

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Агент-ориентированная модель трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом

© 2024 г. В.В. Акбердина, А.Ф. Шориков, Г.Б. Коровин, Д.В. Сиротин

В.В. Акбердина,

Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург; e-mail: akberdina.vv@uiec.ru

А.Ф. Шориков,

Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург; e-mail: shorikov.af@uiec.ru

Г.Б. Коровин,

Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург; e-mail: korovin.gb@uiec.ru

Д.В. Сиротин,

Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург; e-mail: sirotin.dv@uiec.ru

Поступила в редакцию 14.07.2023

Работа выполнена в соответствии с планом НИР Института экономики УрО РАН.

Аннотация. Опыт развитых стран свидетельствует об актуальности проблем управления территориальными промышленными комплексами. Необходимо создавать применимые на практике модели управления, опирающиеся на современные подходы и позволяющие его оптимизировать. Методологической базой исследования послужили теории экономики промышленности, экономико-математического моделирования, оптимального управления, оптимизации, игр. Методическую основу модели составляют агент-ориентированный подход, методы экономико-математического моделирования, методы построения систем управления социально-экономическими системами, минимаксный подход. В статье предложена трехуровневая модель управления региональным промышленным комплексом, определена ее иерархическая субъектно-объектная структура. Параметры промышленных объектов представлены в виде фазового вектора, а для каждого агента формализована структура управляющих и информационно-обратных связей и алгоритмы управляющих воздействий. Сформулированы решаемые в ходе использования модели задачи формирования множеств минимаксных управляющих воздействий для каждого агента; предложен общий алгоритм по выбору оптимальных управляющих воздействий. Модель позволяет реализовать ее в программной среде и создать инструмент моделирования процессов управления промышленным комплексом региона, а в дальнейшем — гибкий расширяемый программный инструмент для управления промышленностью на региональном уровне.

Ключевые слова: промышленность, региональный промышленный комплекс, управление, агент-ориентированное моделирование, минимаксный подход.

Классификация JEL: L52, C54, L60.

УДК: 338.2.

Для цитирования: Акбердина В.В., Шориков А.Ф., Коровин Г.Б., Сиротин Д.В. (2024). Агент-ориентированная модель трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 3. С. 94–106. DOI: 10.31857/S0424738824030089

1. ВВЕДЕНИЕ

Промышленный комплекс представляет собой сложный объект управления, имеющий многоуровневую субъектно-объектную структуру. Промышленная система состоит из многомерной системы материальных, управляющих и информационных связей (Смородинская, 2017) и находится под влиянием технологических социальных и экономических процессов. Модель управления промышленным комплексом региона должна учитывать сложности, связанные с корректностью понимания состава объектов такого комплекса, с целевыми ориентирами субъектов управления и критериями оптимальности управления промышленным комплексом. Экономическая наука, несмотря на ряд достижений, нуждается в разработке новых подходов к моделированию развития

региональных промышленных комплексов, в создании моделей и инструментов, которые могли бы иметь практическое применение.

Данная статья развивает полученные ранее результаты (Акбердина, Шорилов, 2022; Коровин, 2022; Сиротин, 2019; Шорилов, 2006) построения детерминированной экономико-математической модели прогнозирования состояния и оптимизации управления промышленностью на основе трехуровневой иерархической дискретной управляемой динамической системы. Целью настоящего исследования является разработка на основе выбранного подхода структуры экономико-математической модели, формализации и математического описания объектов и субъектов управления, информационных и управляющих связей в модели, алгоритмов управления объектами модели.

Исследование опирается на теории отраслевых рынков, экономического роста, экономики промышленности, системной динамики, диффузии инноваций, оптимального управления, игр с применением методов системного, экономико-математического и статистического анализов, эконометрического моделирования и минимаксного подхода.

Для моделирования промышленности отдельных территорий применяется широкий круг методов, среди которых методы статистического анализа, регрессионного, факторного анализа, экстраполяции, методы исследования экспертного мнения, методы выбора оптимальных решений, имитационные методы, которые используются для построения прогнозов социально-экономического развития территорий (Ивантер, 2016; Широ, Гусев, Янговский, 2012) и отраслей промышленности (Maouane et al., 2021).

В числе наиболее значимых российских моделей на базе данных методов можно выделить макроэкономическую модель «RUSEC» и ее развитие (Макаров, Бахтизин, Бахтизина, 2005); агент-ориентированную региональную модель «Губернатор» (ЦЭМИ РАН) (Сушко, 2012); комплекс моделей на основе межотраслевой модели RIM, включающий региональную социально-экономическую модель NORM (ИНП РАН) (Широ, Янговский, 2017); макроструктурную модель российской экономики (Центр фундаментальных исследований ГУ ВШЭ); сценарную динамическую модель демографической ситуации (ИИММ КНЦ РАН) (Маковеев, 2016) и др. Функции имитационных и системно-динамических моделей, как правило, включают возможности управленческого моделирования отраслевых комплексов, межотраслевых связей, управления производственной программой, бизнес-процессами и др.

2. МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Для моделирования промышленного комплекса в исследовании выбрана методология агент-ориентированного моделирования (АОМ), которая позволяет рассматривать экономическую систему как сообщество агентов, описывать из связи, ресурсы, стратегии и алгоритмы действий отдельных субъектов. Отношение к экономической системе как к совокупности разнородных агентов и их координации на примере промышленности Дж. Стиглиц обосновывал децентрализованным поведением, радикально различными целями, разнородностью агентов (Cimoli et al., 2006).

Если рассматривать только наиболее значимые исследования, основанные на АОМ, необходимо указать на работы В.Л. Макарова и А.Р. Бахтизина с соавторами (ЦЭМИ РАН), которые легли в основу отечественной научной базы компьютерного симуляционного моделирования экономических систем, в том числе с использованием агент-ориентированного подхода. Так, на основе модели общего экономического равновесия и нейросетевых алгоритмов была создана АОМ социально-экономической системы (Бахтизин, 2007; Макаров, Бахтизин, Сушко, 2020; Макаров, Бахтизин, Сушко, 2017). Применению АОМ в исследованиях развития промышленного комплекса России и субъектов РФ в разрезе отдельных видов деятельности посвящены работы (Горчакова, Шабалов, 2017; Медведев, Аксенов, 2012; Кислицын, Городничев, 2021).

Значимая комплексная зарубежная модель АОМ «Eurace» была разработана в 2009 г. совместными усилиями ряда европейских стран¹ (Cincotti, Raberto, Teglio, 2010). Для данной модели была создана методология, известная как ACE (agent-based computational economics), которая моделирует рыночное взаимодействие основных секторов экономики стран Евросоюза на базе реальных экономических механизмов. По результатам некоторых исследований использование методов машинного обучения и АОМ повышает общую производительность систем поддержки и принятия

¹ Германия, Великобритания, Франция, Италия и др.

решений (Turgut, Bozdag, 2022; Bonabeau, 2002). В числе сфер активного применения АОМ можно отметить исследование влияния цифровых технологий на деятельность различных отраслей и на экономику в целом (Chanias, Myers, Hess, 2019; Stummer et al., 2015; и др.).

Описанные опыт и выявленные особенности АОМ дали возможность предложить модель иерархического управления и прогнозирования развития региональных промышленных комплексов. Модель состоит из трех уровней управления — федерального, регионального и уровня предприятий, объединенных по видам деятельности. При этом в качестве объектов управления мы рассматриваем совокупности предприятий, относящихся к одному классу промышленного вида деятельности, в соответствии с классификацией ОКВЭД. Федеральный уровень управления является доминирующим, которому подчиняется региональный уровень управления, доминируя над уровнем управления видами деятельности. Виды деятельности (классы, в соответствии с классификацией ОКВЭД) регионального промышленного комплекса рассматриваются как объекты, управляемые соответствующими подчиненными агентами.

Выбор решений об управлении агентами производится на основе минимаксного подхода (Красовский, Субботин, 1974; Шориков, 1997) в рамках развития полученных ранее результатов (Шориков, 2006; Шориков, 2022). Предлагаемый подход используется для формирования общей экономико-математической модели, в которой формулируется задача гарантированной (минимаксной) оптимизации функционирования регионального промышленного комплекса, в виде задачи трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом.

Для каждого объекта модели формируется его фазовый вектор, состоящий из групп параметров: атрибуты (ключевые признаки); финансово-экономические параметры; реакции на возможные управляющие воздействия регионального и федерального уровней; реакции на возможные риски и возмущения (случайные или детерминированные события в экономике).

Выбранный методологический подход, с одной стороны, реализует близкую к фактической детализированную структуру промышленного комплекса, систему управления видами промышленной деятельности, предусматривает информационные и управленческие связи, возникающие в процессе управления. С другой стороны, подход к выбору оптимального управляющего воздействия позволяет просчитывать широкий спектр сценариев развития промышленного комплекса, учитывать важные риски, ограничения, ориентироваться на различные целевые функции для каждого агента. Кроме того, пошаговые расчеты реализуют принцип адаптивности в управлении промышленным комплексом региона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Концепция агент-ориентированной модели иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом

Приведем формализацию мультиагентной модели динамики объектов, ограничений и целевых функций агентов регионального промышленного комплекса при наличии рисков и возмущений, информационной неопределенности.

Модель предполагает, что региональный промышленный комплекс состоит из n видов деятельности, входящих в добывающую и обрабатывающую отрасли, $n \in \mathbb{N}$, где $\mathbb{N}$ — множество всех натуральных чисел.

Региональный промышленный комплекс в целом рассматривается как *основной объект* $\mathbf{I}$, управляемый *доминирующим агентом* E , отождествляемым с региональным органом управления промышленным комплексом, который подчиняется *федеральному агенту* P , отождествляемому с органом управления промышленностью РФ. Отдельные виды деятельности регионального промышленного комплекса рассматриваются как *вспомогательные объекты* $\mathbf{I}_i$, $i \in \{1, \dots, n\}$, управляемые соответствующими *подчиненными агентами* E_i , подчиняющимися агентам P и E и имеющими различные цели и информацию для принятия управленческих решений. Процесс управления региональным промышленным комплексом рассматривается на заданном целочисленном промежутке времени $\{0, \dots, T\}$, $T \in \mathbb{N}$.

Пусть в конечномерном векторном пространстве $\mathbf{R}^n$ при фиксированном $n \in \mathbf{N}$ множество всех конечных подмножеств обозначается как $\Sigma(\mathbf{R}^n)$, а $\Omega(\mathbf{R}^n)$ — множество всех выпуклых многогранников-компактов (с конечным числом вершин), содержащихся в $\mathbf{R}^n$ (по определению полагается, что одноэлементные множества в рассматриваемых конечномерных векторных пространствах являются выпуклыми многогранниками-компактами).

Предполагается, что динамика основного объекта $\mathbf{I}$, управляемого доминирующим агентом E , описывается векторно-матричным линейным рекуррентным уравнением

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{W}(t) + \mathbf{C}(t)\mathbf{U}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{V}(t) + \mathbf{E}(t)\mathbf{S}(t), \quad \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0, \quad (1)$$

параметры которого должны удовлетворять заданным ограничениям:

— фазовый вектор $\mathbf{X}(t) = (X_1(t), \dots, X_k(t))'$ объекта $\mathbf{I}$ —

$$\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}_*(t) \in \Omega(\mathbf{R}^k) \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}; \quad (2)$$

— вектор управления $\mathbf{W}(t) = (W_1(t), \dots, W_m(t))'$ агента P —

$$\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t) \in \Sigma(\mathbf{R}^m) \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}; \quad (3)$$

— вектор управления $\mathbf{U}(t) = (U_1(t), \dots, U_p(t))'$ агента E —

$$\mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}_*(t; \mathbf{W}(t)) \in \Sigma(\mathbf{R}^p) \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \quad \mathbf{W}(t) = (W_1(t), \dots, W_m(t))' \in \mathbf{W}_*(t); \quad (4)$$

— вектор неконтролируемых рисков и возмущений $\mathbf{V}(t) = (V_1(t), \dots, V_q(t))'$, влияющих на функционирование объекта $\mathbf{I}$, —

$$\mathbf{V}(t) \in \mathbf{V}_*(t) \in \Sigma(\mathbf{R}^q) \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}; \quad (5)$$

— вектор спроса $\mathbf{S}(t) = (S_1(t), \dots, S_s(t))'$ на продукцию объекта $\mathbf{I}$ —

$$\mathbf{S}(t) \in \mathbf{S}_*(t) \in \Omega(\mathbf{R}^s) \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}. \quad (6)$$

Предполагается, что динамика объекта $\mathbf{I}_i$, $i \in \{1, \dots, n\}$, управляемого подчиненным агентом E_i , описывается векторно-матричным линейным рекуррентным уравнением

$$\mathbf{X}^{(i)}(t+1) = \mathbf{A}^{(i)}(t)\mathbf{X}^{(i)}(t) + \mathbf{B}^{(i)}(t)\mathbf{W}(t) + \mathbf{C}^{(i)}(t)\mathbf{U}(t) + \mathbf{D}^{(i)}(t)\mathbf{U}^{(i)}(t) + \mathbf{E}^{(i)}(t)\mathbf{V}^{(i)}(t) + \mathbf{G}^{(i)}(t)\mathbf{S}^{(i)}(t), \quad \mathbf{X}^{(i)}(0) = \mathbf{X}_0^{(i)}, \quad (7)$$

параметры которого должны удовлетворять ограничениям:

— фазовый вектор $\mathbf{X}^{(i)}(t) = (X_1^{(i)}(t), \dots, X_{k_i}^{(i)}(t))'$ объекта $\mathbf{I}_i$ —

$$\mathbf{X}^{(i)}(t) \in \mathbf{X}_*^{(i)}(t) \in \Omega(\mathbf{R}^{k_i}) \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}; \quad (8)$$

— вектор управления $\mathbf{U}^{(i)}(t) = (U_1^{(i)}(t), \dots, U_{p_i}^{(i)}(t))'$ агента E_i ($i \in \{1, \dots, n\}$) —

$$\mathbf{U}^{(i)}(t) \in \mathbf{U}_*^{(i)}(t; \mathbf{W}(t), \mathbf{U}(t)) \in \Sigma(\mathbf{R}^{p_i}) \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \quad \forall \mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t) \subset \mathbf{R}^m, \quad (9)$$

$$\forall \mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}_*(t; \mathbf{W}(t)) \subset \mathbf{R}^p;$$

— вектор неконтролируемых возмущений (рисков) $\mathbf{V}^{(i)}(t) = (V_1^{(i)}(t), \dots, V_{q_i}^{(i)}(t))'$, влияющих на функционирование объекта $\mathbf{I}_i$, —

$$\mathbf{V}^{(i)}(t) \in \mathbf{V}_*^{(i)}(t) \in \Sigma(\mathbf{R}^{q_i}) \quad t \in \{0, \dots, T-1\}; \quad (10)$$

— вектор спроса $\mathbf{S}^{(i)}(t) = (S_1^{(i)}(t), \dots, S_{s_i}^{(i)}(t))'$ на продукцию объекта $\mathbf{I}_i$ деятельности i —

$$\mathbf{S}^{(i)}(t) \in \mathbf{S}_*^{(i)}(t) \in \Omega(\mathbf{R}^{s_i}) \quad t \in \{0, \dots, T-1\}. \quad (11)$$

В векторно-матричном рекуррентном уравнении (1), $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{B}(t)$, $\mathbf{C}(t)$, $\mathbf{D}(t)$ и $\mathbf{E}(t)$ — действительные матрицы размерностей $(k \times k)$, $(k \times m)$, $(k \times p)$, $(k \times q)$ и $(k \times s)$ соответственно, в векторно-матричном рекуррентном уравнении (7), $\mathbf{A}^{(i)}(t)$, $\mathbf{B}^{(i)}(t)$, $\mathbf{C}^{(i)}(t)$, $\mathbf{D}^{(i)}(t)$, $\mathbf{E}^{(i)}(t)$ и $\mathbf{G}^{(i)}(t)$, $i \in \{1, \dots, n\}$ — действительные матрицы размерностей $(k_i \times k_i)$, $(k_i \times m)$, $(k_i \times p)$, $(k_i \times p_i)$, $(k_i \times q_i)$ и $(k_i \times s_i)$ соответственно, элементы которых определяются на основании статистических данных рассматриваемой системы (например, с помощью эконометрических или экспертных методов).

Сформированная управляемая динамическая система (1)–(11) является экономико-математической моделью, описывающей динамику и имеющиеся ограничения на основные элементы рассматриваемого регионального промышленного комплекса.

3.2. Описание информационных, управляющих связей в трехуровневой мультиагентной иерархической модели регионального промышленного комплекса

Деятельность доминирующего агента E , управляющего региональным промышленным комплексом, — основным объектом I , координирует федеральный орган управления промышленностью РФ — федеральный агент P . Деятельность каждого подчиненного агента E_i ($i \in \{1, \dots, n\}$), управляющего видом деятельности i (объект I_i), координируют агенты P и E . Для агента E все агенты E_i , $i \in \{1, \dots, n\}$, рассматриваемой системы равнозначны.

Предполагается, что $\forall t \in \{0, \dots, T-1\}$ и каждой допустимой реализации управления $\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ агента P агент P знает значение фазового вектора $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}_*(t)$ объекта I и агент E сообщает ему выбор своего управления $\mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}_*(t; \mathbf{W}(t))$. Агенту P также известны все элементы модели (1)–(11).

Агент P оценивает состояние регионального промышленного комплекса в целом в период времени $t \in \{0, \dots, T-1\}$ с помощью целевой функции $\Phi_t = \Phi_t(\mathbf{X}(t), \mathbf{W}(t), \mathbf{U}(t)) = \Psi(\mathbf{X}(t+1))$, где $\Psi: \mathbf{R}^k \rightarrow \mathbf{R}^1$ — отображение, определяющее значения терминального функционала Ψ .

Цель агента P — минимизировать значение целевой функции Φ_t путем выбора оптимального гарантирующего (минимаксного) управления $\mathbf{W}^{(e)}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ (Шориков, 1997) с учетом возможных наихудших, т.е. максимизирующих значение Φ_t с помощью вектора рисков и возмущений $\mathbf{V}(t) \in \mathbf{V}_*(t)$ при условии, что агенты E и E_i , $i \in \{1, \dots, n\}$ способствуют ему в этом, если это не противоречит их целям и возможностям.

Предполагается, что в каждый период времени $t \in \{0, \dots, T-1\}$, для каждого $i \in \{1, \dots, n\}$ и для каждой допустимой реализации набора $\{\mathbf{W}(t), \mathbf{U}(t)\} \in \mathbf{W}_*(t) \times \mathbf{U}_*(t; \mathbf{W}(t))$ агент E знает значения реализаций фазовых векторов $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}_*(t)$ и $\mathbf{X}^{(i)}(t) \in \mathbf{X}_*^{(i)}(t)$ объектов I и I_i соответственно, и агенты P и E_i сообщает ему выбор своих управлений $\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ и $\mathbf{U}^{(i)}(t) \in \mathbf{U}_*^{(i)}(t; \mathbf{W}(t), \mathbf{U}(t))$ соответственно. Агенту E также известны все элементы модели (1)–(11).

Агент E оценивает состояние регионального промышленного комплекса в целом в период времени $t \in \{0, \dots, T-1\}$ с помощью целевой функции $F_t = F_t(\mathbf{X}(t), \mathbf{W}(t), \mathbf{U}(t)) = \Lambda(\mathbf{X}(t+1))$, где $\Lambda: \mathbf{R}^k \rightarrow \mathbf{R}^1$ — отображение, определяющее значения терминального функционала Λ . Учитывая данную целевую функцию и рекуррентное уравнение (1), это позволяет агенту P управлять поведением агента E .

Цель агента E — минимизация значения целевой функции F путем выбора оптимального гарантирующего (минимаксного) управления $\mathbf{U}^{(e)}(t) \in \mathbf{U}_*(t; \mathbf{W}^{(e)}(t))$ с учетом возможных наихудших, т.е. максимизирующих значение F_t , реализаций векторов рисков и возмущений $\mathbf{V}(t) \in \mathbf{V}_*(t)$ и $\mathbf{V}^{(i)}(t) \in \mathbf{V}_*^{(i)}(t)$, при условии, что агенты P и E_i , $i \in \{1, \dots, n\}$, способствуют ему в этом, если это не противоречит их целям и возможностям.

Предполагается, что $\forall t \in \{0, \dots, T-1\}$ и каждой допустимой реализации набора $\{\mathbf{W}(t), \mathbf{U}(t)\} \in \mathbf{W}_*(t) \times \mathbf{U}_*(t; \mathbf{W}(t))$ агент E_i ($i \in \{1, \dots, n\}$) знает значение реализации фазового вектора $\mathbf{X}^{(i)}(t) \in \mathbf{X}_*^{(i)}(t)$ объекта I_i , и агенты P и E сообщают ему выбор своих управлений $\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ и $\mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}_*(t; \mathbf{W}(t))$ соответственно. Агенту E_i также известны все элементы модели (7)–(11).

Агент E_i ($i \in \{1, \dots, n\}$) оценивает состояние вида деятельности i регионального промышленного комплекса в период времени $t \in \{0, \dots, T-1\}$ с помощью целевой функции $F_t^{(i)} = F_t^{(i)}(\mathbf{X}^{(i)}(t), \mathbf{W}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{U}^{(i)}(t)) = \Lambda^{(i)}(\mathbf{X}^{(i)}(t+1))$, где $\Lambda^{(i)}: \mathbf{R}^{k_i} \rightarrow \mathbf{R}^1$ — отображение, определяющее значения терминального функционала $\Lambda^{(i)}$. Данная целевая функция и рекуррентное уравнение (7) позволяют агентам P и E управлять поведением агента E_i .

Цель агента E_i ($i \in \{1, \dots, n\}$) — минимизация значения целевой функции $F_t^{(i)}$ при помощи оптимального гарантирующего (минимаксного) управления $\mathbf{U}^{(i,e)}(t) \in \mathbf{U}_*^{(i)}(t; \mathbf{W}^{(e)}(t), \mathbf{U}^{(e)}(t))$ с учетом возможных наихудших, т.е. максимизирующих значение $F_t^{(i)}$ реализаций вектора рисков и возмущений $\mathbf{V}^{(i)}(t) \in \mathbf{V}_*^{(i)}(t)$, при условии, что агенты P и E способствуют ему в этом, если это не противоречит их целям и возможностям.

Сформированную дискретную управляемую динамическую систему (1)–(11) и формализованные логические, информационные и управляющие связи между ее объектами и агентами управления назовем *трехуровневой мультиагентной иерархической интеллектуальной семантической сетью*, описывающей систему управления региональным промышленным комплексом.

На рис. 1 изображена схема отношений и структурных связей между объектами и субъектами рассматриваемой семантической сети.

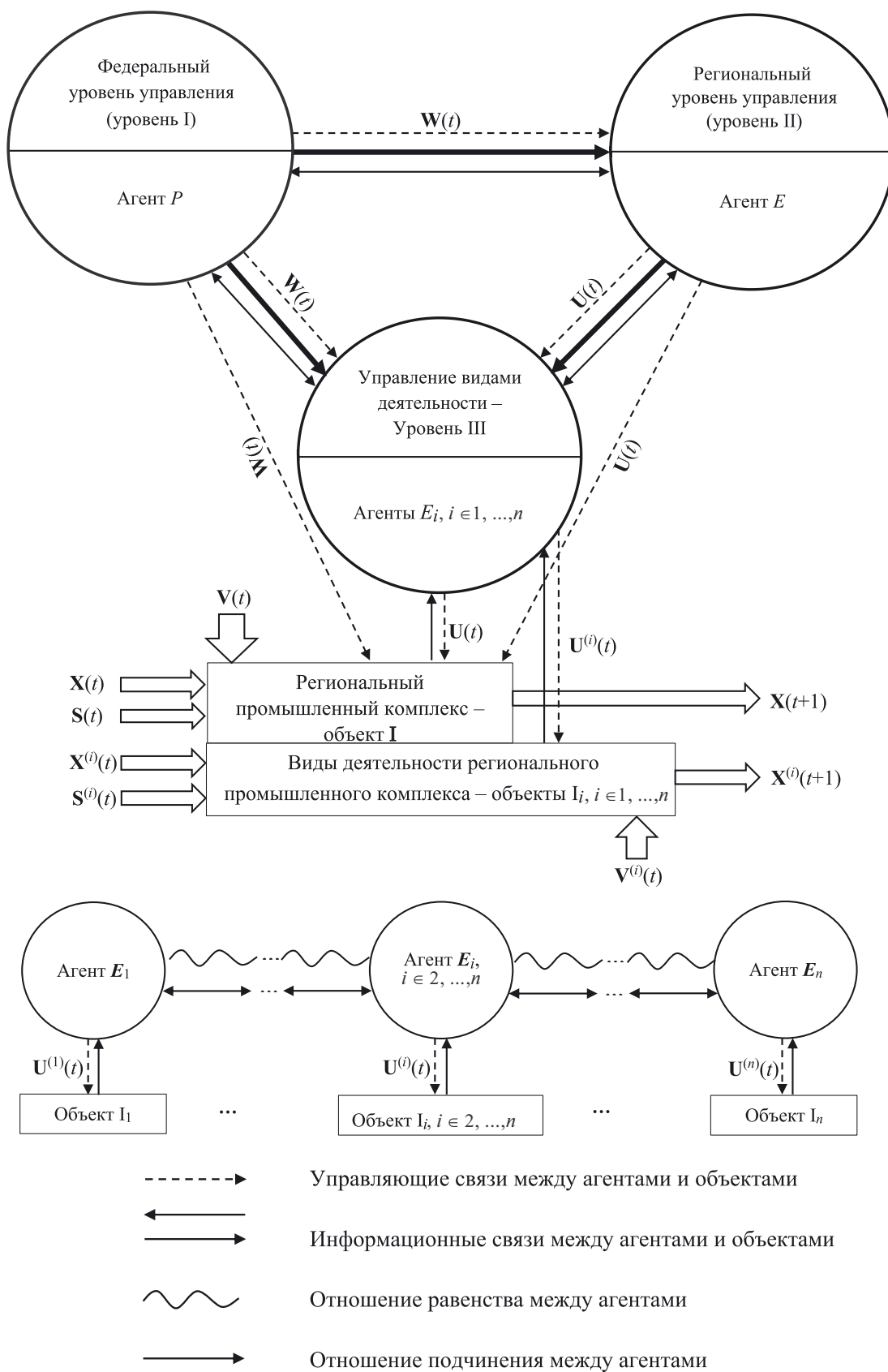


Рис. 1. Схема отношений, структурных и управляющих связей между объектами и субъектами семантической сети

3.3. Формализация задачи

Структура основной задачи *трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом* состоит из формализации трех минимаксных задач одноуровневого пошагового управления.

На основании сформированной динамической системы (1)–(11) и описания цели агента E формулируется задача минимаксного пошагового управления объектом I на уровне управления II рассматриваемой трехуровневой мультиагентной иерархической интеллектуальной семантической сети.

Задача 1. Для фиксированных периода времени t ($t \in \{0, \dots, T-1\}$) допустимой на уровне управления II рассматриваемой сети (1)–(11) реализации фазового вектора $X(t) \in X_*(t)$ объекта I , заданной целевой функции F_t агента E и допустимой на уровне управления I реализации управления $W(t) \in W_*(t)$ агента P требуется найти множество $U^{(e)}(t; X(t), W(t)) \subseteq U_*(t; W(t))$ минимаксных управлений $\bar{U}^{(e)}(t) \in U_*(t; W(t))$ агента E и минимаксный результат — число $c^{(e)}(t+1; X(t), W(t))$, соответствующих набору $\{t, X(t), W(t)\}$ и целевой функции F_t , которые удовлетворяют условию минимакса.

На основании сформированной динамической системы (1)–(11) и описания целей агента P формулируется задача минимаксного пошагового управления объектом I на уровне управления I рассматриваемой сети.

Задача 2. Для фиксированных периода времени t ($t \in \{0, \dots, T-1\}$), допустимой на уровне управления I рассматриваемой сети (1)–(11), реализации фазового вектора $X(t) \in X_*(t)$ объекта I , заданной целевой функции Φ_t агента P , требуется найти множество $W^{(e)}(t; X(t)) \times \hat{U}^{(e)}(t; X(t), \bar{W}^{(e)}(t))$, где $W^{(e)}(t; X(t)) \subseteq W_*(t)$ — множество минимаксных управлений $\bar{W}^{(e)}(t) \in W_*(t)$ агента P , $U^{(e)}(t; X(t), \bar{W}^{(e)}(t)) \subseteq \hat{U}^{(e)}(t; X(t), \bar{W}^{(e)}(t))$ — множество минимаксных управлений $\bar{U}^{(e)}(t) \in U^{(e)}(t; X(t), \bar{W}^{(e)}(t))$ агента E и минимаксный результат — число $d^{(e)}(t+1; X(t))$, соответствующих набору $\{t, X(t)\}$ и целевой функции Φ_t , которое удовлетворяет условию минимакса.

На основании сформированной динамической системы (1)–(11) и описания целей агентов E_i , $i \in \{1, \dots, n\}$, формулируется задача минимаксного пошагового управления объектом I_i на уровне управления III рассматриваемой сети.

Задача 3. Для фиксированных периода времени t ($t \in \{0, \dots, T-1\}$), индекса i ($i \in \{1, \dots, n\}$), допустимой на уровне управления III рассматриваемой сети (1)–(11) реализации фазового вектора $X^{(i)}(t) \in X_*^{(i)}(t)$ объекта I_i , заданной целевой функции $F_t^{(i)}$ агента E_i и сформированных на уровнях управления I и II реализаций минимаксных управлений $\bar{W}^{(e)}(t) \in W^{(e)}(t; X(t))$ и $\bar{U}^{(e)}(t) \in \hat{U}^{(e)}(t; X(t), \bar{W}^{(e)}(t))$ агентов P и E соответственно, требуется найти множество $U_i^{(e)}(t; X^{(i)}(t), \bar{W}(t), \bar{U}(t)) \subseteq U_*^{(i)}(t; \bar{W}(t), \bar{U}(t))$ минимаксных управлений $\bar{U}^{(i,e)}(t) \in U_*^{(i)}(t; \bar{W}(t), \bar{U}(t))$ агента E_i и минимаксный результат — число $c_i^{(e)}(t+1; X^{(i)}(t), \bar{W}(t), \bar{U}(t))$, соответствующих набору $\{t, X^{(i)}(t), \bar{W}(t), \bar{U}(t)\}$ и целевой функции $F_t^{(i)}$, которые удовлетворяют условию минимакса.

Решения минимаксных задач 1–3 существуют (доказательства осуществляются аналогично рассуждениям (Шорилов, 1997)) при выполнении следующих достаточных условий:

1) целевые функции Ψ агента P , Λ агента E и $U^{(i)}$, $i \in \{1, \dots, n\}$, агента E_i являются линейными или выпуклыми относительно фазовых векторов из их областей определения;

2) $\forall t \in \{0, \dots, T\}$: $X_*(t) \in \Omega(R^k)$; $S_*(t) \in \Omega(R^s)$;

3) $(\forall t \in \{0, \dots, T\}) \wedge (i \in \{1, \dots, n\})$: $X_*^{(i)}(t) \in \Omega(R^{k_i})$; $S_*^{(i)}(t) \in \Omega(R^{s_i})$;

4) $\forall t \in \{0, \dots, T-1\}$: $W_*(t) \in \Sigma(R^m)$; $U_*(t; W(t)) \in \Sigma(R^p)$, $W(t) \in W_*(t)$; $V_*(t) \in \Sigma(R^q)$;
 $(\forall t \in \{0, \dots, T-1\}) \wedge (i \in \{1, \dots, n\})$: $U_*^{(i)}(t; W(t), U(t)) \in \Sigma(R^{p_i})$, $W(t) \in W_*(t)$,
 $U(t) \in U_*(t; W(t))$; $V_*^{(i)}(t) \in \Sigma(R^{q_i})$;

5) при заданных начальных фазовых векторах каждого объекта системы для моделей их динамики вида (1) и (7) на промежутке времени $\{0, \dots, T\}$ существует хотя бы по одной допустимой фазовой траектории, порожденной соответствующими допустимыми наборами реализаций на этом промежутке времени векторов — управления, рисков и возмущений, спроса.

Тогда на основании решений задач 1–3 для $\forall t \in \{0, \dots, T-1\}$ и реализации набора $\{X(t), X^{(i)}(t)\}_{i \in \overline{1, n}}$, $X(t) \in X_*(t)$, $\forall i \in \{1, \dots, n\}$: $X^{(i)}(t) \in X_*^{(i)}(t)$ можно сформировать кортеж итоговых результатов:

$$\{W^{(e)}(t; X(t)), d^{(e)}(t+1; X(t))\};$$

$$\begin{aligned} & \forall \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t) \in \mathbf{W}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t)): \left\{ \hat{\mathbf{U}}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)), c^{(e)}(t+1; \mathbf{X}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)) \right\}; \\ & \forall \left\{ \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t) \right\} \in \mathbf{W}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t)) \times \hat{\mathbf{U}}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)): \\ & \bar{\mathbf{X}}^{(e)}(t+1) = \psi_t(t, \mathbf{X}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{V}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{S}}^{(e)}(t)), \bar{\mathbf{V}}^{(e)}(t) \in \mathbf{V}_*(t), \bar{\mathbf{S}}^{(e)}(t) \in \mathbf{S}_*(t), \end{aligned}$$

где ψ_t — одношаговый оператор, определенный на параметрах правой части уравнения (1);

$$\begin{aligned} & \left\{ \mathbf{U}_i^{(e)}(t; \mathbf{X}^{(i)}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)), c_i^{(e)}(t+1; \mathbf{X}^{(i)}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)) \right\}_{i \in 1, \dots, n}, \\ & \bar{\mathbf{X}}^{(i,e)}(t+1) = \psi_t^{(i)}(t, \mathbf{X}^{(i)}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(i,e)}(t), \bar{\mathbf{V}}^{(i,e)}(t), \bar{\mathbf{S}}^{(i,e)}(t)), \\ & \bar{\mathbf{U}}^{(i,e)}(t) \in \mathbf{U}_i^{(e)}(t; \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)), \bar{\mathbf{V}}^{(i,e)}(t) \in \mathbf{V}_*^{(i)}(t), \bar{\mathbf{S}}^{(i,e)}(t) \in \mathbf{S}_*^{(i)}(t), \end{aligned}$$

где $i \in 1, \dots, n$; $\psi_t^{(i)}$ — одношаговый оператор, определенный на параметрах правой части уравнения (7), который будем называть **решением задачи минимаксного пошагового управления в трехуровневой мультиагентной иерархической интеллектуальной семантической сети**, описываемой динамической системой вида (1)–(11).

3.4. Алгоритм решения задачи

Алгоритм решения рассматриваемой многошаговой задачи минимаксной оптимизации (оптимизации гарантированного результата) управления региональным промышленным комплексом (основная задача) можно представить в виде реализации последовательности одношаговых действий.

Шаг 1. Формирование неизменных исходных данных: определение числа периодов управления и определение социально-экономических параметров промышленного комплекса, региональных и федеральных управляющих воздействий власти, возмущений и объемов спроса; ввод начальных значений параметров фазовых векторов.

Начало цикла по переменной $t \in \{0, \dots, T-1\}$.

Шаг 2. Алгоритм решения задачи 1.

2.1. Формирование переменных данных для задач 1 и 2: создание матриц коэффициентов, характеризующих региональный промышленный комплекс, взаимовлияние отдельных параметров, региональных и федеральных управляющих воздействий, возмущений и спроса, которые определяют дискретное векторно-матричное рекуррентное уравнение (1) для периода t .

2.2. Формирование набора ограничений для задач 1 и 2: на параметры фазового вектора объекта $\mathbf{I}$, управляющее воздействие агента E , возмущений, рисков и спроса, имеющихся в модели (1)–(6), в виде систем алгебраических уравнений и неравенств и конечных наборов векторов.

2.3. Формирование параметров целевой функции $\mathbf{F}_t$.

2.4. Процедура решения задачи 1: на основании измерения реализации фазового вектора $\mathbf{X}(t)$ объекта $\mathbf{I}$ для фиксированного управления $\mathbf{W}(t)$ агента P осуществляется решение задачи формирования множества $\mathbf{U}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t), \mathbf{W}(t))$ минимаксных управлений агента E и минимаксного результата $c^{(e)}(t+1; \mathbf{X}(t), \mathbf{W}(t))$, соответствующих набору $\{t, \mathbf{X}(t), \mathbf{W}(t)\}$ и целевой функции $\mathbf{F}_t$. Если решение задачи 1 существует, осуществляется переход к п. 2.5, в противном случае — к п. 2.2 для корректировки исходных данных с целью выполнения достаточных условий существования ее решения (если имеется такая возможность), или — алгоритм решения основной задачи прекращает работу из-за отсутствия решения при имеющихся ограничениях.

2.5. Формирование результатов решения задачи 1 в период t .

Шаг 3. Алгоритм решения задачи 2.

3.1. Формирование параметров целевой функции Φ_t .

3.2. Процедура решения задачи 2: на основании измерения реализации фазового вектора $\mathbf{X}(t)$ объекта $\mathbf{I}$ и реализации шага 2 осуществляется решение задачи формирования множества $\mathbf{W}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t)) \times \mathbf{U}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t))$, где $\mathbf{W}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t))$ — множество минимаксных управлений $\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)$ агента P , $\hat{\mathbf{U}}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)) \subseteq \mathbf{U}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t))$ — множество минимаксных управлений $\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t) \in \mathbf{U}^{(e)}(t; \mathbf{X}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t))$ агента E и минимаксного результата $d^{(e)}(t+1; \mathbf{X}(t))$, соответствующих набору $\{t, \mathbf{X}(t)\}$ и целевой функции Φ_t . Если решение задачи 2 существует, осуществляется переход к п. 3.3, в противном случае — к п. 3.1 для корректировки исходных параметров целевой функции Φ_t . Если

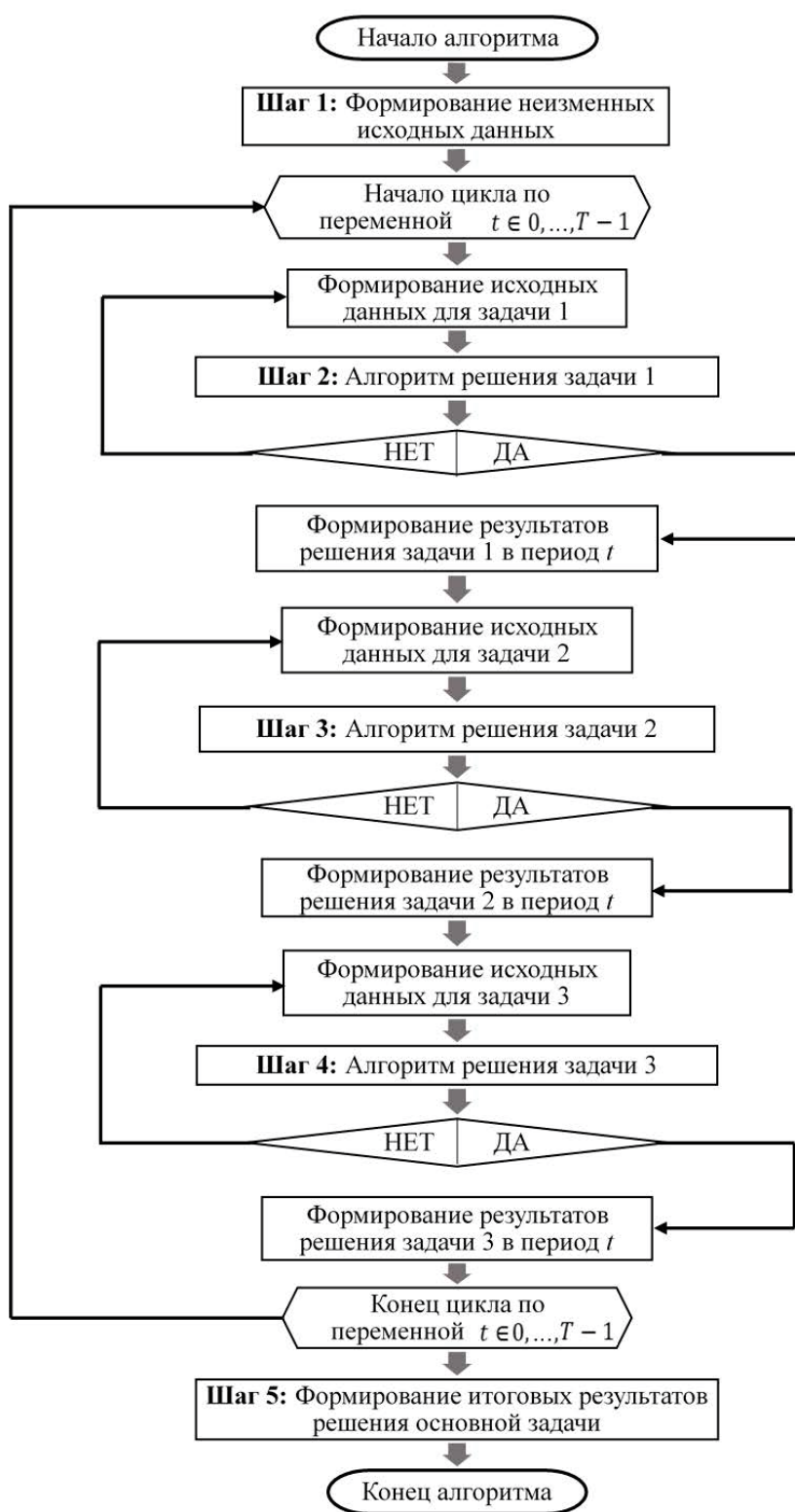


Рис. 2. Блок-схема алгоритма решения задачи трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом

такой возможности нет, то выполнение алгоритма решения основной задачи прекращается из-за отсутствия решения при имеющихся данных, определяющих параметры целевой функции Φ_r .

3.3. Формирование результатов решения задачи 2 в период t .

Шаг 4. Алгоритм решения задачи 3.

Начало цикла по переменной $i \in \{1, \dots, n\}$.

4.1. Формирование переменных данных для задачи 3: создание матриц коэффициентов, характеризующих региональный промышленный комплекс, взаимовлияние отдельных параметров, региональных и федеральных управляющих воздействий, возмущений и спроса, которые определяют дискретное векторно-матричное рекуррентное уравнение (7) в период t .

4.2. Формирование набора ограничений для задачи 3 на параметры фазового вектора объекта I_i , управляющее воздействие агента E_i , возмущений, рисков и спроса, имеющихся в модели (7)–(11) в виде систем алгебраических уравнений и неравенств и конечных наборов векторов.

4.3. Формирование параметров целевой функции $F_i^{(i)}$.

4.4. Процедура решения задачи 3: на основании измерения реализации фазового вектора $X^{(i)}(t)$ объекта I_i , решения задач шагов 2–3, реализаций минимаксных управлений $\bar{W}^{(e)}(t)$ и $\bar{U}^{(e)}(t)$ агентов P и E соответственно, осуществляется решение задачи формирования множества $U_i^{(e)}(t; X^{(i)}(t), \bar{W}^{(e)}(t), \bar{U}^{(e)}(t))$ — минимаксных управлений $\bar{U}^{(i,e)}(t)$ агента E_i и минимаксного результата $c_i^{(e)}(t+1; X^{(i)}(t), \bar{W}^{(e)}(t), \bar{U}^{(e)}(t))$, соответствующих набору $\{t, X^{(i)}(t), \bar{W}^{(e)}(t), \bar{U}^{(e)}(t)\}$ и целевой функции $F_i^{(i)}$. Если решение задачи 3 существует, то осуществляется переход к п. 4.5, в противном случае — к п. 4.2 для корректировки исходных данных. Если такой возможности нет, то выполнение алгоритма решения основной задачи прекращается в силу отсутствия ее решения при имеющихся ограничениях.

4.5. Формирование результатов решения задачи 3 для индекса i в период t .

Конец цикла по переменной $i \in \{1, \dots, n\}$.

Конец цикла по переменной $t \in \{0, \dots, T-1\}$.

Шаг 5. Формирование итоговых результатов решения основной задачи: $\forall t \in \{0, \dots, T-1\}$ и реализации набора допустимых вариантов фазовых векторов $X(t)$ и $X^{(i)}(t)$, $i \in \{1, \dots, n\}$, на основании реализации шагов 2–4 формируется набор минимаксных управляющих воздействий $\bar{W}^{(e)}(t)$, $\bar{U}^{(e)}(t)$ и $\bar{U}^{(i,e)}(t)$ агентов P , E и E_i , $i \in \{1, \dots, n\}$, для каждого уровня управления и соответствующих им минимаксных результатов $d^{(e)}(t+1; X(t))$, $c^{(e)}(t+1; X(t), \bar{W}^{(e)}(t))$ и $c_i^{(e)}(t+1; X^{(i)}(t), \bar{W}^{(e)}(t), \bar{U}^{(e)}(t))$, которые будут являться решением основной задачи — минимаксного пошагового управления в трехуровневой мультиагентной иерархической интеллектуальной семантической сети.

Процедуры решения минимаксных задач, которые фигурируют в предлагаемом алгоритме могут быть представлены в виде конечных последовательностей операций над векторами и многогранниками-компактами в конечномерных векторных пространствах, решении систем линейных алгебраических уравнений и неравенств, а также решении задач линейного (или выпуклого) математического программирования, т.е. в виде, допускающем их алгоритмизацию. В кратком виде блок-схема алгоритма решения основной задачи приведена на рис. 2. Отметим, что на упрощенной блок-схеме представлен алгоритм для случая, когда все задачи удастся успешно решить после корректировки исходных данных.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена агент-ориентированная модель трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом. В ней для каждого уровня определены структура объектов управления и управляющие агенты. Разработана структура управляющих и информационных связей модели, а также алгоритм агентов по выбору управляющих воздействий с учетом установленной иерархии управления региональным промышленным комплексом. Формализованы три уровня управления, информационные и управленческие взаимодействия, сформулированы основные задачи формирования множеств минимаксных управляющих воздействий для каждого агента модели, предложен общий содержательный алгоритм функционирования модели.

Разработанная модель имеет ряд преимуществ, связанных с использованием АОМ и широкого набора инструментов моделирования. Она имеет гибкую архитектуру, позволяет изменять структуру фазового вектора, корректировать набор социально-экономических показателей, использовать новые варианты управляющих воздействий, изменять целевые функции для каждого уровня управления. Минимаксный подход позволяет сформировать управляющие воздействия, обеспечивающие гарантированный результат при наихудших внешних факторах. Алгоритм разработанной модели предполагает реализацию пошагового управления с обратной связью, что позволит обеспечить адаптивность управления и учитывать изменчивости внешних факторов. К сложным особенностям модели можно отнести необходимость обработки значительного объема данных статистики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Акбердина В.В., Шориков А.Ф.** (2022). Иерархическая агент-ориентированная модель управления промышленным комплексом // *Управленец*. Т. 13. № 6. С. 2–14. DOI: 10.29141/2218-5003-2022-13-6-1 [Akberdina V.V., Shorikov A.F. (2022). Managing industrial complexes: A hierarchical agent-oriented model. *Manager*, 13, 6, 2–14 (in Russian). DOI: 10.29141/2218-5003-2022-13-6-1 (in Russian).]
- Бахтизин А.Р.** (2007). Опыт разработки агент-ориентированной модели // *Экономическая наука современной России*. № 3. С. 104–116. [Bakhtizin A.R. (2007). Experience in developing an agent-oriented model. *Economics of Contemporary Russia*, 3, 104–116 (in Russian).]
- Горчакова Д.А., Шабалов В.А.** (2017). О применении имитационного моделирования для прогнозирования спроса на продукцию металлургической отрасли // *Экономика и управление в XXI веке: наука и практика*. № 4. С. 108–112. [Gorchakova D.A., Shabalov V.A. (2017). On the application of imitation modeling for the forecasting of the demand for the production of the metallurgical industry. *Economics and Management in the XXI Century: Science and Practice*, 4, 108–112 (in Russian).]
- Ивантер В.В.** (2016). Стратегия перехода к экономическому росту // *Проблемы прогнозирования*. № 1. С. 3–8. [Ivanter V.V. (2016). Transition strategy to economic growth. *Studies on Russian Economic Development*, 1, 3–8 (in Russian).]
- Кислицын Е.В., Городничев В.В.** (2021). Имитационное моделирование развития отдельных отраслей тяжелой промышленности // *Бизнес-информатика*. Т. 15. № 1. С. 59–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.1.59.77 [Kislitsyn E.V., Gorodnichev V.V. (2021). Simulation of development of individual heavy industry sectors. *Business Informatics*, 15, 1, 59–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.1.59.77 (in Russian).]
- Коровин Г.Б.** (2022). Агент-ориентированная модель цифровизации промышленности региона // *Вестник Забайкальского государственного университета*. Т. 28. № 7. С. 104–114. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-104-114 [Korovin G. (2022). Agent-oriented model of the region's industry digitalization. *Transbaikal State University Journal*, 28, 7, 104–114. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-104-114 (in Russian).]
- Красовский Н.Н., Субботин А.И.** (1974). *Позиционные дифференциальные игры*. М.: Наука. [Krasovskii N.N., Subbotin A.I. (1974). *Positional differential games*. Moscow: Nauka (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бахтизина Н.В.** (2005). CGE модель социально-экономической системы России со встроенными нейронными сетями. М.: ЦЭМИ РАН. 152 с. [Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Bakhtizina N.V. (2005). *CGE model of the socio-economic system of Russia with embedded neural networks*. Moscow: CEMI RAS. 152 p. (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** (2017). Регулирование промышленных выбросов на основе агент-ориентированного подхода // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. Т. 10. № 6. С. 42–58. DOI: 10.15838/esc/2017.6.54.3 [Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2017). Regulation of industrial emissions based on the agent-based approach. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 10, 6, 42–58. DOI: 10.15838/esc/2017.6.54.3 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** (2020). Агент-ориентированная модель как инструмент регулирования экологии региона // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 1 (45). С. 151–171. DOI: 10.31737/2221-2264-2020-45-1-6 [Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2020). Agent-based model as a tool for controlling environment of the region. *Journal of the New Economic Association*, 1 (45), 151–171. DOI: 10.31737/2221-2264-2020-45-1-6 (in Russian).]
- Маковеев В.Н.** (2016). Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. № 5 (47). С. 272–289. DOI: 10.15838/esc/2016.5.47.15 [Makoveev V.N. (2016). Using agent-based models in the analysis and forecast of socio-economic development of territories. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 5, 272–289. DOI: 10.15838/esc/2016.5.47.15 (in Russian).]

- Медведев С.Н., Аксенов К.А. (2012). Анализ применимости имитационного и мультиагентного моделирования в задачах планирования машиностроительного производства // *Современные проблемы науки и образования*. № 5. С. 101–106. [Medvedev S.N., Aksenov K.A. (2012). The analysis of the applicability of simulation and modeling in multi-agent planning problems of engineering production. *Modern Problems of Science and Education*, 5, 101–106 (in Russian).]
- Сиротин Д.В. (2019). Моделирование развития экономики региона в условиях Индустрии 4.0 // *Наука Красноярья: Экономический журнал*. Т. 8. № 3. С. 98–108. DOI: 10.12731/2070-7568-2019-3-98-108 [Sirotnin D.V. (2019). Development modeling of the regional economy in the industry 4.0 conditions. *Krasnoyarsk Science: Economic Journal*. 8. 3. 98–108. DOI: 10.12731/2070-7568-2019-3-98-108 (in Russian).]
- Смородинская Н.В. (2017). Усложнение организации экономических систем в условиях нелинейного развития // *Вестник Института экономики РАН*. № 5. С. 104–115. [Smorodinskaya N.V. (2017). Complication of the organization of economic systems in the conditions of nonlinear development. *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, 5, 104–115 (in Russian).]
- Сушко Е.Д. (2012). Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация. Препринт WP/2012/292. М.: ЦЭМИ РАН. 54 с. [Sushko E.D. (2012). *Multi-agent model of the region: Concept, structure and implementation*. Preprint WP/2012/292. Moscow: CEMI RAS. 54 p. (in Russian).]
- Широв А.А., Гусев М.С., Янтовский А.А. (2012). Обоснование возможных сценариев долгосрочного развития российской экономики // *ЭКО*. № 6. С. 60–80. [Shirov A.A., Gusev M.S., Yantovsky A.A. (2012). Justification of possible scenarios for the long-term development of the Russian economy. *ECO Journal*, 6, 60–80 (in Russian).]
- Широв А.А., Янтовский А.А. (2017). Межотраслевая макроэкономическая модель RIM – развитие инструментария в современных экономических условиях // *Проблемы прогнозирования*. № 3. С.3–19. [Shirov A.A., Yantovsky A.A. (2017). Intersectoral macroeconomical model RIM — development of tools in modern economic conditions. *Studies on Russian Economic Development*, 3, 3–19 (in Russian).]
- Шориков А.Ф. (1997). Минимаксное оценивание и управление в дискретных динамических системах. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та. [Shorikov A.F. (1997). *Minimax estimation and control in discrete-time dynamical systems*. Yekaterinburg: Ural Univ. Publishing House (in Russian).]
- Шориков А.Ф. (2006). Методология моделирования многоуровневых систем: иерархия и динамика // *Прикладная информатика*. Т. 1. № 1. С. 136–141. [Shorikov A.F. (2006). Methodology of modeling multilevel systems: Hierarchy and dynamics. *Journal of Applied Informatics*, 1, 1, 136–141 (in Russian).]
- Шориков А.Ф. (2022). Двухуровневая мультиагентная иерархическая интеллектуальная семантическая сеть для минимаксного управления функционированием объектов сетевого промышленного комплекса. Материалы IV Международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии – 2021». Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН. С. 281–297. [Shorikov A.F. (2022). A two-level multi-agent hierarchical intelligent semantic network for minimax control of the functioning of objects of the network industrial complex. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference “Digital Transformation of Industry: Trends, management, strategies – 2021”. Ekaterinburg: Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 281–297 (in Russian).]
- Bonabeau E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 3, 7280–7287. DOI: 10.1073/pnas.082080899
- Chanias S., Myers M.D., Hess T. (2019). Digital transformation strategy making in predigital organizations: The case of a financial services provider. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28 (1), 17–33. DOI:10.1016/j.jsis.2018.11.003
- Cimoli M., Dosi G., Nelson R., Stiglitz J.E. (2006). Institutions and policies shaping industrial development: An introductory note. Initiative for policy dialogue. *LEM Working Paper Series*, no. 2006/02. 24 p.
- Cincotti S., Raberto M., Teglio A. (2010). Credit money and macroeconomic instability in the agent-based model and simulator Eurace. *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 4, 20–26.
- Мааоуане М., Зуггар С., Кражаčić Г., Заббуне Н. (2021). Modelling industry energy demand using multiple linear regression analysis based on consumed quantity of goods. *Energy*, 225, 120270. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120270
- Stummer C., Kiesling E., Günther M., Vetschera R. (2015). Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market: An agent-based simulation approach. *European Journal of Operational Research*, 245, 1, 157–167. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.008
- Turgut Y., Bozdog C.E. (2022). A framework proposal for machine learning-driven agent-based models through a case study analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 123, 102707. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102707

Agent-oriented model of three-level hierarchical minimax management of a regional industrial complex

© 2024 V.V. Akberdina, A.F. Shorikov, G.B. Korovin, D.V. Sirotin

V.V. Akberdina,

*Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;
e-mail: akberdina.vv@uiec.ru*

A.F. Shorikov,

*Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;
e-mail: shorikov.af@uiec.ru*

G.B. Korovin,

*Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;
e-mail: korovin.gb@uiec.ru*

D.V. Sirotin,

*Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, e-mail:
sirotin.dv@uiec.ru*

Received 14.07.2023

The study was carried out according to the state task for the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Abstract. The developed countries experience indicates the relevance of managing problems of the territorial industrial complexes and the need to create and develop applicable models based on modern approaches that take into account uncertainty and the possibility of management optimizing. The methodological basis of the research was the theory of industrial economics, the theory of economic and mathematical modeling, the theory of optimal control, optimization theory, and game theory. The model uses an agent-oriented approach, methods of economic and mathematical modeling, methods of building management systems of socio-economic systems, a minimax approach. Three-level management model of the regional industrial complex is proposed, its hierarchical subject-object structure is determined. The parameters of industrial facilities are presented in the form of a phase vector, and for each agent the structure of control and information links, algorithms for the choice of control actions are formalized. The problems of forming minimax control actions sets for each agent, solved in the course of using the model, are formulated, and a general consistent algorithm for choosing optimal control actions is proposed. The developed model will make possible to implement it in a software environment and create a tool for modeling the processes of managing the regional industrial complex, and in future — a flexible extensible software toolkit for managing industry at the regional level is to be created.

Keywords: industry, regional industrial complex, management, agent-based modeling, minimax approach.

JEL Classification: L52, C54, L60.

UDC: 338.2.

For reference: **Akberdina V.V., Shorikov A.F., Korovin G.B., Sirotin D.V.** (2024). Agent-oriented model of three-level hierarchical minimax management of a regional industrial complex. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 94–106. DOI: 10.31857/S0424738824030089 (in Russian).