московский экономический журнал. — 2016. — № 4. — URL: http://qje.su/innovatsii-i-modernizatsiya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-4-2016-32/. (дата обращения 13.09.2018).
84. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Анализ оценок временных затрат при управлении нематериальными активами // Московский экономический журнал. — 2016. — Т. 4. URL: http://qje.su/upravlenie-predpriyatiem/2773/ (дата обращения 13.09.2018).
85. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Рефлексивные процедуры анализа экспертных данных // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2016. — № 2. — С. 31—35.
86. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Экспертный анализ системного эффекта от взаимовлияний факторов кредитно-денежной политики для поддержки принятия решений на основе рефлексивных процедур линейного оценивания и логического вывода // Проблемы управления. — 2014. — № 6. — С. 59—67.
87. *Гранберг Ю.Н.* Основы региональной экономики — М.: ГУ ВШЭ, 2001. — 495 с.
88. *Гусев В.Б.* Достаточные условия стабильного развития при диверсификации экономики // Друкеровский вестник. — 2015. — № 3 (7). — С. 91—98.

Статья представлена к публикации руководителем регионального редсовета Г.А. Угольницким.

Гусев Владислав Борисович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ gusvbr@mail.ru.