

УДК 004.81

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ КАК СЛОЖНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ МНОГОАГЕНТНЫМ ОБЪЕКТОМ

Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Закиева Е.Ш., Габдуллина Э.Р.

*ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, e-mail: ea-makarova@mail.ru*

В статье изучены вопросы разработки методологических основ системного динамического моделирования и интеллектуального управления промышленным комплексом (ПК) как сложным динамическим многоагентным объектом. Показано, что ПК рассматривается как сложная динамическая многоагентная система, которая имеет иерархическую структуру, элементами которой являются производственные агенты, представленные предприятиями (на микроуровне), отраслями (на мезоуровне), взаимосвязанными друг с другом потоками ресурсов и информационными связями. Методологические основы представлены множеством подходов к исследованию проблем управления ПК; множеством динамических, мультиагентных и интеллектуальных моделей; а также множеством методов управления ПК. Разработаны три метода поддержки процедур интеллектуального управления ПК. Первый метод предполагает применение только имитационных динамических и мультиагентных моделей функционирования ПК для решения проблем управления ПК. Второй метод предполагает применение только интеллектуальных методов для анализа и поддержки принятия решений при управлении функционированием ПК. Третий метод обеспечивает интеграцию методов динамического и мультиагентного моделирования, интеллектуальных методов анализа данных и поддержки принятия решений на базе имитационного моделирования. Это позволяет обеспечить гибкость управления в условиях неопределенности, возможность проведения сценарных исследований управляемого поведения ПК и оценки эффективности предложенных управленческих решений.

Ключевые слова: методология, интеллектуальное управление, имитационное моделирование, интеллектуальный анализ данных, промышленный комплекс

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF MODELING AND INTELLIGENT MANAGEMENT OF AN INDUSTRIAL COMPLEX AS A COMPLEX DYNAMIC MULTI-AGENT OBJECT

Ilyasov B.G., Makarova E.A., Zakieva E.Sh., Gabdullina E.R.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa State Aviation
Technical University, Ufa, e-mail: ea-makarova@mail.ru*

The article deals with the development of methodological foundations for system dynamic modeling and intelligent management of an industrial complex (IC) as a complex dynamic multi-agent object. It is shown that the IC is considered as a complex dynamic multi-agent system that has a hierarchical structure, the elements of which are production agents represented by enterprises (at the micro level), industries (at the meso level), interconnected by resource flows and information links. The methodological foundations are represented by a variety of approaches to the study of IC management problems; a variety of dynamic, multi-agent and intelligent models; and a variety of IC management methods. Three methods have been developed to support intelligent IC management procedures. The first method involves using only simulation dynamic and multi-agent models of IC functioning to solve IC management problems. The second method involves the use of only intelligent methods for analyzing and decision making support in managing the functioning of the IC. The third method provides integration of dynamic and multi-agent modeling methods, intelligent data analysis methods and decision making support based on simulation. This allows you to provide management flexibility in conditions of uncertainty, the ability to conduct scenario studies of the controlled behavior of the IC and evaluate the effectiveness of the proposed management solutions.

Keywords: methodology, intelligent management, simulation modeling, data mining, industrial complex

Современное состояние промышленного сектора России характеризуется снижением темпов роста индекса производства в целом, однако при этом положительную динамику роста продолжает демонстрировать сегмент добывающих отраслей промышленности [1]. Это свидетельствует об усугублении сложившихся деформаций в отраслевой структуре промышленного сектора, обусловленных приоритетным развитием потенциала сырьевых отраслей

при незначительном ресурсном обеспечении обрабатывающих отраслей, в том числе машиностроения, а также недостаточным инвестированием высокотехнологичных отраслей, что необходимо в условиях динамично развивающейся индустриальной революции 4.0, цифровой трансформации и перехода на инновационный путь развития промышленности регионов России [2]. Следствием отраслевых деформаций и несбалансированности является нарушение

воспроизводственных пропорций и на региональном уровне [3].

Перечисленные факторы приводят к необходимости проведения структурной корректировки промышленного комплекса (ПК), осуществляемой, во-первых, за счет изменения связей в виде перераспределения ресурсных потоков; во-вторых, за счет формирования новых элементов структуры ПК (предприятий, выпускающих новую продукцию по инновационным технологиям с использованием инновационных материалов), заполняющих возникшие за последние годы «пустоты» отраслевой структуры промышленного сектора с учетом его региональной декомпозиции; и, в-третьих, за счет совершенствования системы управления развитием ПК путем применения интеллектуальных алгоритмов обработки информации и принятия управленческих решений в условиях неопределенности, дефицита ресурсов и нелинейности поведения как системы, так и внешней среды.

Цель проводимых исследований состоит в разработке методологических основ системного и динамического моделирования и интеллектуального управления промышленным комплексом как сложным динамическим многоагентным объектом (СДМО) с учетом несбалансированности поведения производственных агентов и структурной дифференциации уровня их промышленного развития.

Материалы и методы исследования

Промышленный комплекс как объект управления рассматривается в виде сложной динамической многоагентной системы, которая имеет иерархическую структуру, элементами которой являются производственные агенты, представленные предприятиями (на микроуровне), отраслями (на мезоуровне), взаимосвязанными друг с другом потоками ресурсов и информационными связями. В составе ПК исследуется взаимосвязанное функционирование различных отраслей, причем отраслевые составляющие ПК рассматриваются также и с учетом их региональной декомпозиции. Исследование процесса функционирования и развития ПК на макроуровне предполагает анализ функционирования ПК во взаимодействии с элементами среды в виде социальной и государственной подсистем, образующих при взаимодействии с ПК воспроизводственный процесс.

Основы предлагаемой методологии исследования системного и динамического моделирования и интеллектуального

управления ПК как СДМО представлены *тремя взаимосвязанными множествами*: во-первых, *множеством подходов*, применяемых в исследовании; во-вторых, *множеством моделей*, упорядоченных в виде взаимосвязанной последовательности их применения; и, в-третьих, *множеством методов и алгоритмов управления*, применяемых при разработке информационной системы интеллектуального управления процессом функционирования и развития ПК как СДМО (рис. 1).

Множество подходов (базовое множество) включает: структурно-функциональный, динамический, многоагентный, когнитивный, информационный, кибернетический, синергетический, воспроизводственный и сценарный подходы, а также подход, основанный на знаниях. Интегрирующей базой применения этих подходов является системный подход.

Применение *структурно-функционального подхода* предполагает:

1) проведение исследований ПК как иерархического объекта в нисходящем направлении и построение комплекса разноуровневых динамических моделей, а затем проведение исследований ПК в восходящем направлении и построение мультиагентных моделей функционирования ПК, а также взаимное обогащение разрабатываемых моделей на основе полученных результатов с последующим проведением экспериментальных исследований;

2) проведение исследований закономерностей функционирования ПК при горизонтальной декомпозиции на выделенных уровнях иерархии с предпочтительным исследованием межотраслевых структур;

3) исследование взаимосвязи между структурными особенностями ПК как иерархического объекта с использованием как горизонтальных связей на выделенных уровнях иерархии, так и вертикальных межуровневых связей, в том числе и управляющих, и выявленных свойств ПК [2, 4].

Применение *динамического подхода* предполагает проведение исследований динамических свойств процессов функционирования ПК на выделенных уровнях иерархии с учетом изменяющихся во времени возмущающих и управляющих воздействий в условиях несбалансированности ресурсных потоков и непропорциональности накопленных запасов ресурсов с учетом нелинейных поточно-запасных характеристик. Описание динамики поведения ПК ведется путем построения комплекса динамических моделей, представленных в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений.



Рис. 1. Методология системного и динамического моделирования и интеллектуального управления промышленным комплексом как СДМО

Применение *многоагентного подхода* предполагает исследование процессов функционирования ПК как СДМО на основе обобщения скоординированного поведения производственных агентов выделенных уровней (предприятий, отраслей), обладающих правилами принятия решений в различных производственных ситуациях, и выявление интегрированных закономерностей и тенденций управляемого развития ПК в целом.

Применение *когнитивного подхода* предполагает построение когнитивных карт и когнитивных моделей с помощью методов машинного обучения, а также проектирование позитивных и негативных путей распространения возмущающих и управляющих воздействий с целью формирования знаний о правилах принятия решений агентами ПК разных уровней.

Применение *кибернетического и информационного подходов* предполагает построение многоуровневой системы интеллектуального управления функционированием и развитием ПК как сложного многоагентного иерархического объекта и формирование алгоритмов управления, основанных как на нелинейных логических законах управления в составе контуров обратных

связей и адаптации, так и на интеллектуальных алгоритмах управления, выявленных по результатам машинного обучения, в составе контура ситуационного управления.

Применение *синергетического подхода* предполагает выявление закономерностей такого согласованного и скоординированного взаимодействия производственных агентов ПК на выделенных уровнях иерархии, имеющего нелинейный характер связей между агентами, которое позволяет выявить синергетические эффекты при проведении сценарных исследований модельного комплекса.

Применение *воспроизводственного подхода* предполагает необходимость формирования структур управления функционированием ПК на мезо- и макроуровнях с учетом воспроизводственных взаимосвязей на основе использования таблиц «Затраты – выпуск» для обеспечения сбалансированного развития ПК путем координации действия агентов выделенных уровней.

Реализация *подхода, основанного на знаниях*, предполагает построение структур базы знаний, представленной множеством нечетких правил, которые формируются либо с применением методов машинного обучения (в том числе нейросетевых и ней-

ро-нечетких) на реальных статистических и модельных (экспериментальных) данных о функционировании ПК, либо с использованием экспертных знаний, положенных в основу построения нечетких продукционных когнитивных карт и динамических моделей функционирования ПК.

Применение *сценарного подхода* предполагает построение различных сценариев в виде цепочки событий, связанных с возмущающими и управляющими воздействиями, координирующими взаимодействие агентов ПК на неравновесных режимах в процессе проведения имитационных экспериментов с помощью комплекса когнитивных, динамических и мультиагентных моделей [5, 6].

Множество моделей представлено модельным комплексом, состоящим из трех триад моделей, взаимосвязанных друг с другом на основе принципов последовательного усложнения моделей, формирования знаний на основе анализа данных, а также применения извлеченных знаний для целей управления.

Первая триада включает системные, динамические и когнитивные модели, позволяющие выполнить первоначальную структуризацию ПК и отражающие динамику неравновесных и несбалансированных по финансовым и материальным потокам режимов управления функционированием и развитием ПК.

Вторая триада представлена моделями представления знаний в виде продукционных правил классификации, полученных с использованием алгоритмов машинного обучения, в том числе с помощью применения компонентного, кластерного и нейросетевого анализа статистических данных, позволяющих выполнить структуризацию ПК в виде множества взаимосвязанных кластеров либо в отраслевом разрезе, либо в региональном разрезе [7].

Третья триада включает нечеткие когнитивные карты, нейро-нечеткие и имитационные модели, позволяющие проводить сценарные исследования с помощью имитационной модели управляемого поведения ПК, поддержка принятия решений в которых осуществляется на основе разработанных интеллектуальных моделей, обучаемых по результатам многократного проведения имитационных экспериментов [8].

Множество методов и алгоритмов управления, применяемых при разработке системы интеллектуального управления процессом функционирования и развития ПК, представлено в виде методов системного анализа, искусственного интеллекта, теории многосвязных динамических си-

стем, межотраслевого баланса, методов имитационного динамического моделирования, мультиагентного моделирования, интеллектуального анализа данных, инженерии знаний, методов когнитивного анализа и моделирования теории нечетких систем и нейро-нечеткого моделирования и управления.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе предложенной методологии исследования системного и динамического моделирования и интеллектуального управления ПК как СДМО разработаны три метода поддержки процедур интеллектуального управления ПК как СДМО и выделены три соответствующих им контура управления (M1, M2 и M3), представленных на рис. 2.

Первый метод (соответствующий контуру M1) предполагает применение только имитационных динамических и мультиагентных моделей функционирования ПК (блок 1) для решения проблемы управления и достижения цели управления ПК, выраженной в достижении требуемых значений элементов вектора выходных координат, например валовой добавленной стоимости, инвестиций и стоимости основных фондов. Реализация принципа управления по модели предполагает применение динамических и мультиагентных моделей для сценарного анализа цепочек чередования двух типов элементов: причин-ситуаций, возникновение которых обусловлено возмущающими или управляющими воздействиями, и следствий-тенденций, формирующихся как результат движения системы на множестве неравновесных состояний, возникших вследствие того или иного воздействия. Для исследования результатов имитационных экспериментов может быть применен и аппарат нечетких когнитивных карт. Параметры моделей рассчитываются на основе ретроспективных данных о функционировании ПК, в том числе и межотраслевых пропорций, что позволяет обеспечить адекватность разработанных моделей.

Второй метод (соответствующий контуру M2) предполагает применение только интеллектуальных методов для анализа и поддержки принятия решений при управлении функционированием ПК (блоки 2 и 3). В этом случае применяются методы интеллектуального анализа данных (ИАД) для обработки статистической информации о состоянии ПК с учетом его декомпозиции по выделенным признакам и для формирования кластеров (предприятий, регионов, отраслей) согласно рассматриваемому способу декомпозиции. Применение методов

машинного обучения (компонентного, кластерного анализа, нейросетевых технологий) предполагает первоначальное структурирование данных о функционировании ПК и формирование правил классификации (блок 2). Это позволяет перейти к разработке нечетких правил принятия решений, генерируемых в результате обучения нейронных сетей, и к выдаче рекомендаций по управлению ПК, что реализуется в блоке 3 интеллектуальной поддержки принятия решений (ИППР) при управлении ПК.

Приведенные цепочки применения методов обеспечивают возникновение свойства эмерджентности, присущее третьему методу ИППР при управлении ПК и заключающееся в возможности интеграции результатов интеллектуального анализа как статистических данных, так и данных об имитационных экспериментах; в возможности структурной корректировки динамических и мультиагентных моделей по результатам ИАД, а также в возможности циклического уточнения управлен-

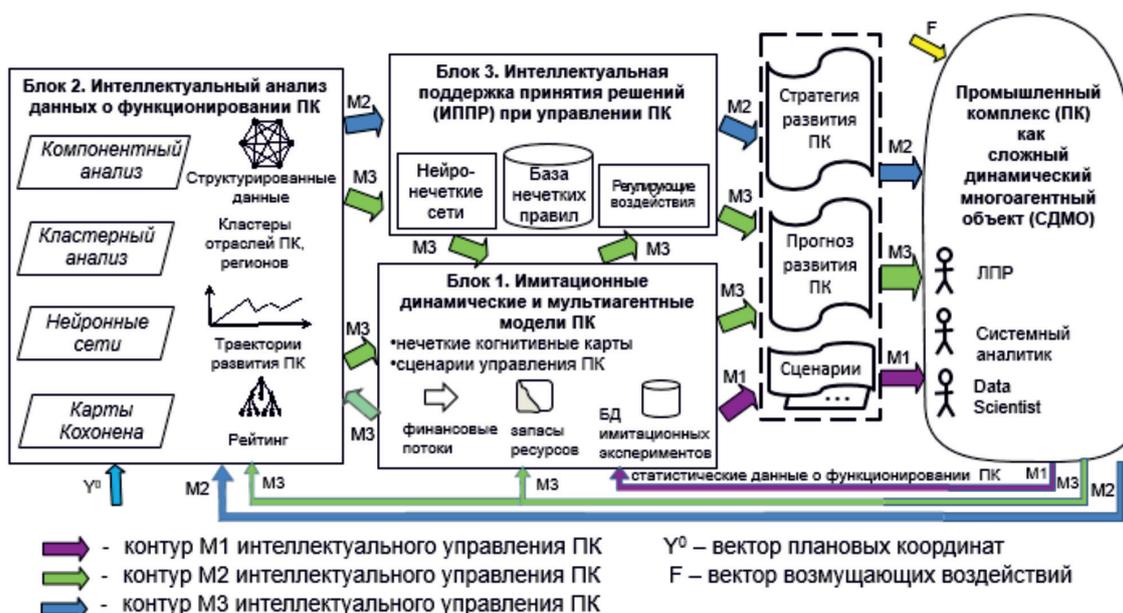


Рис. 2. Схема интеллектуального управления функционированием ПК как СДМО

Третий метод (соответствующий контуру M3) является наиболее предпочтительным при поддержке процедур управления ПК и предполагает интеграцию первых двух методов интеллектуального управления функционированием ПК как СДМО с появлением эмерджентных свойств. Особенность этого метода состоит в том, что технология имитационного моделирования используется как интегрирующая платформа при варьировании комбинаций различных методов ИАД и ИППР и реализации этих комбинаций в виде последовательно-параллельных цепочек их применения. Среди последовательных цепочек применения методов ИАД (блок 2) и ИППР (блок 3), выполняемых во взаимодействии с методами динамического моделирования (блок 1), необходимо выделить следующие:

- 1) блок 1 – блок 2 – блок 1;
- 2) блок 1 – блок 2 – блок 3 – блок 1;
- 3) блок 1 – блок 2 – блок 3 – блок 1 – блок 3.

ческих сценариев путем многократного проведения имитационных экспериментов и оценки эффективности рекомендаций по принятию решений.

Заключение

Таким образом, предложены методологические основы исследования системного и динамического моделирования и интеллектуального управления ПК как СДМО, представленные взаимосвязанными множествами подходов, моделей и методов управления ПК. На базе предложенной методологии разработаны три метода поддержки процедур интеллектуального управления ПК. Предпочтение целесообразно отдать третьему методу, обеспечивающему интеграцию методов динамического и мультиагентного моделирования, методов ИАД и ИППР путем реализации последовательно-параллельных цепочек их применения. Это позволяет обеспечить гибкость

управления в условиях неопределенности, исследовать различные сценарии управляемого поведения ПК на неравновесных режимах функционирования и оценить эффективность предложенных алгоритмов управления.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00796 «Интеллектуальное управление промышленным комплексом как динамическим многоагентным объектом на основе методов когнитивного моделирования и машинного обучения».

Список литературы

1. Клейнер Г.Б. Промышленные экосистемы: взгляд в будущее // Экономическое возрождение России. 2018. № 2 (56). С. 53–62.
2. Узяков Р.М. Использование межотраслевого инструментария в анализе динамики российской экономики в 1991–2013 гг. // Проблемы прогнозирования. 2018. № 3. С. 13–28.
3. Дружинин П.В., Прокопьев Е.А. Моделирование отраслевых структурных сдвигов в экономике России // Экономический анализ: теория и практика. 2015. № 16 (415). С. 26–33.
4. Ксенофонтов М.Ю., Широков А.А., Ползиков Д.А., Янатовский А.А. Оценка мультипликативных эффектов в российской экономике на основе таблиц «затраты-выпуск» // Проблемы прогнозирования. 2018. № 2. С. 3–14.
5. Белоусов Д.Р., Громов А.Д., Михайленко К.В., Пенушина Е.А. О построении количественной модели российской экосистемы ИКТ // Проблемы прогнозирования. 2018. № 4. С. 129–141.
6. Окрепилов В.В., Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Кузьмина С.Н. Применение суперкомпьютерных технологий для моделирования социально-экономических систем // Экономика региона. 2015. № 2. С. 301–313.
7. Макарова Е.А., Габдуллина Э.Р., Закиева Е.Ш. Регрессионный и кластерный анализ региональных производственных процессов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2015. № 12. С. 78–83.
8. Макарова Е.А., Закиева Е.Ш., Габдуллина Э.Р. Поддержка принятия решений по управлению качеством образования на основе нечетких когнитивных карт Силова // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 1. С. 76–81.