DOI:10.1070/sm2012v203n01abeh004213

4. Moiseev, E. I., Korzyuk, V. I., & Kozlovskaya, I. S. (2014). Classical solution of a problem with an integral condition for the one-dimensional wave equation. *Differential Equations*. V.50(10). Pp. 1364-1377. DOI:10.1134/s0012266114100103
5. Kornienko, D. V. (2006). On a spectral problem for two hyperbolic systems. *Differential Equations*. V. 42(1). Pp. 101-111. DOI:10.1134/s0012266106010083
6. Soldatov, A.P. (2016). On the spectral radius of functional operators. *Math. Notes*. V. 100:1. Pp. 132-138. DOI: 10.1134/S0001434616070129

УДК 519.711.2

ПРИМЕНЕНИЕ КОГНИТИВНОГО ПОДХОДА К ИССЛЕДОВАНИЮ СИСТЕМ С НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Елена Викторовна Игонина
к.ф.-м.н., доцент
elenaigonina7@mail.ru
г. Елец

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина

Аннотация. В статье рассмотрено применение когнитивного подхода для исследования управляемых динамических системс неполной информацией. Введены основные определения: когнитивное моделирование, когнитивная модель (карта), базисные факторы, взвешенный граф. Перечислены основные типы когнитивных карт, определены разновидностии этапы построения обобщенной нечеткой когнитивной карты. Обозначены некоторыенаправления дальнейшего развития когнитивного подхода для моделирования системс неполной информацией. Рассмотрено применение компьютерных систем для создания обобщенных нечетких когнитивных моделейс учетом их особенностей. Дано краткое описание прикладного пакета FuzzyLogicToolbox компьютерной среды Matlab, используемого для моделирования изучаемых систем в настоящей работе. Приведено поэтапное построение когнитивной модели в пакете FuzzyLogicToolbox управляемой маятниковой системы на основе знаний экспертово поведении объекта управления. С помощью прикладного пакета для каждой переменной определены (с учетом их терм-характеристик) значения функций принадлежности, которые варьируются в пределах отрезка [0; 1] – процедура введения нечеткости (фазификация); выбран треугольный тип функций принадлежности; использован логический вывод Мамдани; для преобразования нечеткого набора выводов в четкое число (процедура дефаззификации) использован центроидный метод. Компьютерная система тестирования позволила получить конкретные числовые значения, как для входящих переменных, так и для переменной выхода. Показано, что рассмотренный в настоящей работе когнитивный подход к исследованию системс неполной информацией позволяет реализовать эффективное управление без использования и знания точной математической модели процесса.

Ключевые слова: управляемые системы, системы с неполной информацией, когнитивное моделирование, нечеткое моделирование.

В последнее время в России и за рубежом наметилась тенденция активного применения когнитивного подхода для исследования и моделирования сложных управляемых систем, в частности, систем с неполной информацией (СНИ). СНИ встречаются в случаях, когда объект управления (или процесс) достаточно сложен для получения его точного математического описания ввиду многообразия задействованных физических эффектов, нестационарности объекта, наличия неконтролируемых возмущающих воздействий[1]. Отметим, что отсутствие достаточных знаний о системе не является единственной неопределенностью, обусловленной субъективными причинами. Неполнота информации выражается также в неопределенности целей развития системы и критериев выбора управленческого решения. Как правило, неудовлетворенность текущим состоянием системы осознается субъектом управления, его представления о причинах и возможных способах изменения ситуации в системе размыты, нечетки и противоречивы. Формализация нечетких представлений – одна из основных задач, которую необходимо решить при разработке и исследовании моделей СНИ [2, 3]. Отметим, что субъекту управления приходится манипулировать только качественной информацией в виде интуитивных понятий, предположений, мыслить и принимать решения в количественных характеристиках ему не свойственно. Структуры знания в мышлении субъекта управления, оказываются важнейшими элементами ситуации, неустранимыми из модели принятия решений. Таким образом, моделирование изучаемой системы и принятие управленческих решений, зависимых от полученной модели, следует рассматривать как сложный интеллектуальный процесс разрешения проблем, несводимый исключительно к рациональному выбору [4]. Для поддержки этого процесса требуются новые подходы к разработке формальных моделей, методов решения проблем и формирования целей развития СНИ, особенно на ранних этапах подготовки управленческих решений.

Когнитивный подход – подход, направленный на разработку формальных моделей и методов исследования СНИ, поддерживающих интеллектуальный процесс решения проблем с помощью учета в этих моделях и методах когнитивных возможностей (восприятия, представления, познания, понимания, объяснения) субъекта управления при решении управленческих задач [2].

Получение достоверной информации и ее быстрый анализ являются важнейшими предпосылками эффективного моделирования исследуемой системы. Впервые когнитивныйподход для проведения анализа, моделирования СНИ и принятия решения субъектом управления, был предложен американским исследователем Р. Аксельродом, термин когнитивное моделирование был введен психологом Э.Толменом в 1948 г. от лат.cognitio – знание, познание; структуризация, состоящая в формировании и уточнении гипотезы о функционировании объекта. Заметим, что когнитивный анализ изначально сформировался в рамках социальной психологии, а именно – когнитивизма, занимающегося изучением процессов восприятия и познания. Применение разработок социальной психологии в теории управления привело к формированию особой отрасли знаний – когнитологии, концентрирующейся на исследовании проблем управления и принятия решений. Сегодня когнитивный подход развивается в направлении совершенствования аппарата анализа и моделирования слабоструктурированных динамических систем и СНИ. Теоретические достижения когнитивного подхода являются основой для создания компьютерных сред, ориентированных на решение прикладных задач в теории моделирования управляемых систем, в частности СНИ [5, 6].

Под *когнитивным моделированием* понимают исследование функционирования и развития СНИ посредством построения их модели на основе когнитивной модели (карты) [2]. *Когнитивная карта*(КК) отражает субъективные представления (индивидуальные или коллективные) исследуемой проблемы, ситуации, связанной с функционированием и развитием СНИ. Компонентами КК являются базисные факторы и причинно-следственные связи между ними. *Базисные факторы* – это факторы, определяющие и ограничивающие наблюдаемые явления, и процессы в системе и окружающей ее среде, иинтерпретированные субъектом управления как существенные, ключевые параметры, признаки этих явлений и процессов. Изначально, при становлении когнитивного подхода имело место формальное представление КК в виде ориентированного графа (знакового графа), вершинам которого сопоставлены факторы, а ребрам – знаки (+ или

–). В последнее время все чаще КК представляется в виде *взвешенного графа*, в котором вершинам сопоставляются факторы, а ребрам – веса в той или иной шкале. Ориентированный граф, у которого определены веса его дуг, называется функциональным.

В зависимости от значений, которые может принимать ребро ориентированного графа, КК подразделяют на традиционные (простые) и на нечеткие когнитивные карты (НКК). НКК или иначе нечеткая когнитивная модель (FuzzyCognitiveMaps – FCM) является результатом объединения двух научных направлений – нечеткой логики (“fuzzylogic”), созданной в 60-х годах профессором Лотфи Заде [7], и системной динамики (“systemdynamics”).Понятие FCM для моделирования причинных взаимосвязей, выявленных между концептами некоторой области, было введено в 1986 г. Б. Коско [8]. Анализ когнитивной модели позволяет быстро получить информацию о поведении системы без наличия ее математической модели, а в некоторых случаях провести численные эксперименты. В отличие от простых когнитивных карт, FCM представляют собой нечеткий ориентированный граф с обратной связью, узлы которого являются нечеткими множествами. Направленные ребра графа не только отражают причинно-следственные связи между концептами, но и определяют степень влияния (вес) связываемых концептов. Простые FCM, или традиционные когнитивные карты, содержат связи, которые могут принимать одно из трех значений из множества $\{-1, 0, 1\}$.

Отечественными исследователями предложен новый тип когнитивных карт – *обобщенные нечеткие когнитивные карты* [9]. Они представляют собой нечеткую причинно-следственную сеть вида $G = (E,W)$, где $E =\{e_1, e_2, \ldots, e_p\}$ – множество концептов, $\{w(e_i, e_j)\}$ – множество связей между ними. Каждый концепт e_i, $i = 1, \ldots, P$ характеризуется терм-множеством лингвистической переменной $T_i= \{T_{i1}, T_{i2}, \ldots, \mathrm{T}^{i}_{m_j}\}$, где m_j– число типовых состояний концепта. Для описания каждого терма T_{ik} строится терм-множество с функцией принадлежности$\mu_{\mathrm{T}^{i}_{k}}(x)$. Связи между типовыми состояниями каждой пары концептов задаются нечеткими переменными, описываемыми соответствующими нечеткими множествами.

Разновидность обобщенной нечеткой когнитивной карты определяется выбранной формой функций принадлежности (треугольная, трапециидальная, гауссова и др.), способом нечеткого логического вывода(по Мамдами, Цукамото, Ларсену), процедуры деффазификации и некоторыми другими параметрами и свойствами. Отметим, что в [10] проведено исследование и дан сравнительный анализ различных типов нечетких логических выводов (алгоритмов), аппроксимирующих заданную СНИ.

Проведение когнитивного анализа и моделирования СНИ является крайне сложной задачей, для решения которой привлекаются прикладные компьютерные системы. В работе дано описание разработанных российским учеными компьютерных систем моделирования КК с учетом их разновидностей [6]. Заметим, что не менее эффективным инструментом для моделирования СНИ является пакет FuzzyLogicToolbox компьютерной среды Matlab. Так в [11] рассмотрено применение нечетко-когнитивного подхода в задаче управления процессов выплавки FESI.Указанный программный пакет состоит из встроенных GUI-модулей (GraphicalUserInterface, GUI), создающих понятийную среду и обеспечивающих легкое продвижение по всем этапам проектирования системы[12]:

- FuzzyInferenceSystemEditor (FIS) – редактор общих свойств системы с логическим регулятором, с помощью которого можно установить число входов и выходов системы, выбрать тип системы (Суджено, Мамдани), метод дефаззификации, реализацию логических операций или выполнить переход к другим GUI-модулям;
- MembershipFunctionEditor – редактор функций принадлежности, который выводит на экран графики функций принадлежности входных и выходных переменных. Позволяет выбрать количество термов для лингвистической оценки входных и выходных переменных, а также задать тип и параметры функции принадлежности каждого терма;

- RuleEditor – редактор базы знаний позволяет задавать и редактировать правила в лингвистическом, логическом и индексном формате. Редактирование правил осуществляется выбором необходимого сочетания термов из меню;
- RuleViewer – браузер логического вывода., который визуализирует выполнение логического вывода по каждому правилу, получение результирующего трем-множества и его дефаззификацию;
- SurfaceViewer – браузер поверхности «входы-выход» управляемой системы. Строит графики зависимости выходной переменной от любых двух входных переменных.

В качестве примера рассмотрим процедуру когнитивного анализа и моделирования управляемой маятниковой системы (на примере управляемого обратного маятника). Воспользуемся экспертными данными о поведении объекта управления, изложенными в работе [13]. Проектирование модели основано на построении зависимости управляющего воздействия u, вырабатываемого регулятором, от угла отклонения x_1 маятника от вертикали и от его угловой скорости x_2. Для описания входных переменных x_1 и x_2 введены следующие термы: отрицательная большая (ОБ), отрицательная(О), нулевая (Н), положительная (П), положительная большая (ПБ). Переменная выхода u описывается термами: очень большая отрицательная (оБО), большая отрицательная (БО), отрицательная (О), нулевая (Н), положительная (П), большая положительная (БП), очень большая положительная (оБП). Зависимость переменной выхода от значений входящих переменных представлено в табл. 1.

Таблица 1.

Зависимость переменной выхода u
от значений входящих переменных x_1 и x_2

Угол отклонения (x_1)	Угловая скорость (x_2)				
	ОБ	О	Н	П	БП
ОБ	оБО	оБО	БО	О	Н
О	оБО	БО	О	Н	П
Н	БО	О	Н	П	БП
П	О	Н	П	БП	оБП
БП	Н	П	БП	оБП	оБП

Заметим, что в работе автора [14] выполнена редукция представленной базы правил: число правил уменьшено до четырех:

Правило 1: если x_1 = П и x_2 = О, то u = Н.

Правило 2: если x_1 = О и x_2 = П, то u = Н.

Правило 3: если x_1 = П и x_2 = П, то u = БП.

Правило 4: если x_1 = О и x_2 = О, то u = БО.

Пошаговое проектирование динамики управляемого обратного маятника проводится на основе полученной базы правил с использованием GUI-модулей пакета FuzzyLogicToolbox. На основе FIS-редактора представляется общая информация об управляемой системе: количество входных переменных, переменная выхода, алгоритм Мамдани (рис. 1). С помощью модуля RuleEditor формируются функции принадлежности для переменных. В данном модуле для каждой переменной выбран треугольный тип функции принадлежности, преимущество которого перед другими видами обусловлено простотой их вычислительной реализации, и тем, что они позволяют сформировать модели, обладающие хорошими аппроксимирующими свойствами.

На рис. 2 представлен вид окна редактора функций принадлежности, в частности для входящей переменной – угол отклонения введены термы (ОБ, О, Н, П, ПБ) и определен треугольный вид функции принадлежности. Аналогичные действия проводятся для второй входящей переменной x_2 и переменной выхода *u*.

Формирование базы правил регулятора, осуществляющего управление, проводится с помощью модуля RuleEditor, результаты представлены на рис. 3. Визуализация логического вывода осуществляется с помощью модуля RuleViewer. Указанный модуль иллюстрирует для каждого правила ход логического вывода, нахождение результирующего нечеткого множества и процесс дефаззификации, т.е. позволяет увидеть числовые значения входящих переменных и переменной выхода (рис. 4.).

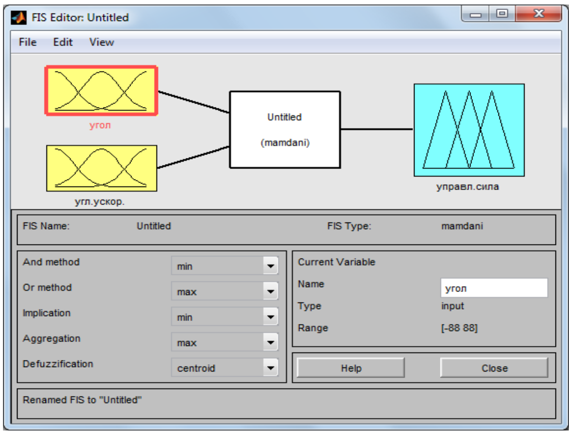

Рис. 1. Вид окна FIS-редактора

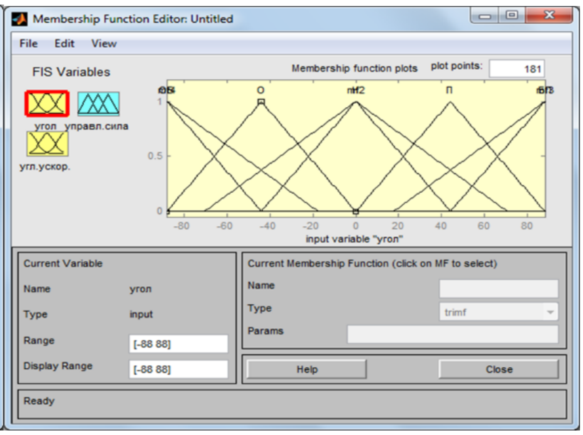

Рис. 2. Окно редактора функций принадлежности

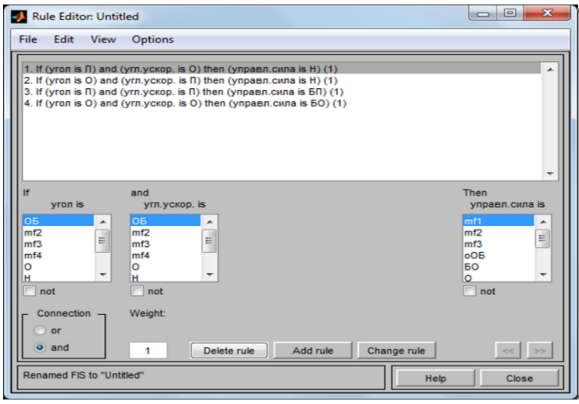

Рис. 3. Окно редактора RuleEditor

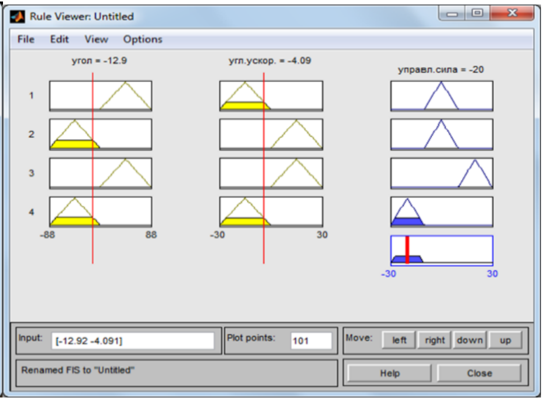

Рис. 4. Окно редактора Rule-Viewer

Результат отображения входов в выход воздействия, оказываемого регулятором на маятник можно представить в виде полилинейной гиперповерхности с помощью модуля View-Surface (рис. 5). Полученная поверхность характеризует функционирование регулятора для возможных значений лингвистических переменных.

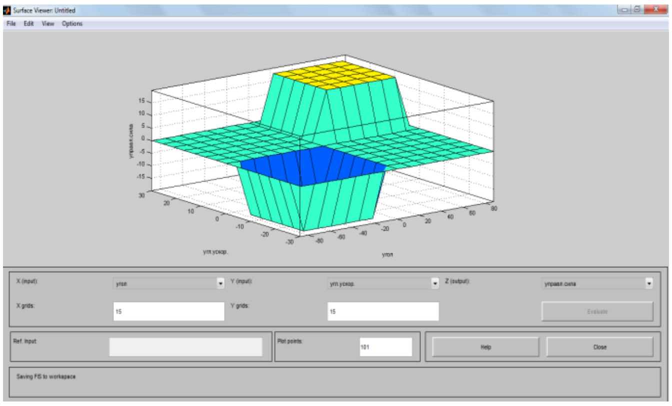

Рис. 5.ОкномодуляSurfaceViewer

В заключении отметим, что рассмотренный в настоящей работе когнитивный подход к исследованию СНИ позволяет реализовать эффективное управление такими системами без построения точной математической модели. Как известно, данный подход имеет недостаток, заключающийся в субъективностимнений экспертов. Поэтому перспективным направлением является разработка алгоритмов и методов обученияобобщенных нечетких когнитивных карт на экспериментальных данных. Наглядность НКК, возможности проведения численного моделирования, а также комбинирование экспертного и адаптивного подходов для построения базы лингвистических правил делают обобщенные НКК удобным средством описания СНИ.

Список литературы

1. Афанасьев В.Н. Динамические системы управления с неполной информацией: алгоритмическое конструирование. М.: УРСС, 2007.
2. Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) // Управление большими системами: сборник трудов. 2006. № 16. С. 26–39.
3. Борисов В.В., Федулов А.С. Нечеткий когнитивный анализ и моделирование слабо формализуемых проблем // Материалы XIX Международной научной конференции, посвященной 100-летию физико-математического факультета СмолГУ «Системы компьютерной математики и их приложения». Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2018. Вып. 19. С. 113–117.
4. Луценко Е.В., Серга Г.В. Теория информации и когнитивные технологии в моделировании сложных многопараметрических динамических технических систем // Научный журнал КубГАУ, №121(07). 2016. С.68–115.
5. Малинецкий Г.Г. Когнитивный вызов и информационные технологии // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010 № 46 28.
6. Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования Когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. 2013. №3. С.2–16.
7. Zadeh L. Fuzzy Sets (1965). Information and Control. V. 8(3). Pp.338–353.
8. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps (1986). International Journal of Man-Machine Studies. V. 24.P p. 65–75.
9. Федулов А. С., Борисов В. В. Модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт // Системы управления, связи и безопасности. 2016. №1. С.66–80.
10. Масина О.Н., Дружинина О.В. Моделирование и анализ устойчивости некоторых классов систем управления. М.: ВЦ РАН, 2011. .

11. Михалев А.И., Новикова Е.Ю. Нечетко-когнитивный подход в задаче управления процессов выплавки FESI // АСАУ. 2006. №9(29). С. 133–139.
12. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Телеком, 2007.
13. Ротштейн А.П., Кательников Д.И. Идентификация нелинейных объектов нечеткими базами знаний // Кибернетика и системный анализ. 1998. №5. С. 53–61.
14. Игонина Е.В. Исследование устойчивости и компьютерное моделирование маятниковой системы управления // Материалы I школы-семинара молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности» (г. Елец, 20–22 ноября 2014). – Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина. 2014. С. 93–99.

APPLICATION OF THE COGNITIVE APPROACH TO THE STUDY OF SYSTEMS WITH INCOMPLETE INFORMATION

E.V. Igonina
Can.Sci. (Phys.-Math.), associate professor
elenaigonina7@mail.ru
Yelets

Bunin Yelets State University

Abstract. The article considers the application of the cognitive approach to the study of controlled dynamic systems with incomplete information. The main definitions are introduced: cognitive modeling, cognitive model (map), basic factors, weighted graph. The main types of cognitive maps are listed, the varieties and stages of constructing a generalized fuzzy cognitive map are determined. Some directions of further development of cognitive approach for modeling systems with incomplete information are indicated. Application of computer systems for creation of the generalized fuzzy cognitive models taking into account their features is considered. A brief description of the Fuzzy Logic Toolbox application package of the Matlab computer environment used to model the systems under study in this paper is given. A step-by-step construction of a cognitive model in the Fuzzy Logic Toolbox package of a controlled pendulum system based on the knowledge of experts about the behavior of the control object is given. With the help of an application package for each variable were determined (taking into account their term-characteristics) the values of membership functions, which vary within the interval [0; 1] – the procedure for introducing fuzzy (phasification); selected triangular type of membership functions; used logical conclusion Mamdani; to convert a fuzzy set of conclusions in a clear number (defuzzification procedure) used centroid method. The computer system of testing allowed to obtain specific numerical values for both input and output variables. It is shown that the cognitive approach to the study of systems with incomplete information considered in this paper allows to implement effective management without the use and knowledge of an accurate mathematical model of the process.

Keywords: controlled systems, systems with incomplete information, cognitive modeling, fuzzy modeling.

References

1. Afanas'ev, V.N. (2007). Dynamic control systems with incomplete information: algorithmic design [*Dinamicheskie sistemy upravleniya s nepolnoj informaciej: algoritmicheskoe konstruirovanie*]. Moscow.
2. Avdeeva, Z.K., Kovriga, S.V., Makarenko, D.I. (2006). Cognitive modeling for solving control problems of semi-structured systems (situations) [*Kognitivnoe modelirovanie dlya resheniya*

zadach upravleniya slabostrukturirovannymisi stemami (situaciyami)]. *Managing large systems: proceedings*. V. 16. Pp. 26–39.
3. Borisov,V.V., Fedulov,A.S. (2018). Fuzzy cognitive analysis and modeling of weakly formalized problems [*Nechetkij kognitivnyj analizi modelirovanie slaboformalizuemyh problem*].*Proceedings of the XIX International scientific conference dedicated to the 100th anniversary of the faculty of physics and mathematics of Smolensk state University "Systems of computer mathematics and their applications».*V. 19. Pp. 113–117.
4. Lucenko, E.V., Serga, G.V. (2016). Information theory and cognitive technologies in modeling of complex multiparameter dynamic technical systems [*Teoriya informacii i kognitivnye tekhnologii v modelirovanii slozhnyh mnogoparametricheskih dinamicheskih tekhnicheskih system*]. *The scientific journal of the Kuban state agrarian University*. V. 121(07). Pp.68–115.
5. Malineckij, G.G. (2010). Cognitive challenge and information technology [*Kognitivnyj vyzov i informacionnye tekhnologii*].*The Preprint IPM im. M. V. Keldysh*.V. 46. 28 p.
6. Kulinich, A.A. (2013). Computer systems for modeling Cognitive maps: approaches and methods [*Komp'yuternye sistemy modelirovaniya Kognitivnyh kart: podhody i metody*].*Management problem*. V.3. Pp.2–16.
7. Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets [Fuzzy Sets].*Information and Control*. V. 8(3). Pp.338–353.
8. Kosko, B. (1986). [*Fuzzy Cognitive Maps*]. *International Journal of Man-Machine Studies*. V. 24. Pp. 65–75.
9. Fedulov, A. S., Borisov, V. V.(2016).Models of system dynamics based on fuzzy relational cognitive maps [*Modeli sistemnoj dinamiki na osnove nechetkih relyacionnyh kognitivnyh kart*].*Control, communication and security systems.*V. 1. Pp.66–80.
10. Masina, O.N., Druzhinina, O.V. (2011). Modeling and stability analysis of some classes of control systems. [*Modelirovanie i analiz ustojchivosti nekotoryh klassov sistem upravleniya*].Moscow. 164 p.
11. Mihalev,A.I., Novikova,E.Yu. (2006). Fuzzy-cognitive approach to the problem of FE SI smelting process control [*Nechetko-kognitivnyj podhod v zadache upravleniya processov vyplavki FESI*].*ASAU***.**V.9(29). P. 133–139.
12. Shtovba, S.D. (2007).Design of fuzzy systems by means of MATLAB [*Proektirovanienechetkihsystemsredstvami MATLAB*]. *Moscow.*
13. Rotshtejn,A.P., Katel'nikov,D.I. (1998). Identification of nonlinear objects by fuzzy knowledge bases [*Identifikaciyanelinejnyhob"ektovnechetkimibazamiznanij*]. Cybernetics and systems analysis. V.5. Pp. 53–61.
14. Igonina, E.V. (2014). Stability study and computer simulation of the pendulum control system [*Issledovanieustojchivostiikomp'yuternoemodelirovaniemayatnikovojsistemyupravleniya*]. Materials of the I school-seminar of young scientists "Fundamental problems of system security". Bunin Yelets State University. Pp. 93–99..

УДК 517.9, 519.6

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ СООБЩЕСТВ

Тарова Екатерина Дмитриевна
katerina.tarova@yandex.ru
г. Елец
Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина

Аннотация. Работа посвящена исследованию устойчивости многомерных математических моделей популяционной динамики. Рассмотрены вопросы синтеза и анализа многомерных моделей динамики численности взаимосвязанных сообществ.