

ИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ЭРГАСИСТЕМ

Ловцов Д.А.¹, Сергеев Н.А.²

Ключевые слова: эргасистема, базисные ресурсы, функциональная устойчивость, ситуационное управление, информационно-математическое обеспечение (ИМО), имитационно-игровое моделирование, многоагентная экспертная информационная система (МЭИС), модель, продукционная динамическая система, технология продукционного функционирования, методика, стратегия, многоагентная стратегическая деловая компьютерная игра, координация.

Аннотация

Цель работы: совершенствование научной и методической базы теории многоагентных стратегических стохастических игр.

Методы: системный анализ, концептуально-логическое и математическое моделирование, формально-логическая разработка и обоснование алгоритмов и методик ситуационного управления.

Результаты: разработаны научно-методические положения ИМО имитационно-игрового моделирования функционирования и развития совокупности крупномасштабных эргасистем, включая математическую модель (в формализме языка сетей Петри) динамики изменения состояния количественной составляющей продукционного ресурса эргасистемы как развивающейся продукционной динамической системы, а также информационно-функциональной структуры МЭИС, представляющей собой информационно-математическую модель подсистемы ситуационного управления (координации) функциональной безопасностью эргасистем; разработана частная методика бюджетирования и прогнозирования состояния эргасистем, использующая динамическую итерационную процедуру целенаправленного многоагентного поиска рациональной стратегии обеспечения базисными ресурсами и принятия эффективных решений. Приведены результаты экспериментального имитационно-игрового анализа.

EDN: LPWQGK

Введение

Одной из актуальных задач создания и развития отраслевых крупномасштабных интегрированных эргасистем является разработка эффективного информационно-математического обеспечения (ИМО) имитационно-игрового моделирования³ [2, 4—6, 13] функционирования и развития совокупности эргасистем. Последнее обусловлено тем, что дальнейшее

повышение устойчивости функционирования и развития современных эргасистем представляется возможным на основе концепции «новой информационной технологии» (НИТ), в частности, внедрения НИТ ситуационного управления функциональной устойчивостью совокупности отраслевых эргасистем, основанной на применении рациональных баз данных и знаний (БДЗ) и соответствующих распределённых многоагентных экспертных информационных систем (МЭИС) поддержки принятия управляющих решений [12].

Обеспечение (повышение) взаимной (коллективной) функциональной устойчивости (устойчивости функционирования и развития) совокупности эргаси-

³ Салун М. Г. Имитационно-игровое моделирование экономической системы народнохозяйственного уровня. М.: ЦЭМИ РАН, 1983. 39 с.; Саати Т. Л. Математические модели конфликтных ситуаций. М.: Сов. радио, 1977. 304 с.

¹ **Ловцов Дмитрий Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заместитель по научной работе директора Института точной механики и вычислительной техники им. С.А. Лебедева Российской академии наук, заведующий кафедрой информационного права, информатики и математики Российского государственного университета правосудия, г. Москва, Российская Федерация.
E-mail: dal-1206@mail.ru

² **Сергеев Николай Александрович**, старший преподаватель кафедры математических методов обеспечения безопасности систем Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: niko-serg@yandex.ru

стем представляет собой актуальную научную задачу [3, 14, 17]. Сложность данной задачи обусловлена тем, что каждая из эргасистем характеризуется функциональной активностью и функциональным гомеостазом на множестве функциональных возможностей в условиях динамически изменяющегося внешнего окружения (среды). При этом под функциональной устойчивостью совокупности крупномасштабных эргасистем понимается устойчивость функционирования и развития систем в условиях изменяющейся международной военно-политической и внутренней социально-экономической обстановки.

Потенциальными источниками угроз для эргасистем являются подавляющие и разрушающие случайные воздействия окружающей среды и целенаправленные воздействия (экономические, информационные, силовые) конкурирующих эргасистем в условиях дефицита кадровых, технико-экономических (включая материалы), инфраструктурных и др. ресурсов.

Сложность, гетерогенность и многоаспектность рассматриваемой задачи обуславливают необходимость разработки эффективного ИМО имитационно-игрового моделирования (ИИМ) функционирования и развития эргасистем и принятия согласованных (скоординированных) рациональных решений [10] по управлению индивидуальной и коллективной устойчивостью эргасистем в конкретных условиях. Вместе с тем, какие бы современные методы исследования ни применялись в сложных игровых задачах стохастической динамики⁴ [12, 19—21], их точное аналитическое решение принципиально не может быть найдено. В данном случае решение может представлять собой набор эвристических правил и руководящих принципов, на основе которых осуществляется стратегическое планирование развития совокупности эргасистем и выработка согласованных решений оперативного управления. Такие эвристические правила и организационные ценности можно выработать в ходе имитационно-игрового эксперимента с адекватной автоматизированной имитационно-игровой моделью (АИИМ) [9] путём многократного и многостороннего проигрывания (в сети ЭВМ) теоретически обоснованных сценариев развития совокупности эргасистем.

Под «ситуационным управлением» функциональной устойчивостью эргасистем понимается процесс оперативного планирования и выработки организационно-технических решений по обеспечению (предоставлению, перераспределению и координации применения) ресурсов, необходимых для устойчивого функционирования и развития совокупности отраслевых эргасистем, за основу которого принимаются ситуации, возникающие в процессе их целевого функционирования, оказывающие влияние на уровень функциональной устойчивости эргасистем, а также соответствующие им решения [9]. Причём ситуация — это описание состояний эргасистем (обеспеченности их ресурсами и др.),

управляемых объектов и среды на определенный момент времени меняющейся обстановки. Специфику ситуационного управления обуславливает наличие у координатора системы взаимной (коллективной) функциональной безопасности (устойчивости функционирования и развития) совокупности крупномасштабных эргасистем логико-лингвистических средств⁵ [9, 10] переработки качественной информации о возникающих в реальной обстановке ситуациях.

В качестве базисной модели системы взаимной (коллективной) функциональной устойчивости эргасистем можно использовать известную апробированную концептуально-логическую двухуровневую макромодель системы взаимной безопасности (МСВБ) эргасистем [12], представленную в формализме языка сетей Петри⁶ и допускающую ситуационную проблемно-ориентированную модификацию и адаптацию на основе содержательной интерпретации с учётом множества специальных параметров. Её верхний уровень, на котором формируются цели управления, а также определены все возможные виды взаимодействий (информационных, экономических, материальных, силовых и др.), занимает комплексная модель информационной области совокупности эргасистем, а нижний, на котором осуществляется функционирование эргасистем — комплексная модель предметной области. Базовыми элементами макромодели являются соответствующие частные модели [15, 16] эргасистем, которые могут объединяться в коалиции (комплексы).

Математическая постановка задачи

Математически задача ситуационного управления функциональной устойчивостью совокупности крупномасштабных эргасистем (правовых, технологических, специальных и др.) сформулирована следующим образом:

Дано: множество $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ эргасистем, каждая из которых характеризуется двумя агрегированными показателями, включая:

$r_i \in R = \langle X, Y, Z, H \rangle$, $i = 1, \dots, m$ — кортеж ресурсов, затрачиваемых на функционирование и развитие i -й эргасистемы на протяжении её «жизненного цикла», где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$ — множество значений величин кадровых, технико-экономических и инфраструктурных базисных ресурсов соответственно; $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$ — множество значений параметров дополнительных «организационно-правовых» ресурсов;

$$e_i = \sum_{ijk} \Delta t_{ijk} / T_{\Pi}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, I}, \quad k = x, y, z$$

— уровень функциональной устойчивости i -й эргасистемы, где Δt_{ijk} — временные интервалы, на которых

⁵ Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.

⁶ Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.

⁴ Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Наука, 1978. 384 с.

величины $r_{ik} \in R$ ресурсов принимают значения ниже допустимого уровня; T_{II} — временной интервал прогнозирования функционирования и развития совокупности эргасистем.

Условия: любой проект распределения ресурсов допускает полное или частичное (в произвольной доле $\alpha_i \in [0,1]$) распределение ресурсов между различными эргасистемами, причём при долеом распределении ресурсов показатели проекта сохраняются как $\alpha_i r_i$ и $\alpha_i e_i$ соответственно. В этом случае решение формализуется в виде обобщённого вектора $\alpha \in U$, $\alpha = \{\alpha_i | i = \overline{1, m}\}$, $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$, который характе-

ризует общие затраты ресурсов $R(\alpha, W) = \sum_{i=1}^m r_i(\alpha_i, W)$ и глобальную целевую функцию (ГЦФ) $E(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i e_i$ уровня устойчивости функционирования совокупности эргасистем.

Требуется: максимизировать устойчивость (стабильность) функционирования (минимизировать значение ГЦФ) совокупности эргасистем и при этом не допустить снижения эффективности F_i применения каждой эргасистемы и превышения расходования заданного общего количества R^0 ресурсов, т.е. задача имеет вид:

$$\begin{cases} E(\alpha, w_j^*) = \min_{w_j \in W} \\ R(\alpha, w_j^*) \leq R^0; F_i \in \Delta F_i^0, \end{cases}$$

где $W = \{w_j(\psi)\}$, $j = \overline{1, n}$ — множество допустимых стратегий обеспечения ресурсами; ψ — координирующий параметр применения ресурсов; α_i , $i = 1, \dots, m$ — весовой коэффициент; $E = \langle e_1, e_2, \dots, e_m \rangle$ — вектор уровней функциональной устойчивости (локальных целевых функций — ЛЦФ) совокупности эргасистем; ΔF_i^0 — допустимый диапазон значений эффективности применения i -й эргасистемы.

Решение задачи сводится к многоагентному имитационно-игровому поиску оптимальной согласованной стратегии-решения $w^* \in W$ обеспечения (предоставления и координации применения) базисными ресурсами: кадровыми (людские, оргштатные, интеллектуальные, административные), технико-экономическими (средства, технологии, материалы, информация), инфраструктурными (сетевые информационно-распределительные, транспортно-распределительные, энергетическо-распределительные) и дополнительными организационно-правовыми ресурсами, при использовании которой функционирование и развитие совокупности крупномасштабных эргасистем будет устойчивым (стабильным) на интервале прогнозирования при условии обеспечения эффективности целевого применения эргасистем с учётом ограничения на общее количество распределяемых ресурсов.

Многоагентная экспертная информационная система

Обоснованная информационно-функциональная структура (рис. 1) распределённой МЭИС⁷, представляющей собой *информационно-математическую модель* подсистемы управления (координации) функциональной безопасностью (УФБ) эргасистем, предусматривает решение задач ситуационного управления функциональной устойчивостью с использованием *имитационно-игрового подхода*.

Суть подхода заключается в том, что с помощью численных моделей, решающих уравнения динамики развития объекта-прототипа, создается игровая обстановка⁸, в которой оператор-игрок (или лицо, принимающее решения — ЛПР) решает поставленные игровые задачи, используя доступные ему наблюдаемые и управляемые параметры модели. Здесь возможны как односторонние, так и многосторонние (сетевые) игры, когда каждый из игроков решает поставленные перед ним задачи в рамках доступных ему параметров общей разделяемой модели. Ход и результаты игр протоколируются с целью последующего анализа для выработки как конкретных управляющих организационно-технических решений, так и общей стратегии управления объектом-прототипом.

МЭИС включает три функциональных подсистемы: *человеко-машинный интерфейс*, *информационное поле*, а также *алгоритмическое обеспечение*, содержащее *системную часть*, представленную диалоговым монитором, и *функциональную часть*, представленную комплексом специальных моделей, частных методик, алгоритмов и протоколов, обеспечивая единство многоагентного, многоаспектного и многоэтапного процесса управления *функциональной устойчивостью* [12, 14] совокупности крупномасштабных эргасистем.

Основное назначение *диалогового монитора* заключается в рациональной организации технологического процесса ситуационного управления функциональной устойчивостью эргасистем (путём реализации основной процедуры: «постановка и уточнение задачи — многоагентное решение задачи — выработка результирующей согласованной стратегии»), обеспечении информационно-функционального взаимодействия, комплексирования и координации работы всех функциональных компонентов МЭИС, ЛПР, экспертов, когнитологов и операторов-игроков, а также обеспе-

⁷ Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. М. : Мир, 1989. 132 с.; Герман О. В. Введение в теорию экспертных систем и обработку знаний. М. : ДизайнПРО, 1995. 255 с.; Статические и динамические экспертные системы / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель, М.Д. Шапот. М. : Финансы и статистика, 1996. 320 с.

⁸ Карлин С. Математические методы в теории игр, программировании и экономике. М. : Мир, 1994. 838 с.; Грэм Р.Г., Грей К.Ф. Руководство по операционным играм. М. : Сов. радио, 1977. 376 с.; Гермейер Ю. Б. Игры с непротивоположными интересами. М. : Наука, 1976. 328 с.; Мулен Э. Теория игр с примерами из математической экономики. М. : Мир, 1985. 200 с.

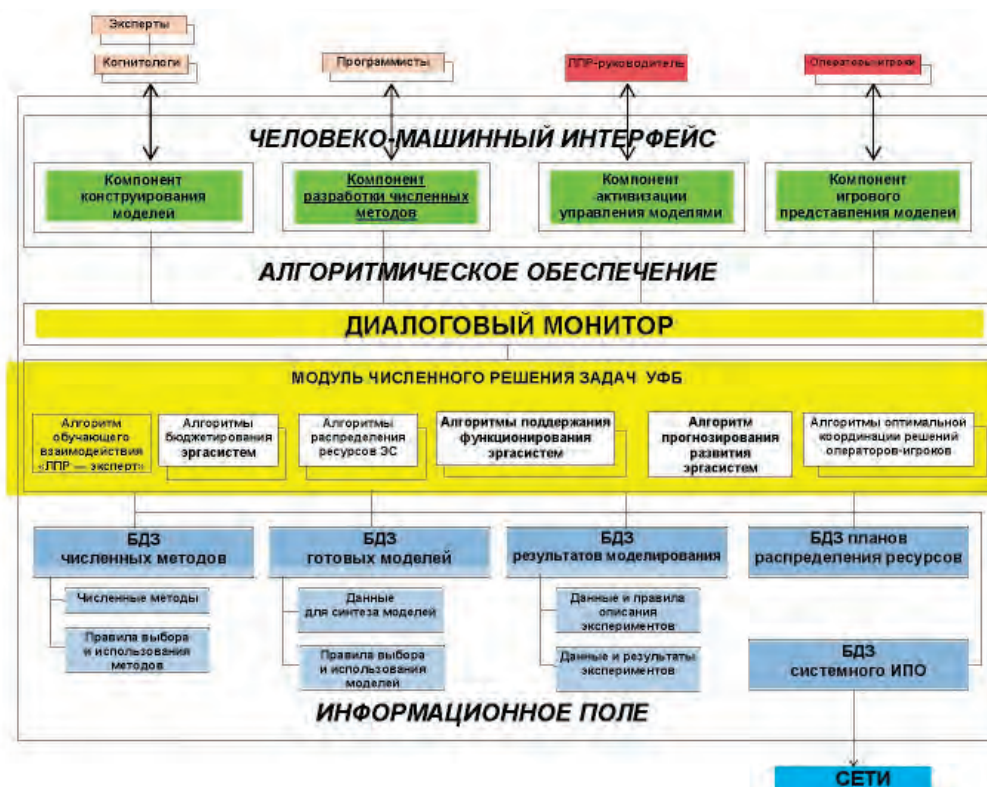


Рис. 1. Информационно-функциональная структура распределённой многоагентной экспертной информационной системы

чении откликов на запросы внешней информационно-вычислительной среды.

Модуль численного решения задач подсистемы УФС эргасистемы включает комплекс соответствующих алгоритмов поддержания функционирования эргасистем, распределения ресурсов эргасистем, бюджетирования эргасистем, прогнозирования развития эргасистем, обучающего взаимодействия «ЛПР (оператор) — эксперт», оптимальной координации управляющих решений операторов-игроков и др.

Моделирование динамики изменения производственного ресурса эргасистемы для задач бюджетирования и прогнозирования

Разработанная [12] частная методика бюджетирования и прогнозирования развития совокупности крупномасштабных эргасистем использует динамическую итерационную процедуру целенаправленного многоагентного поиска рациональной организационно-функциональной стратегии обеспечения базисными ресурсами $X_i(t)$, $Y_i(t)$, $Z_i(t)$, $H_i(t)$, $i = 1, \dots, k$ и принятия согласованных решений⁹ в конкретных условиях обстановки, учитывает специфику отдельных эргасистем, специальные параметры (настроечные коэффициенты, масштабные множители, координационные сигналы и др.) для ситуационной модификации и адаптации

моделей (содержащих «ресурсные накопители» и «производственные переходы» [12—16]) динамики развития эргасистем в системе взаимной безопасности, а также обеспечивает разрешение основных концептуальных противоречий бюджетирования и экспериментальное развитие теории многоагентных стратегических стохастических игр.

Любая эргасистема как *производственная динамическая система* [12], т. е. система, реализующая совокупность материально, энергетически или информационно связанных единичных процессов с потоками «продукции»¹⁰, выполняющую одну или более определенных функций, полностью характеризуется парой функциональных зависимостей: дифференциальным уравнением, описывающим процесс изменения внутреннего состояния системы, и алгебраическим уравнением, отражающим связь текущего внутреннего состояния с состоянием выхода, определяющим целевое назначение системы, т. е. следующими функциональными зависимостями:

«функцией состояния», имеющей две составляющие: $h\{*\}$ — изменения состояния количественной составляющей и $h^0\{*\}$ — изменения состояния качественной составляющей производственного ресурса;

«функцией выхода» $f\{*\}$, которая описывает технологическую процедуру получения целевых результатов производственного функционирования, включая производство (выпуск) специальной продукции (планов,

⁹ Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981. 208 с.

¹⁰ Здесь термин «продукция» включает в себя системы услуг.

методик, технологий, изделий), предоставления информационных услуг, проведения восстановительных (ремонтных) работ и др.

$$F(w^*, T) = \max_{\{w_i\}} \left\{ \eta \int_{t_0}^T G_{\text{он}}(t)/G_{\text{он}}^0 dt + (1 - \eta) \int_{t_0}^T G_{\text{сн}}(t)/G_{\text{сн}}^0 dt \right\},$$

где $\{w_i\}$, $i = 1, \dots, I$ — множество стратегий бюджетирования; $G_{\text{он}}, G_{\text{сн}}$ — значения величины ущерба (репутационного, морального, физического и др.), наносимого конкуренту при применении эргасистем общего назначения и эргасистем специального назначения, соответственно; $G_{\text{он}}^0, G_{\text{сн}}^0$ — требуемые значения; $0 \leq \eta \leq 1$ — коэффициент важности результата целевого применения эргасистем в локальном конфликте по отношению к результату целевого применения эргасистем в крупномасштабном конфликте.

При этом вероятностная динамика изменения состояния количественной составляющей $h\{*\}$ продукционного ресурса r -го типа ($r \in \{X, Y, Z, H\}$), входящего в состав i -й эргасистемы при выполнении ею целевых задач в условиях p -й технологии продукционного функционирования (ТПФ) Φ_p , $p = 1, 2, \dots$, используемой эргасистемой в различных вариантах p обстановки, которая рассматривается как «технология» их целевого применения, описывается стохастической марковской цепью с непрерывным временем¹¹, имеющей инвариантную структуру (рис. 2), в виде соответствующей системы дифференциальных уравнений Колмогорова (без учёта пополнения, модернизации и закупки r -го типа ресурса):

$$dm_1^r(t)/dt = m_1^r(t) \cdot \{[\lambda_{12}^r + \lambda_{13}^r + \lambda_{14}^r + \lambda_{15}^r] + [\mu_{12}^r + \mu_{13}^r + \mu_{14}^r + \mu_{15}^r]\} + m_2^r(t)\beta_{21}^r + m_3^r(t)\beta_{31}^r + m_4^r(t)\beta_{41}^r + m_5^r(t)\delta^r;$$

$$dm_2^r(t)/dt = m_1^r(t) \cdot [\lambda_{12}^r + \mu_{12}^r] - m_2^r(t) \cdot \{[\lambda_{23}^r + \lambda_{24}^r + \lambda_{25}^r] + [\mu_{23}^r + \mu_{24}^r + \mu_{25}^r]\} - m_2^r(t)\beta_{21}^r + m_3^r(t)\beta_{32}^r + m_4^r(t)\beta_{42}^r;$$

$$dm_3^r(t)/dt = m_1^r(t) \cdot [\lambda_{13}^r + \mu_{13}^r] + m_2^r(t) \cdot [\lambda_{23}^r + \mu_{23}^r] - m_3^r(t) \cdot \{[\lambda_{34}^r + \lambda_{35}^r] + [\mu_{34}^r + \mu_{35}^r]\} - m_3^r(t) \cdot [\beta_{31}^r + \beta_{32}^r] + m_4^r(t)\beta_{43}^r;$$

$$dm_4^r(t)/dt = m_1^r(t) \cdot [\lambda_{14}^r + \mu_{14}^r] + m_2^r(t) \cdot [\lambda_{24}^r + \mu_{24}^r] + m_3^r(t) \cdot [\lambda_{34}^r + \mu_{34}^r] - m_4^r(t) \cdot [\lambda_{45}^r + \mu_{45}^r] - m_4^r(t) \cdot [\beta_{41}^r + \beta_{42}^r + \beta_{43}^r];$$

$$dm_5^r(t)/dt = m_1^r(t) \cdot [\lambda_{15}^r + \mu_{15}^r] + m_2^r(t) \cdot [\lambda_{25}^r + \mu_{25}^r] + m_3^r(t) \cdot [\lambda_{35}^r + \mu_{35}^r] - m_4^r(t) \cdot [\lambda_{45}^r + \mu_{45}^r] - m_5^r(t)\zeta^r,$$

где $m_1^r, m_2^r, m_3^r, m_4^r, m_5^r$ — количество ресурсных элементов r -го типа, находящихся соответственно в (1) полностью работоспособном состоянии, (2) незначительно утративших работоспособность (для восстановления требуется мелкий ремонт или амбулаторное лечение для X -ресурса), (3) частично утративших работоспособность (для восстановления требуется средний ремонт или стационарное лечение), (4) значительно утративших работоспособность (для вос-

становления требуется капитальный ремонт или длительное стационарное лечение), (5) полностью утративших работоспособность (требующих утилизации); λ^r, μ^r — интенсивности переходов, определяющие темпы естественной и принудительной количественной деградации ресурсных элементов соответственно; β^r, ζ^r — интенсивности переходов, определяющих темпы принудительного количественного восстановления и темпы утилизации r -го типа ресурса соответственно; $m_1^r(t) + m_2^r(t) + m_3^r(t) + m_4^r(t) + m_5^r(t) = M^r(t)$ — условие нормировки.

Процесс количественных изменений ресурсных элементов r -го типа, входящих в состав i -й эргасистемы при выполнении ими целевых задач в условиях p -й ТПФ Φ_p , представляет собой процедуру их регулярного перераспределения по состояниям физической (технической) работоспособности.

Изменение распределения ресурсных элементов r -го типа по элементам вектора-строки количественных характеристик $M^r(t)$ происходит в результате протекания трех типов процессов: естественной количественной деградации, вызванной старением элементов; принудительной количественной деградации, вызванной действием внешних разрушительных сил (целенаправленного и нецеленаправленного) характера; естественного и принудительного восстановления, связанного с естественными процессами и целенаправленной деятельностью по восстановлению утраченной элементами функциональности (работоспособности).

Процесс естественной количественной деградации ресурсных элементов r -го типа осуществляется через «продукционные переходы» d_{vn}^{pr} модели ($v \neq n$; $v, n = 1, \dots, 5$; $v < n$; см. рис. 2), которые задают интенсивности потока элементов от «ресурсных накопителей» $m_i^r(t)$, $i = 1, \dots, 5$ с меньшим номером v к «накопителям» с большим номером n , вызванных процессом физического износа, характеризуемого интенсивностью отказов λ_{vn}^{pr} . Характер такого изменения зависит от качественных характеристик, оказывающих свое влияние на интенсивность отказов ресурсных элементов r -го типа, входящих в состав i -й эргасистемы, при выполнении ею целевых задач в условиях p -й ТПФ; условий их применения, напряжённости работы, состава задействованных средств и др.

Процесс принудительной количественной деградации ресурсных элементов r -го типа осуществляется через те же «переходы» d_{vn}^{pr} модели (см. рис. 2), которые с интенсивностью μ_{vn}^{pr} (верхний управляющий вход «перехода» d_{vn}^{pr}) осуществляют перемещение ресурсных элементов r -го типа от «накопителя» (верши-

¹¹ Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1980. 564 с.

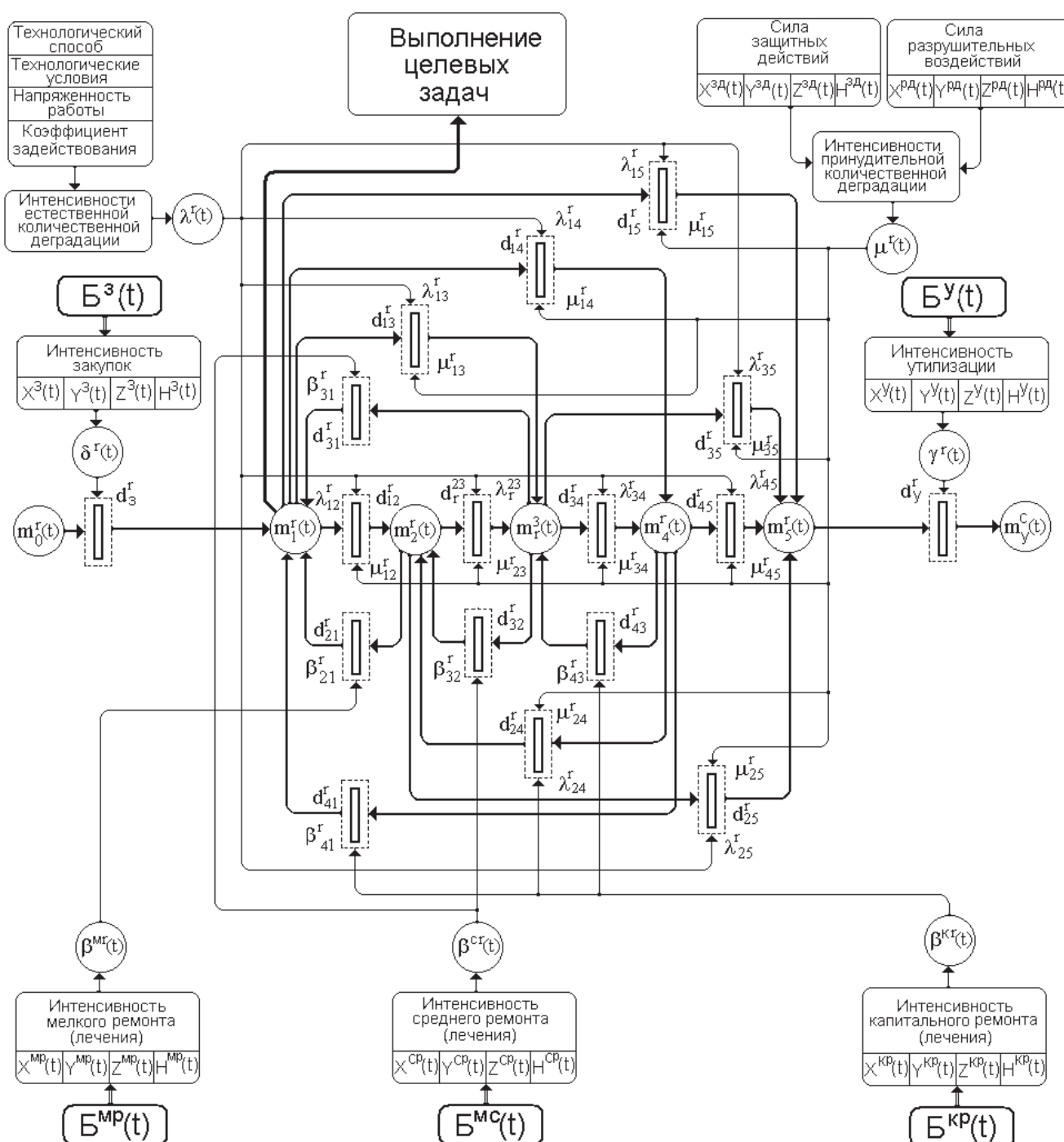


Рис. 2. Функциональная структура модели динамики изменения состояния количественной составляющей производственного ресурса эргосистемы

ны) с номером v к «накопителю» (вершине) с номером n . Характер их изменения зависит от применяемых конкурентом способов ведения специальных (информационных и др.) операций и формируемых ими деструктивных воздействий, а также уровня пассивной и активной защиты.

В рассматриваемой математической модели сделано **предположение**, что интенсивности естественной λ^{pr}_{vn} и принудительной μ^{pr}_{vn} количественной деградации независимы и обладают свойством

аддитивности. Это означает, что переход d^{pr}_{vn} осуществляет процедуру сложения интенсивности естественной λ^{pr}_{vn} и принудительной μ^{pr}_{vn} количественной деградации, т. е. реализует суммарную интенсивность $v^{pr}_{vn} = \lambda^{pr}_{vn} + \mu^{pr}_{vn}$.

Процесс восстановления содержит две составляющие:

- процесс естественного восстановления, характеризуемый интенсивностью β^{pre}_{vn} самовосстановления;

– процесс *принудительного* восстановления, характеризующийся интенсивностью β_{vn}^{prn} принудительного восстановления.

Суммарная интенсивность восстановления ресурсных компонентов r -го типа (см. рис. 2) задается выражением: $\beta_{vr}^{pr} = \beta_{vr}^{pre} + \beta_{vr}^{prn}$. Процесс восстановления задается «переходами» d_{vnr}^{pr} , которые имеют обратную нумерацию и характеризуются интенсивностью β_{vr}^{pr} ($v \neq n, v < n$) восстановления. Интенсивность β_{vr}^{pr} потока восстановления определяется используемым для этого техническим средством, напряженностью работы, технологическими условиями и масштабом задействования сил и средств восстановления.

Считается, что техническое состояние $m_{rs}^{pr}(t)$ является финальным состоянием. Попавшие в него ресурсные элементы рассматриваются как невозвратные потери, которые не подлежат восстановлению и требуют утилизации. При этом величина β_{21}^{pr} соответствует интенсивности мелкого ремонта (амбулаторного лечения и др.), величина β_{3n}^{pr} ($3 > n$) интенсивности среднего ремонта (оказанию лечебных услуг в стационарах), а величина β_{4n}^{pr} ($4 > n$) интенсивности капитального ремонта (высокозатратному лечению в стационаре). Эти интенсивности формируются соответствующими модельными блоками, требующими для своей работы определенных затрат бюджетных средств.

В модели (см. рис. 2) интенсивности закупок δ_{pr}^{pr} и утилизации ζ_{pr}^{pr} формируются модельными блоками «Интенсивность закупок» и «Интенсивность утилизации», которые реализуются «переходами» d_{3z}^{pr} , d_{yz}^{pr} соответственно, для чего также требуются определенные затраты бюджетных средств. Для задания интенсивностей «переходов» можно использовать следующие **допущения**:

1. Интенсивность λ_{kn}^{pr} естественной количественной деградации r -го типа ресурса для i -й эргасистемы в условиях ρ -го ТПФ рассчитывают по формуле:

$$\lambda_{ir}^{pr} = (\lambda_{ir}^{*r} + \Delta\lambda_{ir}^{*pr})P_{ir}^{3p}(t)P_{ir}^{np}(t)P_{ir}^{ni}(t),$$

где λ_{ir}^{*r} — «паспортное» значение интенсивности отказов в нормальных условиях эксплуатации r -го типа ресурса ($\{X, Y, Z, H\}$), входящего в состав i -й эргасистемы, в условиях ТПФ безконфликтного ($\rho = 0$) времени при параметре $P_{ir}^{3p}(t) = 1$ задействования ресурса, параметре $P_{ir}^{np}(t) = 1$ напряженности, параметре $P_{ir}^{ni}(t) = 1$ полного отсутствия износа;

$\Delta\lambda_{ir}^{*pr}$ — поправочный коэффициент, отражающий особенности эксплуатации ресурсных компонентов r -го типа i -й эргасистемы, используемых в условиях ρ -й ТПФ ($\rho \neq 0$), при этом для $\rho = 0$ значение $\Delta\lambda_{ir}^{*0r} = 0$, для $\rho \geq 1$ значение $\Delta\lambda_{ir}^{*pr} > 0$;

$P_{ir}^{3p}(t)$ — параметр *ресурсного задействования*, показывающий, какая часть r -го ресурса привлекается для решения целевых задач, выполняемых в условиях ρ -й ТПФ;

$0 \leq P_{ir}^{3p}(t) \leq 1$, где $P_{ir}^{3p} = 1$ означает, что все имеющиеся ресурсные компоненты используются в операции i -й эргасистемы в полном объеме; $P_{ir}^{3p} = 0$ — ни один ресурсный компонент r -го типа в операции не используется;

$P_{ir}^{np}(t) \geq 0$ — параметр *напряженности* выполнения целевых задач в условиях ρ -й ТПФ ($\rho = 1, 2$);

$P_{ir}^{ni}(t) \geq 1$ — коэффициент *интенсивности* отказов, показывающий зависимость интенсивности отказов от величины физического износа ресурсных компонентов.

2. Вид математической зависимости, описывающей динамику изменения параметра $P_{ir}^{np}(t)$, имеет вид:

$$P_{ir}^{np}(t) = \begin{cases} 1, & \text{на временном интервале } (0, T_{ir}^{*r}); \\ 1 + \theta_{ir}^{*r} [t - T_{ir}^{*r}], & \text{на интервале } t > T_{ir}^{*r}, \end{cases}$$

где T_{ir}^{*r} — гарантийный срок использования r -го ресурса в годах; θ_{ir}^{*r} — скорость роста интенсивности отказов за пределами гарантийного срока.

Алгоритмы координации решений операторов-игроков

Разработанные два алгоритма оптимальной координации управляющих решений операторов-игроков реализуют *регулярные* (для случаев минимальной неопределенности в выборе цели) стратегии поиска *парето-оптимального* [9, 10] решения задачи оптимизации координации локальных решений эргасистем с заданной точностью, учитывают и не ухудшают значения локальных показателей целевой эффективности отдельных эргасистем, обеспечивают итерационное улучшение решения на основе перестройки оператором-игроком (или ЛПР) весовых коэффициентов λ_x , $x = 1, \dots, n$ локальных целевых функций (ЛЦФ) — показателей $F_x = e_x$ и применения человеко-машинного диалога «ЛПР — МЭИС» [10].

Суть алгоритмов поиска парето-оптимального с точностью до ε_0 ($|F_0 - F_0^*| \leq \varepsilon_0$) решения задачи координации заключается в следующем: после завершения каждой итерации α поиска экстремумов всех n локальных целевых функций F_x (путем пошагового задания весовых коэффициентов: $\lambda_x \neq 0$, $\lambda_y = 0$, $y = 1, \dots, n - 1$; $x \neq y$) проверяется выполнение условий $F_x \leq F_x^*$, $x = 1, \dots, n$, и если некоторые из них нарушены, происходит переход к новой итерации $\alpha = \alpha + 1$ поиска, причем в одном алгоритме λ_x принимают ненулевые значения последовательно для всех n' функций, для которых условия нарушены, т. е. на $(\alpha + 1)$ -й итерации $n = n'$, а в другом алгоритме (рис. 4) приравниванием λ_x нулю такие функции исключаются из свертки ГЦФ $F_0 = E(\alpha, e_x)$, $x = 1, \dots, n$ в обратной последовательности, т. е. $n = n - [n' - (j - 1)]$, $j = n'$, $n' - 1, \dots, 2, 1$.

В случае если решение, найденное в результате рассмотренных алгоритмов, является неудовлетворительным по одной или нескольким ЛЦФ (с точки зрения ЛПР), оператор-игрок (ЛПР) осуществляет перестройку весовых коэффициентов в ГЦФ и повторно решает задачу. Эта процедура может повторяться многократно, и для повышения ее эффективности требуется высококвалифицированное применение диалога «ЛПР — МЭИС».

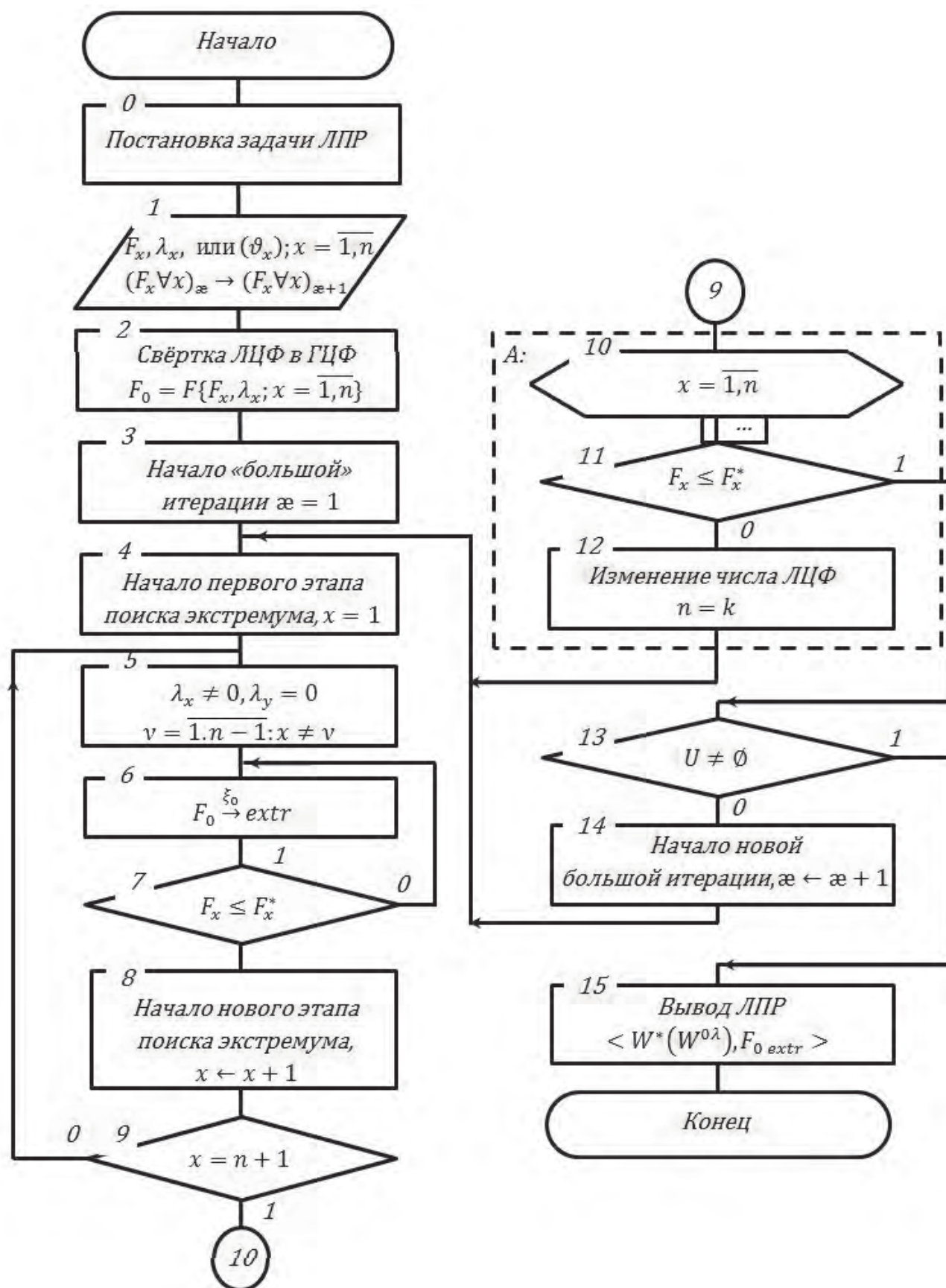


Рис. 3. Схема регулярного алгоритма координации решений операторов-игроков

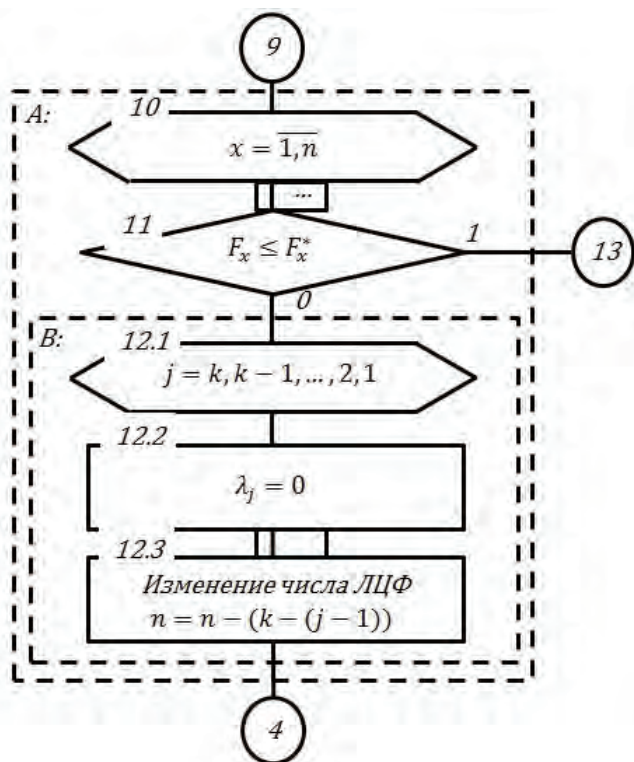


Рис. 4. Фрагмент схемы модифицированного регулярного алгоритма координации решений операторов-игроков

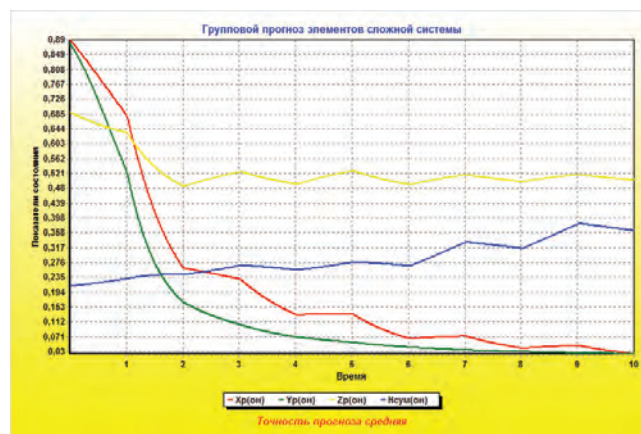
Экспериментальный анализ

Экспериментальный анализ эффективности применения и качества разработанного ИМО проведен в ходе многоагентной стратегической деловой компьютерной игры (МСДКИ) [12] на основе применения специально разработанной АИИМ (как актуализации прототипа — МСВБ) и соответствующей электронной МЭИС в виде базового программного комплекса (БПК) "MEIS-DM" [1], позволяющего имитировать управляемое развитие и функционирование эргасистем (включая управление их функциональной устойчивостью) в масштабированном системном времени с возможностью моделирования¹² случайных факторов.

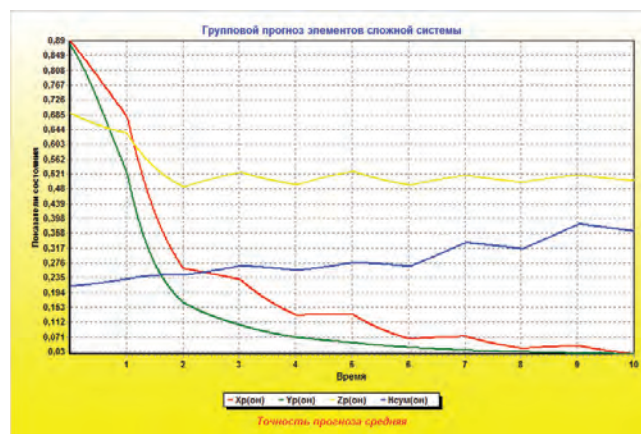
Операционное пространство [7] БПК "MEIS-DM" на основе использования объектно-ориентированных средств программирования *Delphi*, *Visual Basic* включает около 1300 структурных элементов (констант, функциональных зависимостей, интеграторов, дифференцирующих элементов, датчиков случайных чисел, измерителей и др.). На аппаратной платформе с тактовой частотой 850 МГц и оперативной памятью 128 Мбайт модель указанной размерности загружается более 4 часов, время имитационного эксперимента со средней точностью просчета варианта прогноза составляет около 25—30 мин.

¹² Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 399 с.

В примерах решения задач управления проектами¹³ [5, 8, 11, 18] финансово-экономического обеспечения развития эргасистем на интервале $T \geq 10$ лет в условиях изменяющихся военно-политической и социально-экономической обстановки проведено сравнительное исследование альтернативных *антитетичных* стратегий w_i , $i = 1, 2$ бюджетирования, ориентированных, в частности, на приоритет поддержания текущего функционирования эргасистем (w_1) или на приоритет поддержания НИОКР по перспективному развитию эргасистем (w_2).



а)



б)

Рис. 5. Прогноз изменения ресурсных компонентов эргасистем для стратегии приоритетного поддержания текущего функционирования

В частности, на рис. 5а показан характер изменения четырех ресурсных компонентов эргасистем общего назначения (ЭОН): $X_{\text{ОН}}(t)$, $Y_{\text{ОН}}(t)$, $Z_{\text{ОН}}(t)$, $H_{\text{ОН}}(t)$. Из трех первых (материальных) ресурсных компонентов ЭОН самый высокий темп деградации с учетом возможности частичного восстановления имеет Y-ресурс. Несколько меньшим темпом деградации обладает X-ресурс. Практически не деградирует за рассматриваемые 10 лет Z-ресурс. Постоянным,

¹³ Управление проектами : справочное пособие / Под ред. И.И. Мазура, В.Д. Шапиро. М.: Высш. шк., 2001. 875 с.

хотя и временным ростом (снижение начинается после $T = 10$ лет) характеризуется изменение H -ресурса. Колебательный характер всех кривых определяется сменой ТПФ $\Phi_{1(он)}$ (технология времени соперничества) и $\Phi_{2(он)}$ (технология времени сотрудничества) применения ЭОН. При этом высокая напряженность применения ЭОН по технологии $\Phi_{2(он)}$ (целевая учеба) позволяет обеспечить частичную компенсацию снижения уровня H -ресурса, вызванного применением ЭОН не по целевому назначению.

На рис. 5б приведен характер изменения четырех ресурсных компонентов эргасистем специального назначения (ЭСН): $X_{сн}(t)$, $Y_{сн}(t)$, $Z_{сн}(t)$, $H_{сн}(t)$. Из всех ресурсных компонентов самый высокий темп деградации с учетом возможности его частичного восстановления имеет уже X -ресурс. Несколько меньшим темпом деградации обладает Y -ресурс. И, как в случае с ЭОН, слабо деградирует за рассматриваемые 10 лет Z -ресурс. Постоянным, хотя и временным ростом (снижение начинается после $T = 10$ лет, что может быть связано с полной заменой опытного управленческого персонала на персонал, не обладающий необходимым опытом) характеризуется также и H -ресурс ЭСН.

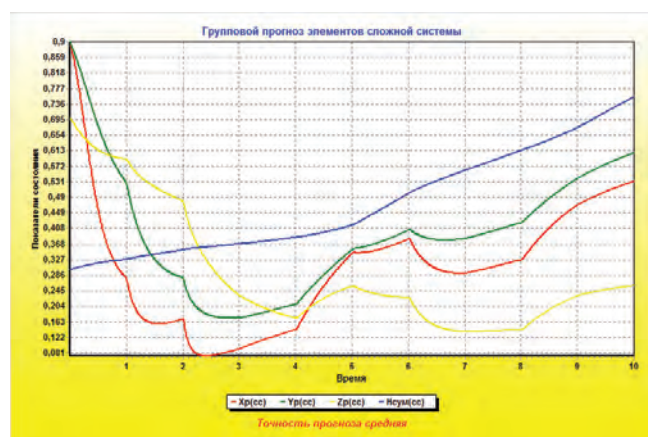
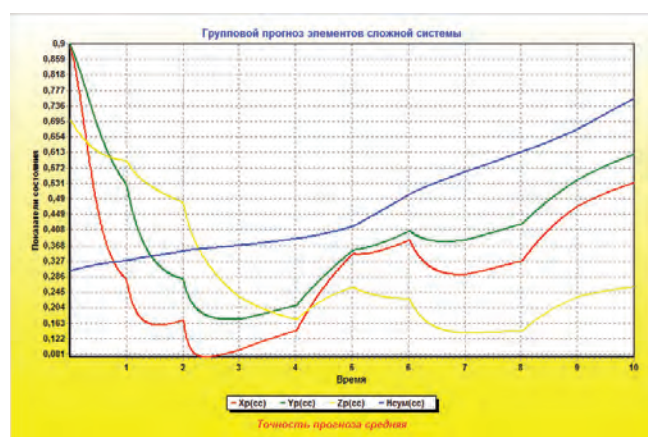


Рис. 6. Прогноз изменения ресурсных компонентов эргасистем для стратегии приоритетного поддержания НИОКР

Из рис. 6а следует, что, несмотря на обвальный характер деградации на начальном этапе двух основных ресурсных составляющих ЭОН: X -ресурса (самое глубокое падение уровня) и Y -ресурса, через 2 года начинается уверенный рост их уровней, чему способствует то, что, во-первых, на третьем интервале (согласно исходным данным) ЭОН не применяются по своему целевому назначению, и, во-вторых, дополнительно происходит общий рост финансирования оборонной сферы.

Из рис. 6б следует, что более низкий объем финансирования поддержания функционирования ЭСН в большей степени, чем для первой стратегии, оказывает влияние на уровень деградации их X -ресурса на начальной стадии. С более высоким темпом в сравнении с первыми вариантами бюджетирования деградирует и Y -ресурс ЭСН. Значительно большим темпом деградации характеризуется также и Z -ресурс. Ориентировочно через три года промышленность способна начать наращивание ресурсных компонентов, при этом Y - и Z -компоненты как наиболее капиталоемкие сферы наращиваются значительно медленнее других.

Заключение

Таким образом, рассмотрена актуальная научная задача разработки информационно-математического обеспечения имитационно-игрового моделирования функционирования и развития совокупности крупномасштабных эргасистем в различных условиях военно-политической и социально-экономической обстановки с целью повышения устойчивости их функционирования и развития (функциональной устойчивости). На основе системного анализа известной концептуально-логической комплексной МСВБ совокупности крупномасштабных эргасистем предложена рациональная для исследуемой научной задачи форма компьютерной игры — проблемно-ориентированная МСДКИ.

Рассмотрены разработанные научно-методические положения ИМО имитационно-игрового моделирования функционирования и развития совокупности крупномасштабных эргасистем в различных условиях обстановки, в частности:

- математическая модель динамики изменения состояния количественной составляющей продукционного ресурса эргасистемы как развивающейся *продукционной динамической системы*, учитывающей существенные свойства (*сложность, динамичность, многофункциональность, активность*) эргасистемы, количественные параметры ее основных ресурсных компонентов, применяемые технологии продукционного функционирования и обеспечивающей (с помощью теории управления динамическими системами)¹⁴,

¹⁴ Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. М. : Наука, 1975. 528 с.; Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М. : Синтез, 1999. 125 с.; Мессарович М.,

формализма языка сетей Петри и математической экономики¹⁵) формально-логическое обоснование особенностей (*многомодельности, многоуровневости, стохастичности*) представления эргасистемы в изменяющейся внешней среде;

- информационно-функциональная структура МЭИС, содержащая системную часть, представленную диалоговым монитором, и функциональную часть, представленную комплексом специальных моделей, частных методик, алгоритмов и протоколов, представляющей собой *информационно-математическую модель* подсистемы ситуационного управления (координации) функциональной безопасностью эргасистем, обеспечивающей единство многоагентного, многоаспектного и многоэтапного процесса управления функциональной устойчивостью совокупности эргасистем.

Рассмотрены основные элементы разработанной частной методики бюджетирования и прогнозирования состояния эргасистем, использующей динамическую итерационную процедуру целенаправленного многоагентного поиска рациональной стратегии обеспечения базисными ресурсами и принятия эффективных согласованных решений в конкретных условиях обстановки, учитывающей специфику отдельных эргасистем, специальные параметры для ситуационной модификации и адаптации моделей динамики развития эргасистем в системе взаимной безопасности, а также обеспечивающей разрешение основных концептуальных противоречий бюджетирования и эксперимен-

тальное развитие *теории многоагентных стратегических стохастических игр*.

На основе экспериментального анализа эффективности применения и качества разработанного ИМО (информационно-программного обеспечения — ИПО) с обоснованными требованиями получены количественные экспериментальные оценки эффективности его применения при прогнозировании развития и бюджетировании эргасистем и оценки качества (*машинной реализуемости, точности, устойчивости и ресурсоёмкости* [9]), а также обоснованы рекомендации по его практическому применению. ИПО обеспечивает долгосрочные (10—15 лет) и иные прогнозы устойчивого функционирования и развития эргасистем с учетом прогнозируемой военно-политической и социально-экономической обстановки на основе многоагентного исследования и решения *прикладных задач*¹⁶ ситуационного управления функциональной устойчивостью эргасистем. Общий выигрыш в целевой эффективности (*устойчивость функционирования*) составляет в среднем 20—25%, а в технологической (*оперативность и точность* распределения ресурсов) — 25—35%.

Разработанный Базовый программный комплекс имитационно-игрового моделирования можно использовать в качестве примера *минимальной* реализации ИПО, необходимого для разработки и исследования многополярных многоуровневых АИИМ реальных развивающихся эргасистем. Применение принципов объектно-ориентированного программирования¹⁷ при создании ИПО имитационно-игрового моделирования позволяет создавать программы с «прозрачной», легко расширяемой и сопровождаемой структурой.

Мако Д., Такахара Т. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.; Hofbauer J., Sigmund K. The Theory Evolution and Dynamical Systems // Cambridge University Press. 1988.

¹⁵ Багриновский К.А., Бусыгин В.П. Математика плановых решений. М.: Наука, 1980. 224 с.

¹⁶ Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.

¹⁷ Дункан Р. Инкапсуляция данных и наследование свойств в Си++ // PC Magazine /USSR/. 1991. № 3; Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения. М.: Конкорд, 1992. 519 с.

Рецензент: **Омельченко Виктор Валентинович**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, советник секретариата научно-технического совета ВПК «НПО Машиностроения», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: omvv@yandex.ru

Литература

1. Базовый программный комплекс имитационно-игрового моделирования «БПК MEIS-DM»: свидетельство № 2013615257 РФ / Д.А. Ловцов, Н.А. Сергеев, В.Н. Гаврилов, А.Б. Ермолаева (РФ). № 2013613471/09; заяв. 26.04.13; зарег. 03.06.13.
2. Герасимов Б.Н. Игровое моделирование управленческих процессов в организациях // Менеджмент и бизнес-администрирование. 2017. № 2. С. 33—40.
3. Герасимов Б.Н., Рубцова М.Н. Экономическая устойчивость в деятельности предприятий // Вестник Оренбургского гос. ун-та. 2006. № 8 (58). С. 108—111.
4. Карлик А.Е., Растова Ю.И. Имитационные игры как исследовательский инструмент, обучающие стратегии и образовательная методология // Известия СПбГЭУ. 2015. № 3 (93). С. 159—162.
5. Каталевский Д.Ю., Сулов С.А. Имитационное моделирование в управлении сложными проектами // Проблемы теории и практики управления. 2022. № 2. С. 101—115.

6. Крюков М.М. Эколого-экономическое игровое имитационное моделирование: методический аспект. М. : ТЕИС, 2006. 236 с. ISBN 5-7218-0886-1.
7. Крюков М.М. Параметрическое пространство эколого-экономической имитационной игры // Государственное управление. Электронный вестник. 2008. № 16. 4 с.
8. Лапыгин Ю.Н. Управление проектами: от планирования до оценки эффективности. М. : Омега, 2008. 252 с.
9. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем. Тезаурус : монография. М. : Наука, 2005. 248 с. ISBN 5-02-033779-X.
10. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем : монография. М. : РГУП, 2021. 314 с. ISBN 978-5-93916-887-8.
11. Ловцов Д.А., Богданова М.В. Информационно-статистические показатели качества проектных инвестиций // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 2000. № 12. С. 28—34.
12. Ловцов Д.А., Сергеев Н.А. Управление безопасностью эргасистем. М. : РАУ — Университет, 2001. 224 с.
13. Ловцов Д.А., Сергеев Н.А. Имитационно-игровое моделирование функционирования и прогнозирования развития крупномасштабных эргасистем // Труды V Междунар. науч.-прак. конф. «Трансформация национальной социально-экономической системы России» (2 декабря 2022 г.) / РГУП. М. : РГУП, 2023. С. 495—502.
14. Ловцов Д.А., Сергеев Н.А. Ситуационное управление устойчивостью функционирования и прогнозирования развития крупномасштабных эргасистем // Труды IV Междунар. науч.-прак. конф. «Трансформация национальной социально-экономической системы России» (22 ноября 2021 г.) / РГУП. М. : РГУП, 2022. С. 367—373.
15. Ловцов Д.А., Сергеев Н.А. Математическое моделирование динамики взаимозависимого социально-экономического развития ансамбля эргасистем // Тр. III Междунар. науч.-прак. конф. «Трансформация национальной социально-экономической системы России» (4 декабря 2020 г.) / РГУП. М. : РГУП, 2021. С. 284—290.
16. Ловцов Д.А., Сергеев Н.А. Математическое моделирование динамики автономного социально-экономического развития и производственного функционирования эргасистем // Труды Всеросс. науч.-прак. конф. «Проблемы российской экономики на современном этапе» (12 апреля 2019 г.) / РГУП. М. : РГУП, 2020. С. 423—434.
17. Манюшис А.Ю., Бобылев С.Н., Кавтарадзе Д.Н., Цедилин А.Н. Экосистема устойчивого развития: глобальный вызов и стратегический тренд XXI столетия // Научные труды ВЭО России. 2022. № 3. С. 315—336.
18. Хелдман К. Профессиональное управление проектами. М. : Бином, 2005. 517 с.
19. Camerer C.F. Behavioral Game Theory. Experiments in Strategic Interaction // Princeton University Press. 2003.
20. Gintis H. Game Theory Evolving. Experiments in Strategic Interaction // Princeton University Press. 2003.
21. Kaniovsky Y.M., Kruazhinskii A.V., Young H.P. Adaptive Dynamics in Games Played by Heterogeneous Populations // Games and Economic Behavior. 2000. Vol. 31. Pp. 50—96.

INFORMATION AND MATHEMATICAL SUPPORT FOR SITUATIONAL CONTROL OF ERGASYSTEMS FUNCTIONAL STABILITY

Dmitrii Lovtsov, Dr.Sc. (Technology), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Deputy Director for Research of the Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Information Technology Law, Informatics and Mathematics of the Russian State University of Justice, Moscow, Russian Federation.
E-mail: dal-1206@mail.ru

Nikolai Sergeev, Senior Lecturer at the Department of Mathematical Methods for Ensuring Security of Systems at the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation.
E-mail: niko-serg@yandex.ru

Keywords: *ergasystem, basic resources, functional stability, situational control, information and mathematical support (IMS), imitation and game simulation, multi-agent expert information system (MEIS), model, production dynamic system, production functioning technology, methodology, strategy, multi-agent strategic control computer game, coordination.*

Abstract

Purpose of the paper: improving the research and methodological basis of the theory of multi-agent strategy stochastic games.

Methods used: system analysis, conceptual logic and mathematical modelling, formal logical development and justification of algorithms and methodologies for situation control.

Study findings: research and methodological provisions are worked out for information and mathematical support (IMS) for imitation and game simulation of functioning and development of large-scale ergasystems including a mathematical model (using the Petri net formalism) for the dynamics of changes in the state of the quantitative component of the production resource of the ergasystem as a developing dynamic production system as well as of the information and functional structure of the multi-agent expert information system (MEIS) being an information and mathematical model of the subsystem for situational control (coordination) of functional security of ergasystems. A special methodology is developed for budgeting and forecasting the ergasystem state using a dynamic iteration procedure of task-oriented multi-agent search for a rational strategy for providing the basic resources and making efficient decisions. Results of an experimental imitation and game analysis are given.

References

1. Bazovyi programmnyi kompleks imitatsionno-igrovogo modelirovaniia "BPK MEIS-DM": svidetel'stvo No. 2013615257 RF. D.A. Lovtsov, N.A. Sergeev, V.N. Gavrilov, A.B. Ermolaeva (RF). No. 2013613471/09; zaia. 26.04.13; zareg. 03.06.13.
2. Gerasimov B.N. Igrovoe modelirovanie upravlencheskikh protsessov v organizatsiakh. Menedzhment i biznes-administrirovanie, 2017, No. 2, pp. 33–40.
3. Gerasimov B.N., Rubtsova M.N. Ekonomicheskaya ustoichivost' v deiatel'nosti predpriatii. Vestnik Orenburgskogo gos. un-ta, 2006, No. 8 (58), pp. 108–111.
4. Karlik A.E., Rastova Iu.I. Imitatsionnye igry kak issledovatel'skii instrument, obuchaiushchie strategii i obrazovatel'naia metodologiya. Izvestiya SPbGEU, 2015, No. 3 (93), pp. 159–162.
5. Katalevskii D.Iu., Suslov S.A. Imitatsionnoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi proektami. Problemy teorii i praktiki upravleniya, 2022, No. 2, pp. 101–115.
6. Kriukov M.M. Ekologo-ekonomicheskoe igrovoe imitatsionnoe modelirovanie: metodicheskii aspekt. M.: TEIS, 2006. 236 pp. ISBN 5-7218-0886-1.
7. Kriukov M.M. Parametricheskoe prostranstvo ekologo-ekonomicheskoi imitatsionnoi igry. Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyi vestnik, 2008, No. 16. 4 pp.
8. Lapygin Iu.N. Upravlenie proektami: ot planirovaniia do otsenki effektivnosti. M.: Omega, 2008. 252 pp.
9. Lovtsov D.A. Informatsionnaya teoriya ergasistem. Tezaurus: monografiya. M.: Nauka, 2005. 248 c. ISBN 5-02-033779-X.
10. Lovtsov D.A. Informatsionnaya teoriya ergasistem: monografiya. M.: RGUP, 2021. 314 pp. ISBN 978-5-93916-887-8.
11. Lovtsov D.A., Bogdanova M.V. Informatsionno-statisticheskie pokazateli kachestva proektnykh investitsii. NTI, ser. 2: Inform. protsessy i sistemy, 2000, No. 12, pp. 28–34.
12. Lovtsov D.A., Sergeev N.A. Upravlenie bezopasnost'yu ergasistem. M.: RAU – Universitet, 2001. 224 c.
13. Lovtsov D.A., Sergeev N.A. Imitatsionno-igrovoe modelirovanie funktsionirovaniia i prognozirovaniia razvitiia krupnomasshtabnykh ergasistem. Trudy V Mezhdunar. nauch.-prak. konf. "Transformatsiya natsional'noi sotsial'no-ekonomicheskoi sistemy Rossii" (2 dekabria 2022 g.). RGUP. M.: RGUP, 2023, pp. 495–502.
14. Lovtsov D.A., Sergeev N.A. Situatsionnoe upravlenie ustoichivost'yu funktsionirovaniia i prognozirovaniia razvitiia krupnomasshtabnykh ergasistem. Trudy IV Mezhdunar. nauch.-prak. konf. "Transformatsiya natsional'noi sotsial'no-ekonomicheskoi sistemy Rossii" (22 noiabria 2021 g.). RGUP. M.: RGUP, 2022, pp. 367–373.
15. Lovtsov D.A., Sergeev N.A. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki vzaimozavisimogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiia ansambliya ergasistem. Tr. III Mezhdunar. nauch.-prak. konf. "Transformatsiya natsional'noi sotsial'no-ekonomicheskoi sistemy Rossii" (4 dekabria 2020 g.). RGUP. M.: RGUP, 2021, pp. 284–290.
16. Lovtsov D.A., Sergeev N.A. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki avtonomnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiia i produktsionnogo funktsionirovaniia ergasistem. Trudy Vseross. nauch.-prak. konf. "Problemy rossiiskoi ekonomiki na sovremennom etape" (12 aprelya 2019 g.). RGUP. M.: RGUP, 2020, pp. 423–434.
17. Maniushis A.Iu., Bobylev S.N., Kavtaradze D.N., Tsedilin A.N. Ekosistema ustoichivogo razvitiia: global'nyi vyzov i strategicheskii trend XXI stoletia. Nauchnye trudy VEO Rossii, 2022, No. 3, pp. 315–336.
18. Kheldman K. Professional'noe upravlenie proektami. M.: Binom, 2005. 517 pp.
19. Camerer C.F. Behavioral Game Theory. Experiments in Strategic Interaction. Princeton University Press, 2003.
20. Gintis H. Game Theory Evolving. Experiments in Strategic Interaction. Princeton University Press, 2003.
21. Kaniovsky Y.M., Kruazhinskii A.V., Young H.P. Adaptive Dynamics in Games Played by Heterogeneous Populations. Games and Economic Behavior, 2000. Vol. 31. Pp. 50–96.