

УДК 004.94

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ САМОВОСПРОИЗВОДСТВОМ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕКТОРА УПРАВЛЕНИЯ

Берг Дмитрий Борисович, доктор физико-математических наук, профессор ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Зверева Ольга Михайловна, старший преподаватель ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Аннотация

Целью данного исследования явилось определение типов управления, обеспечивающих самовоспроизводство системы. Теоретической основой исследования явились концепции кибернетики второго порядка, а методологической основой – методология структурного анализа (SNA-методология) и агент-ориентированное моделирование. В условиях кризиса мейнстрима экономической теории такой подход – сочетание метатеории и новых информационных технологий показывает одно из возможных решений проблемы. В работе перечислены возможные типы управления и кратко описаны их практические реализации. Созданный комплекс агент-ориентированных моделей подтвердил возможность поддержания самовоспроизводства системы в заданных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кибернетика, самовоспроизводство, системный анализ, агент-ориентированное моделирование, SNA-методология.

CYBERNETICS APPROACH USAGE FOR ECONOMIC SYSTEM MANAGEMENT: PROGRAM FORMULATION AND CONTROL VECTOR ENGINEERING

Berg Dmitry Borisovich, Doctor of Physics and Mathematics, professor at Ural Federal University

Zvereva Olga Mikhailovna, senior lecturer at Ural Federal University

Abstract

The main goal of this research is to determine types of control which support system self-production. The second order cybernetics concepts have built a research theoretical foundation and SNA-methodology and agent-based modeling have proved to be its methodological basis. Under condition of economics mainstream crisis, an approach that combines meta-theory with new information technologies shows one of the possible solutions. Possible control types and their practical realizations are under discussion in this paper. The engineered set of agent-based models has confirmed the self-production possibility under certain conditions.

KEYWORDS: cybernetics, self-production, system analysis, agent-based modeling, SNA-methodology.

Введение

В экономической науке (economics) наблюдается кризис того, что обычно на английском языке называется «mainstream», а на русский язык дословно переводится как «основное течение»: имеются в виду теории и методологии, которые поддерживаются большинством представителей этой научной области. Такое кризисное состояние осознается самими экономистами. В качестве подтверждения этого тезиса приведем названия двух

известных работ: нобелевский лауреат Поль Кругман назвал свое эссе «Как это экономисты так ошиблись? Приняв красоту за истину» [14], а Ольсевич свою книгу - «Современный кризис «мейнстрима» в оценках его представителей (предварительный анализ)» [8].

В чем суть этого кризиса? Полтерович В.М. определяет кризис в определенной научной области следующим образом: «Состояние теории я называю кризисным, если доказано или весьма правдоподобно, что поставленные ею основные задачи не могут быть решены принятыми в теории методами..., происходит накопление ... фактов, свидетельствующих о принципиальной ограниченности ее методов» [9].

Может быть, выход следует искать в использовании выводов более общих наук (мета-теорий), адаптируя их для экономического домена. В частности, для решения проблем управления было бы целесообразно использовать концепции и методы кибернетики, которая является «наукой об управлении и связи в животном и машине» [1].

Кибернетика как наука об управлении

Термин «кибернетика» был предложен Н. Винером в 1948 г. Классиками первого этапа развития кибернетики, помимо Н. Винера, являются У. Эшби и С. Бир, сделавшие акценты, соответственно, на биологических и экономических ее аспектах.

В классической кибернетике (кибернетике первого порядка) основное внимание уделяется объекту управления, при этом изучается не сам объект и его структура, а его поведение. Для объекта управления вводится абстракция «черный ящик». Эшби писал: «Кибернетика изучает не предмет, а поведение. Она задает вопрос не «Что представляет собой объект?», а «Что делает объект?» [10].

Под регулированием, которым в основном занимается кибернетика первого порядка, понимается целенаправленное стремление изменить поведение системы. Основным для кибернетики первого порядка можно считать закон необходимого разнообразия, сформулированный Эшби: «Неотъемлемым признаком хорошего регулятора является то, что он блокирует поток разнообразия, инициируемый возмущениями и воздействующий на существенные переменные» [10].

Кибернетика первого порядка изучает тривиальные машины, в которых состояния выходов системы определяются состояниями ее входов. Большинство же систем, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни – это нетривиальные машины. Выход нетривиальной машины зачастую определяется внутренним состоянием, недоступным наблюдению, и не является реакцией на входной стимул. Это свойство определяется как *операциональная замкнутость*. Система воспринимает и усиливает что-то незначимое с точки зрения

внешнего наблюдателя и игнорирует то, что он считает входным сигналом, проявляет внутреннюю детерминацию, следует собственным законам.

Теорема замкнутости, являющаяся основной для кибернетики второго порядка, учитывает операциональную замкнутость систем процессов и утверждает, что «в каждой операционально замкнутой системе возникает собственное поведение». Если это поведение состоит в циклическом повторении ее основных производственных процессов (и вспомогательных коммуникационных процессов, создающих условия для нормального протекания производственных процессов), то имеет место самовоспроизводство экономической системы.

Необходимо отметить, что, в отличие от классической кибернетики, кибернетика второго порядка носит концептуально-философский характер [7]. Речь идет не о регулирующем воздействии, а о создании системы правил, по которым действуют субъект и объект управления.

В настоящее время наряду с общей кибернетикой выделяют специальные (отраслевые кибернетики): техническую, медицинскую и биологическую (в том числе: эволюционную кибернетику, кибернетику в психологии), *экономическую*, физическую, социальную, квантовую (управление квантовыми системами, квантовые вычисления), космическую и т.д. [7].

Экономическая кибернетика – научное направление, занимающееся исследованием и совершенствованием экономических систем на основе положений общей теории кибернетики. Сочетает в себе математику и кибернетику с экономикой. Впервые термин появился в начале шестидесятых годов прошлого века в трудах В.С. Немчинова, О. Ланге, Х. Грневского, С. Вира.

Решение задач управления экономическими системами в данном исследовании проводилось в рамках направления экономической кибернетики, при этом использовались положения кибернетики второго порядка: система – не черный ящик, структура и ее предыдущие состояния становятся основой для разработки управляющих воздействий (правил, устанавливаемых в системе). Для структурного анализа системы предлагается использовать SNA-методологию (SNA – Social Network Analysis), а для изучения поведения системы был разработан комплекс программных агент-ориентированных моделей.

Постановка задачи управления экономической системой

Постановка задачи управления должна содержать описание: объекта управления, субъекта управления, целей управления, параметров и критериев управления.

Рассмотрим объект управления как систему S , которая имеет следующие характеристики:

- состоит из N агентов (Ag_i);
- агенты вступают в коммуникативные отношения друг с другом (коммуникации), образуя сеть коммуникационных процессов;
- структура сети определяется матрицей связей ($W_{N \times N}$);
- каждый агент имеет набор характеристик (\vec{c} – вектор характеристик агента);
- система открытая, необходимо учесть взаимодействие с внешней средой (\vec{f} – вектор взаимодействия с внешней средой);
- система имеет цель Z_S .

В общем случае состояние системы в момент времени t можно определить следующим образом:

$$S(t) = \langle \{Ag_i(\vec{c}(t))\}_{i=1}^N, W_{N \times N}(t), \vec{f}(t), Z_S \rangle \quad (1)$$

Цель экономической системы является предметом дискуссии. Одно из основных предположений (по крайней мере, поддерживаемое мейнстримом экономической теории), что она образуется из целей составляющих ее агентов, каждый из которых стремится к максимизации своей целевой функции (максимизации прибыли), но существует и другое мнение.

В 2002 г. Нобелевскую премию по экономике получил профессор Принстонского университета Д. Канеман за исследования механизмов принятия решений индивидуумом в условиях неопределенности и риска. Оказалось, что эти решения не всегда так рациональны, как хотелось бы большинству экономистов. Основной тезис теории перспектив Канемана-Тверски состоит в том, что люди нерациональны при оценке вероятностей возможных альтернатив [4], т.к. принимают решения на основании ограниченного объема информации, которая к тому же во многом недостоверна.

Дутта и Раднер также математически доказали, что в неопределенном мире правила поведения фирмы, максимизирующие вероятность ее долгосрочного выживания, не совпадают с теми, которые максимизируют ее прибыль [12].

В данном исследовании предполагается, что целью системы следует считать поддержание своей жизнеспособности. Жизнеспособность экономической системы обеспечивается самовоспроизводством составляющих ее процессов и, согласно теории эволюционной экономики [5], – приспособляемостью к внешней среде, которая выражается в стремлении к эффективному функционированию.

Дополнительно о системе можно сообщить следующее:

- экономические агенты имеют определенные стратегии поведения; стратегия определяет порядок и правила взаимодействия агента с контрагентами; стратегия принадлежит конечному множеству возможных поведений, мощность множества стратегий в исследовании 5: ($STR = \{str_j\}_{j=1}^5$).
- экономические агенты имеют производственные характеристики: объем выпуска, вектор потребностей в ресурсах, свободный остаток и деньги на счету;
- матрица связей агентов представлена матрицей взаимных платежей;
- взаимодействие с внешней средой реализовано через ввод в систему агентов типа Внешняя среда (агентов внешней среды) и отражено в матрице связей (взаимных платежей).

Для экономических систем характерен материальный обмен (он рассматривается как экономическая коммуникация): один из агентов (производитель) передает товар и получает деньги за этот товар от контрагента. В системе устанавливается коэффициент обеспечения деньгами (K). Денежные средства размещаются на счетах агентов (у i -го агента на счету находится m_i у.е.) и пропорциональны произведенному агентом продукту (коэффициент пропорциональности K). В целом в системе объем денежных средств – $M = \sum_{i=1}^N m_i$ (у.е.).

Каждый экономический агент Ag_i производит уникальный продукт в объеме x_i , для этого он потребляет продукты, произведенные другими агентами в объеме, определяемом вектором потребностей в ресурсах (соответствующий агенту столбец матрицы связей) $\vec{w}_i = [w_{1i}, w_{2i}, \dots, w_{ii}, \dots, w_{Ni}]$, оставляя для непромышленного потребления продукта в объеме y_i .

Вектор характеристик i -го экономического агента в произвольный момент времени (t) определяется как:

$$\vec{c}_i(t) = \langle str_j, x_i(t), y_i(t), \vec{w}_i(t), m_i(t) \rangle \quad (2)$$

Состояние экономической системы в целом, основываясь на (1) и учитывая (2):

$$s(t) = \langle \left\{ Ag_i \left(str_j, x_i(t), y_i(t), \vec{w}_i(t), m_i(t) \right) \right\}_{i=1}^N, W_{NxN}(t), \vec{f}(t), Z_S \rangle \quad (3)$$

В соответствии с гипотезой «эффективного рынка» каждый агент обладает полной и достоверной информацией о состояниях других агентов, поэтому нет дополнительных параметров, определяющих информированность агента.

Если рассматривать макропараметры системы, то ее состояние в момент времени t определяется через: вектор-константу стратегий агентов в системе $\overline{STR} = [str_1, str_2, \dots, str_N]$, вектор объемов выпуска агентов ($\vec{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]$), вектор свободных остатков

$(\vec{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)])$, матрицу связей ($W = [\vec{w}_1(t), \vec{w}_2(t), \dots, \vec{w}_N(t)]$ объем денежных средств, зачисленных на счета агентов, ($\vec{M} = [m_1, m_2, \dots, m_N]$), и может быть записано в виде:

$$s(t) = \langle \overline{STR}, \vec{X}(t), \vec{Y}(t), W_{N \times N}(t), \vec{M}(t), \vec{f}(t), Z_S \rangle \quad (4)$$

На основании матрицы связей может быть получена нормированная матрица A (нормирование производится на единицу продукции агентов).

Для поддержания воспроизводства в системе функционирование агентов происходит в условиях баланса, который в экономической системе соответствует межотраслевому балансу Леонтьева:

$$\vec{X}(t_0) - A\vec{X}(t_0) = \vec{Y}(t_0) \quad (5)$$

В общем случае при управлении системой вектор состояния системы ($\vec{s}(t)$) есть функция от вектора управления ($\vec{u}(t)$), вектора воздействий внешней среды ($\vec{f}(t)$) и от состояния системы ($\vec{s}(t_0)$) в начальный момент времени. Состояние системы в зависимости от управляющих воздействий в момент времени t может быть записано следующим образом:

$$\vec{s}(t) = F(\vec{u}(t), \vec{f}(t), \vec{s}(t_0)) \quad (6)$$

Задача управления состоит в том, чтобы подобрать параметры управления и их значения, позволяющие оптимизировать обеспечивающий ресурсами коммуникационный процесс, при одновременном поддержании самовоспроизводства.

Критериями управления являются:

- длительность коммуникационного процесса (T_c) – время от начала коммуникаций до момента полного обеспечения всех агентов необходимыми ресурсами, или, если система не сбалансирована, момента не возможности дальнейших коммуникаций;
- вариативность коммуникационного процесса, измеряемая как стандартное отклонение (S) денежного оборота; условия соблюдения производственного баланса в системе.

Тогда цель управления (Z_S) может быть записана в виде:

$$Z_S \rightarrow (\min T_c | \min K) \& (\min S) \& (\vec{X}(t_0) - A \cdot \vec{X}(t_0) = \vec{Y}(t_0)) \quad (7)$$

Графическое представление постановки задачи управления приведено на Рис.1.

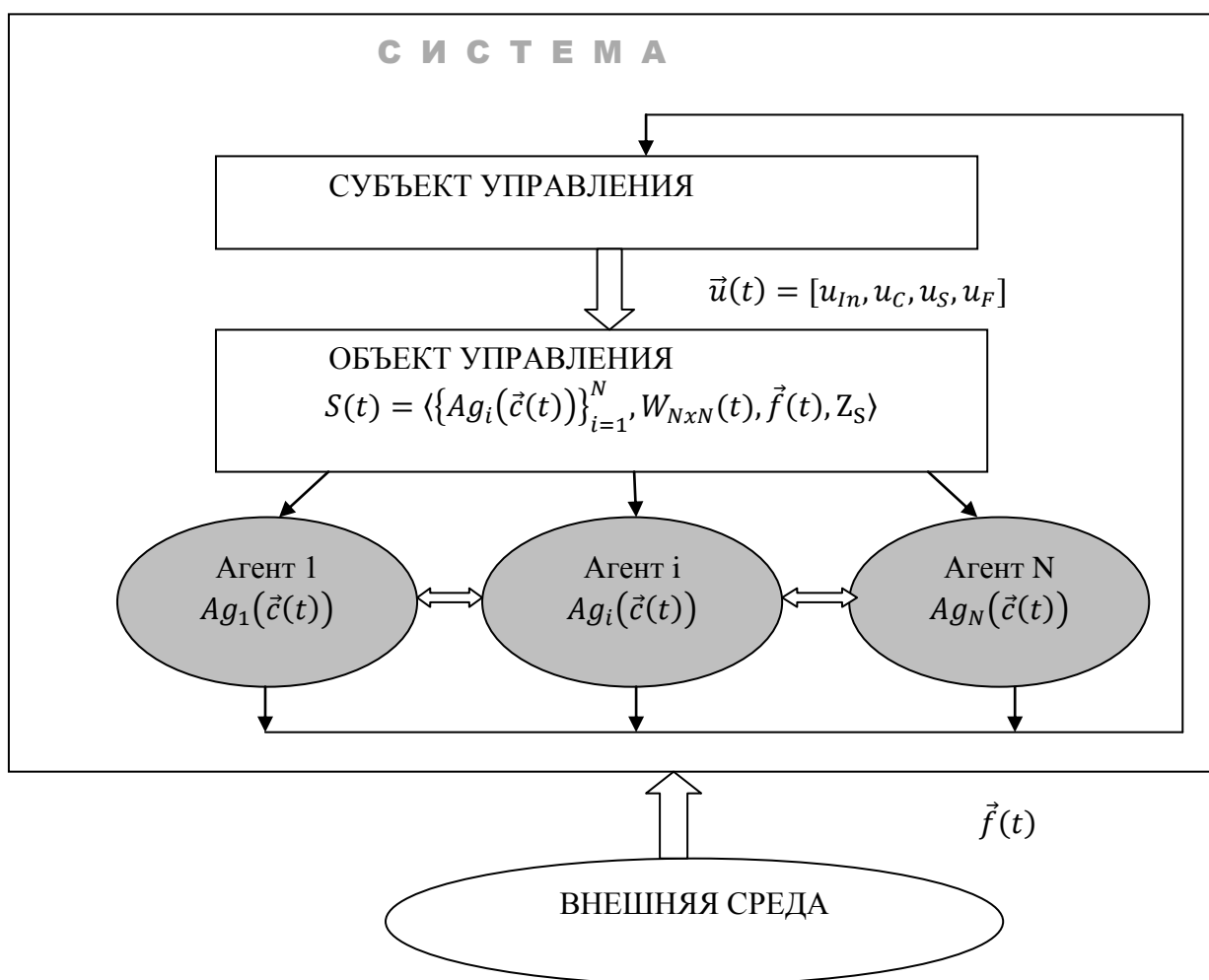


Рис. 1. Графическое представление постановки задачи управления

Параметрами управления являются:

- множество возможных стратегий поведения (обмена) агентов (STR);
- коэффициент обеспеченности деньгами (K);
- структурные характеристики системы:
 - показатели сплоченности: коэффициент взаимности (K_M), коэффициент кластеризации (K_C), коэффициент транзитивности (K_T), диаметр сети (D);
 - показатели однородности (основанные на показателях центральности (C_A): средние значения показателей центральности (\bar{c}_A), среднеквадратичные отклонения показателей центральности (S_A), показатели централизации по Фриману (C_A^F).

Критерии эффективности функционирования экономической системы могут быть представлены следующим образом:

$$E_T = \frac{\min T_c}{T_c} \cdot 100\% \quad (9)$$

$$E_S = \frac{\max S_{KB} - \text{текущее } S_{KB}}{\max S_{KB}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

Эти два критерия характеризуют удаленность от оптимального значения и степень предсказуемости (вариативности) поведения системы.

В качестве дополнительного критерия эффективности следует рассматривать возможность поддержания самовоспроизводства в системе, которое структурно определяется в экономической системе количеством циклических контуров (E_B^E) нормированных на количество возможных связей,

$$E_B^E = \frac{\text{число циклических контуров}}{g(g-1)} \quad (11)$$

Информационная база исследований

Существует проблема получения реальных экономических данных. В данной работе исследовались сети, полученные методами, разработанными в экспериментальной экономике [11]. Несколько систем были построены с использованием результатов деловых игр в различных бизнес сообществах (в Таблице 1 приведены три из них, обозначенные как «И_Ек», «И_М», «И_У»). Эти системы образованы коммуникационными связями, проявившимися во время деловой игры, цель которой была обеспечить себя необходимыми для производства ресурсами. Эти деловые игры и их результаты более подробно описаны [2]. Еще одна система была построена на основе открытых статистических данных (обозначена «мун» в Таблице 1), подробно технология создания описана в [3]. Системы рассматриваются как сети коммуникаций, для исследования их структуры применены подходы SNA-методологии.

Основные сетевые структурные показатели систем приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Сетевые структурные показатели анализируемых систем

Система	Размер	Плотность	Диаметр	K_M	K_C	$C_A^F(\text{вых})$	\bar{c}_A	S_A
мун	12	0,212	4	0,333	0,517	0,86	31,8	22,7
И_Ек	13	0,192	4	0,153	0,141	0,243	33,3	11,8
И_М	17	0,184	5	0,163	0,227	0,203	31,6	14,8
И_У	11	0,622	2	0,473	0,639	0,172	49	18,9

Следует пояснить некоторые показатели.

Размер сети обычно определяется как количество узлов в сети.

Плотность сети – это отношение числа существующих связей к числу возможных связей в сети.

Диаметр сети – это длина самого большого геодезического расстояния в связной сети.

Коэффициент кластеризации сети рассчитывается как среднее арифметическое коэффициентов кластеризации отдельных узлов. Коэффициент кластеризации отдельного узла есть плотность соседства данного узла, т.е. доля ближайших соседей данного узла, связанных между собой.

Коэффициент взаимности показывает долю диад, содержащих взаимные (симметричные) связи по отношению ко всем связным диадам.

В ориентированных сетях может быть рассчитан коэффициент транзитивности. Используют 2 способа расчета:

- Количество транзитивных триад / количество всех триад;
- Количество транзитивных триад / количество триад, в которых отсутствует третья связь (есть связи АВ, ВС, нет АС), т.е. триплетов.

Транзитивной считается триада, состоящая из узлов А, В, С, такая, что если есть связи АВ и ВС, то есть и связь АС.

Характеристики однородности сети определяются в отношении мер центральности. Существует несколько мер центральности, в исследовании использовалась центральность по степени.

Показатель центральности по степени - это количество входящих/выходящих связей у данного узла, чаще этот показатель нормируют на число всех возможных связей данного вида (входящих или исходящих).

Индексы централизации по Фриману, предложенные в [13], отражают вариативность индивидуальных индексов определенного типа центральности (в данном исследовании центральности по степени).

Программное обеспечение исследования

Для исследования эффективности различных типов управления в среде моделирования NetLogo [15] был создан комплекс агент-ориентированных моделей, каждая из которых позволяет изучить один или несколько типов управления. Краткое описание комплекса приведено в Таблице 2.

Таблица 2. Состав комплекса АОМ коммуникаций агентов, связанных производственными отношениями

Название модели	Характеристика
Базовая модель	Базовый алгоритм коммуникаций (описан выше)
Модель стратегий	Агенты отличаются стратегиями поведения $STR = \{str_j\}_{j=1}^5$
Модель муниципалитета	Матрица взаимных платежей ($W_{N \times N}$) составлена по реальным экономическим данным
Модель открытой системы	Агенты внешней среды введены в матрицу взаимных платежей. Использованы два типа денежных средств: реальные ($\vec{M}_r(t), K_r$) и виртуальные (внутренние) деньги ($\vec{M}_v(t), K_v$), $K = K_r + K_v$
Производственно-коммуникационная модель	Введен этап производства, на котором корректируются объемы производства ($\vec{X}(t)$)

Базовая модель является основой для остальных моделей комплекса, реализуя базовый алгоритм совершения экономических коммуникаций в системе. Пример окна одной из моделей показан на Рис. 2.

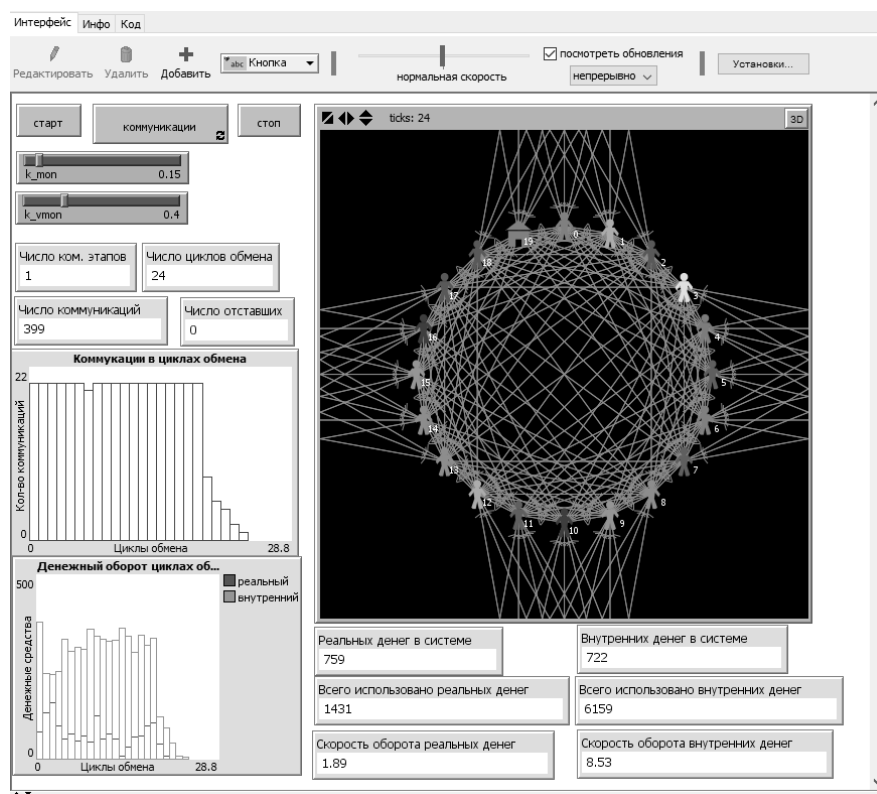


Рис. 2. Пример окна модели комплекса

В модели стратегий реализованы разные стратегии поведения агентов. Стратегии различаются алгоритмами выбора контрагентов для коммуникации и определения объема обмена.

В модели открытой системы в матрицу $W_{N \times N}$ введены агенты внешней среды, что позволяет получить более реалистичную модель, т.к. большинство существующих экономических сетей осуществляют обмены (экспорт/импорт) с внешней средой. В этой модели кроме реальных денежных средств используются виртуальные (внутренние) деньги.

Модель муниципалитета ориентирована на реальные входные данные (входные данные имеют другой формат), она подтверждает корректность остальных моделей.

В производственно-коммуникационную модель в дополнение к коммуникационному этапу введен производственный этап для подтверждения возможности самовоспроизводства системы.

Результирующий вектор управления

Вектор управления $(\vec{u}_T(t))$ в общем случае состоит из следующих компонентов: институциональное управление (u_m), управление составом (u_c), управление структурой (u_s),

мотивационное управление (u_M), информационное управление (u_I), управление порядком функционирования (u_F) [6]:

$$\vec{u}_T(t) = [u_{In}, u_C, u_S, u_M, u_I, u_F] \quad (8)$$

В результате исследований были показаны возможности использования четырех основных типов управления, они показаны в Таблице 3.

Таблица 3. Типы управления

Тип управления	Параметр управления	Целевой параметр
Институциональный (u_{In})	Объем денежных ресурсов в системе (определяется коэфф. обеспеченности деньгами, K)	Длительность коммуникационного этапа (КЭ) – E_T , Вариативность КЭ – E_S
	Различные типы денежных средств (K_r, K_v)	Длительность КЭ – E_T Вариативность КЭ – E_S
Управление составом (u_C)	Различное число и типы агентов	Длительность КЭ – E_T Вариативность КЭ – E_S
Управление структурой (u_S)	Матрица связей	Поддержка аутопоэза
	Наличие циклических структур	Поддержка аутопоэза в экономических сетях (E_B^E)
	Соответствие моделям структурного баланса	Поддержка аутопоэза в социальных сетях (E_B^S)
Управление функционированием (u_F)	Стратегии поведения агентов (\vec{STR})	Длительность КЭ – E_T Вариативность КЭ – E_S

Результирующий вектор управления для данной экономической системы имеет вид:

$$\vec{u}(t) = [u_{In}, u_C, u_S, u_F], \quad (9)$$

Заключение

Кибернетика, ориентированная на определенную отрасль, в данном случае на экономику, не потеряла свою актуальность при условии перехода на теоретическую и методологическую основу кибернетики второго порядка. Согласно теореме операциональной замкнутости можно определить типы управления, при которых система будет обладать собственным поведением, причем это поведение обеспечит ее самовоспроизводство.

В данном исследовании свою эффективность для анализа экономических систем доказали SNA-методология при решении задач изучения структуры системы и агент-ориентированное моделирование – для изучения поведения системы, рассматриваемой как нетривиальная машина.

Литература

1. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. 2-е изд. — М.: Наука; Главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983. — 344 с.
2. Зверева О.М., Давлетбаев Р.Х., Назарова Ю.Ю., Медведева М.А., Берг Д.Б. Сравнительный анализ структуры локальных предпринимательских сетей // Управление экономическими системами. Электронный научный журнал: №8, 2016 [Электронный

- ресурс]. — URL: http://uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=4056 (дата обращения: 10.09.2017).
3. Игнатова М.А., Селезнева Н.А., Ульянова Е.А. Муниципальная экономика: модель финансовой сети внутреннего рынка // *Современные проблемы науки и образования*: №2, 2014. [Электронный ресурс]. — URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12901> (дата обращения: 10.09.2017).
 4. Канеман Д., Словик П., Тверски А. Принятие решений в условиях неопределенности. — Харьков: Изд. института прикладной психологии «Гуманитарный Центр», 2005. — 632 с.
 5. Лукша П.О. Самовоспроизводство в эволюционной экономике — СПб.: Изд. «Алетейя», 2009. — 208 с.
 6. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 3-е изд., испр. и дополн. — М: Издательство физико-математической литературы, 2012. — 604 с.
 7. Новиков Д.А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. — М.: ЛЕНАНД, 2016. — 160 с. (Серия «Умное управление»).
 8. Ольсевич Ю.Я. Современный кризис «мейнстрима» в оценках его представителей (предварительный анализ). — М: Институт экономики РАН, 2013. — 46 с.
 9. Полтерович В.М. Кризис экономической теории: доклад на семинаре «Неизвестная экономика» в ЦЭМИ РАН. [Электронный ресурс]. — URL: http://mathecon.cemi.rssi.ru/vm_polterovich/files/Crisis_Economic_theory.pdf (дата обращения: 10.09.2017).
 10. Ashby W. Ross. An Introduction to Cybernetics. — London: Chapman & Hall Ltd., 1957. — 156 p.
 11. Davis Douglas D., Holt Charles A. Experimental Economics. — Princeton University Press, 1993. — 584 p.
 12. Dutta P.K., Radner R. Profit Maximization and the Selection Hypothesis // *The Review of Economic Studies*: October, 1999. Vol. 6. № 4. — pp. 769-798.
 13. Freeman L.C. Centrality in Social Networks // *Social Networks*: 1978/1979. — pp. 215-239.
 14. Krugman, Paul. How Did Economists Get It So Wrong? Mistaking Beauty For Truth. *The New York Times Magazine*. [Электронный ресурс] — URL: <http://www.nytimes.com/2009/09/06/magazine/06Economic-t.html> (дата обращения: 10.09.2017).

15. Wilensky U., 1999. NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. — Northwestern University, Evanston, IL. [Электронный ресурс]. — URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата обращения: 01.09.2017).

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-06-04863 «Математические модели жизненного цикла локальных платежных систем».