
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 007.2

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМ¹

Кудрявцев Павел Сергеевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19Б, e-mail: 79pavel97@mail.ru

Шуткин Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника института по учебной работе, Воронежский институт государственной противопожарной службы, 394052, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231, e-mail: anshutkin@mail.ru

Протасова Виктория Владимировна, магистрант, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19 Б, e-mail: Protasova.Viktoiya@gmail.com

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19Б, e-mail: SFilist@gmail.com

В статье рассматривается возможность управления функциональным состоянием (ФС) сложной системы на основе понятия структурно-функциональной единицы. Предложены модели перехода сложной системы из одного ФС в другое, которые обусловлены управляемыми внешними воздействиями на систему. Модели позволяют осуществлять контроль динамики ФС сложной системы. При должном выборе индикаторных переменных, позволяющих определять переход системы из одного ФС в другое, можно осуществлять мониторинг эффективности внешних воздействий на систему. Модель системы рассматривается как динамика соотношений «функциональный ресурс - функциональный резерв» (ФР). Для системы ФС рассматривается как двухкомпонентный вектор, характеризующий соотношение не активированных и вибрирующих структурно-функциональных единиц. Динамика ФС системы определяется дискретными состояниями ФР (первой компоненты вектора) и непрерывными состояниями ФР – второй компоненты вектора. Предлагаемая модель может быть использована в различных целях: для оценки степени опасности экологического загрязнения окружающей среды, степени эффективности лекарственных средств и их побочных реакций; для формирования тестов на профессиональную пригодность и т.п.

Ключевые слова: сложная система, функциональное состояние, латентные переменные, логистическая модель, структурно – функциональная единица, индикаторные переменные, лекарственные воздействия, мониторинг эффективности

¹ Исследования выполнены при поддержке федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014–2020 годы». Проект «Разработка математического и программного обеспечения автоматизированных диагностических комплексов для анализа и классификации изображений мазков периферической крови в процессе лекарственного воздействия».

**STRUCTURAL FUNCTIONAL MODEL FOR MONITORING
THE INFLUENCE OF CONTROL ACTIONS
ON SELF-ORGANIZING SYSTEMS STATE**

Kudryavtsev Pavel S., post-graduate student, South-Western State University, 19B Cheluskintsi St., Kursk, 3005004, Russian Federation, e-mail: 79pavel97@mail.ru

Shutkin Aleksandr N., Ph.D. (Physical and Mathematical), Deputy Chief of the Institute on Educational Work, Voronezh Institute of State Fire Service, 231 Krasnoznamennaya St., Voronezh, 394052, e-mail: anshutkin@mail.ru

Protasova Viktoriya V., undergraduate, South-Western State University, 19B Cheluskintsi St., Kursk, 3005004, Russian Federation, e-mail: Protasova.Viktoiya@gmail.com

Filist Sergey A., D.Sc. (Engineering), Professor, South-Western State University, 19B Cheluskintsi St., Kursk, 3005004, Russian Federation, e-mail: SFilist@gmail.com

This article considers an opportunity of complex system functional state (FS) control based on the notion of structural functional unit. We suggest models of complex system transition from one FS into another, which are caused by external control influence on the system. These models allow controlling FS dynamics of a complex system. If the indicator variables, which allow determining the complex system transition from one FS into the other, are properly chosen, one can monitor the effectiveness of external influence on the system. The system model is considered as a dynamic ratio of functional resource and functional backup (FB). FS of a system is regarded as a binary vector, characterizing a relative number of not activated structural functional units and a relative number of vibrant functional units. FS dynamics is defined by discrete states of FB (the first vector component) and by continuous states of FB (the second vector component). The suggested model will be used to evaluate the danger of environmental pollution, the effectiveness of medications and their side effects, to form tests on vocational aptitude, etc.

Keywords: complex system, functional state, latent variables, logistic model, structural-functional unit, indicator variables, medicine prescriptions, efficiency monitoring

Развитие системы здравоохранения на современном этапе включает в себя ряд направлений: развитие комплексных информационных систем медучреждений [4, 12], в т.ч. «аккумулирующих» результаты, полученные непосредственно от медоборудования - с применением протоколов DICOM3; улучшение функциональных возможностей средств диагностики, в т.ч. инструментальных, относящихся к высокотехнологичным [3]; расширение номенклатуры медикаментозных средств и совершенствование технологий их применения – с учетом возможности «взаимодействия» лекарств при приеме их пациентами; развитие средств комплексного мониторинга состояния пациентов в условиях лечебных воздействий (включая проявления побочных эффектов); разработку интеллектуальных систем поддержки принятия и реализации решений по лечебным воздействиям [7]. При таких условиях актуальной является задача анализа и прогнозирования поведения организмов с учетом возможностей подключения ими «внутренних резервов». Такое использование резервов позволяет обеспечить адаптацию организмов к изменяющимся условиям внешней и внутренней среды – в том числе в процессе заболеваний. Однако в существующей литературе эта тематика раскрыта недостаточно полно. Поэтому целью настоящего исследования является попытка устранения указанного недостатка.

Общая характеристика проблематики работы. При исследовании сложных систем возникают проблемы, относящиеся не только к свойствам составляющих их элементов (элементарных объектов) и подсистем, но также к закономерностям функционирования систем в целом. При этом появляется широкий круг специфических задач, таких, как определение общей структуры системы; организация взаимодействия между элементами и подсистемами;

учет влияния внешней среды на систему; выбор оптимальных режимов функционирования системы; обеспечение оптимального управления системой и др. Из числа перечисленных систем целесообразно выделить самоорганизующие системы, обладающие свойством адаптации к изменениям условий внешней среды, способные изменять свою структуру при взаимодействии с ней, сохраняя при этом свойства целостности [2]. Такие системы способны формировать возможные варианты поведения и выбирать из них наилучшие. Это обеспечивается наличием в таких системах элементов (объектов), способных изменять свое состояние и форму взаимодействия с другими элементами системы или с ее подсистемами.

Примерами самоорганизующихся систем могут служить живые системы, в частности, такие, на которые воздействуют факторы окружающей среды (экологические факторы), либо на эти системы оказываются внешние воздействия, связанные с лекарственными назначениями, способствующими выходу системы из патологического состояния. В современной медицине происходит заметное изменение парадигмы в отношении лечения больных. В новой парадигме объединены информационные технологии, наука и клиническая терапия для улучшения здоровья и удовлетворения потребностей пациентов. Конкретным воплощением этой парадигмы является *персонализированная* (или целенаправленная) медицина. Это определенная модель организации медицинской помощи людям, основанная на выборе совокупности диагностических, лечебных и профилактических средств, которые были бы оптимальными для конкретного пациента – с учетом его генетических, физиологических, биохимических и других особенностей.

Персонализированная медицина становится возможной благодаря объединению геномики, постгеномных технологий, терапевтического лекарственного мониторинга и молекулярной фармакологии. Это наиболее востребованная сегодня область здравоохранения, которая базируется на индивидуальном и скоординированном подходе в отношении анализа процессов возникновения и течения болезней, методов их лечения. Такой тип интегральной медицины включает также разработку персональных мелкосерийных лекарственных средств лечения на основе современной геномики. Конечной целью персонализированной медицины является поиск наиболее подходящего клинического подхода для конкретного больного и разработка индивидуальной схемы лечения с учетом индивидуальных особенностей организма и протекания заболевания [8].

Следовательно, необходима модель организма человека, учитывающая его индивидуальные особенности, и, благодаря этому, способная выявить его индивидуальные реакции на лекарственные воздействия. Такая модель даст возможность осуществить персонализированное управление терапевтическими процедурами. В то же время, модель должна быть достаточно универсальна - чтобы ее можно было использовать для значительного круга пациентов и в широкой области терапевтических процедур.

Следовательно, ключевым вопросом в обеспечении возможности осуществления персонализированной медицины является мониторинг эффективности терапевтических процедур и/или эффективности лекарственных назначений (воздействий).

Для оценки такой эффективности необходима совокупность показателей (контролируемых параметров) живой системы, которые бы адекватно описывали ее текущее состояние и динамику. В связи с возможностью одновременного назначения множества различных лекарственных средств и терапевтических процедур необходима универсальная модель функционального состояния (ФС) живой системы, параметры которой были бы доступны для проведения измерений или вычислений.

Закономерности формирования ФС на различных уровнях организации, убеждают нас в том, что имеется один универсальный архитектурный принцип в деятельности организма.

Он лишь модифицируется в зависимости от того, на каком уровне формируется та или иная система – на уровне гомеостатических соотношений или на уровне поведенческих актов [1].

Физиологические резервы организма представляют собой возможности отдельных органов и систем органов изменять при необходимости свою функциональную активность и характер взаимодействия друг с другом с целью достижения оптимального для данных конкретных условий уровня функционирования и эффективности деятельности. Материальными носителями физиологических резервов являются отдельные органы и системы органов, а также механизмы, обеспечивающие поддержание гомеостаза, переработку информации и координацию вегетативных функций и двигательных актов. Это — обычные механизмы регуляции физиологических функций, которые в процессе приспособления организма к изменчивым условиям внешней среды и для нивелирования сдвигов во внутренней среде используются им в качестве резервов адаптации. Функциональные резервы (ФР) организма могут быть представлены в виде сложной системы резервов, в которой фундаментом являются биохимические, а вершиной — психологические резервы. Стержнем системы ФР, объединяющим ее в единое целое за счет механизмов нейрогуморальной регуляции, являются физиологические резервы. Системообразующим фактором выступает результат деятельности или результат адаптации. Отсутствие результата, систематически недостаточный или неадекватный результат, могут не только стимулировать формирование системы ФР, но и разрушать ее, прекращать ее функционирование в зависимости от воли, установок и системы ценностей [14].

Качественная характеристика моделей сложных систем, которые могут быть использованы для анализа адаптационных возможностей организма. Если в качестве модели сложной системы выбрать модель, основанную на активизации структурно-функциональных единиц (СФЕ) [6], то уровень реакции системы на возмущающее воздействие или эффективность лекарственной терапии (ЛТ) определяется числом СФЕ, активизированных или деактивизированных в результате ЛТ.

Согласно [6] система – это совокупность «активизированных» и «не активизированных» СФЕ. Система рассчитана на некий номинальный режим работы, под которым будем понимать минимальное количество «активизированных» СФЕ, необходимое для обеспечения гомеостазиса системы в нормальных условиях. В отличие от [6], введем дополнительный (третий) класс СФЕ – «вибрирующие» СФЕ. Для пояснения необходимости введения этого класса определим, с точки зрения СФЕ, понятие ресурса системы и резерва системы. Под ресурсом системы будем понимать число «не активизированных» СФЕ в процессе поддержания системой своего номинального или текущего режима (состояния). Под резервом системы будем понимать минимальное количество СФЕ, которые может включать/отключать система, находясь в номинальном или текущем режиме (функциональном состоянии). Эти СФЕ назовем «вибрирующими». Такие СФЕ могут рассматриваться и как «оперативный резерв» системы, а его использование – как средство «перераспределения нагрузки во времени» между СФЕ.

По определению сложной системы, предложенному в [6], система – это объект определенной степени сложности, который может подстраивать свои функции под нагрузку (под внешнее воздействие), результат действия которой имеет число градаций, равное числу СФЕ, входящих в состав системы. Из этого определения следует, что ФС системы (ФСС) θ связано некоторой функциональной зависимостью с двумя другими латентными параметрами: ФР и функциональным ресурсом.

На рисунке 1 представлена графическая модель ФСС с позиции резерва и ресурса СФЕ.

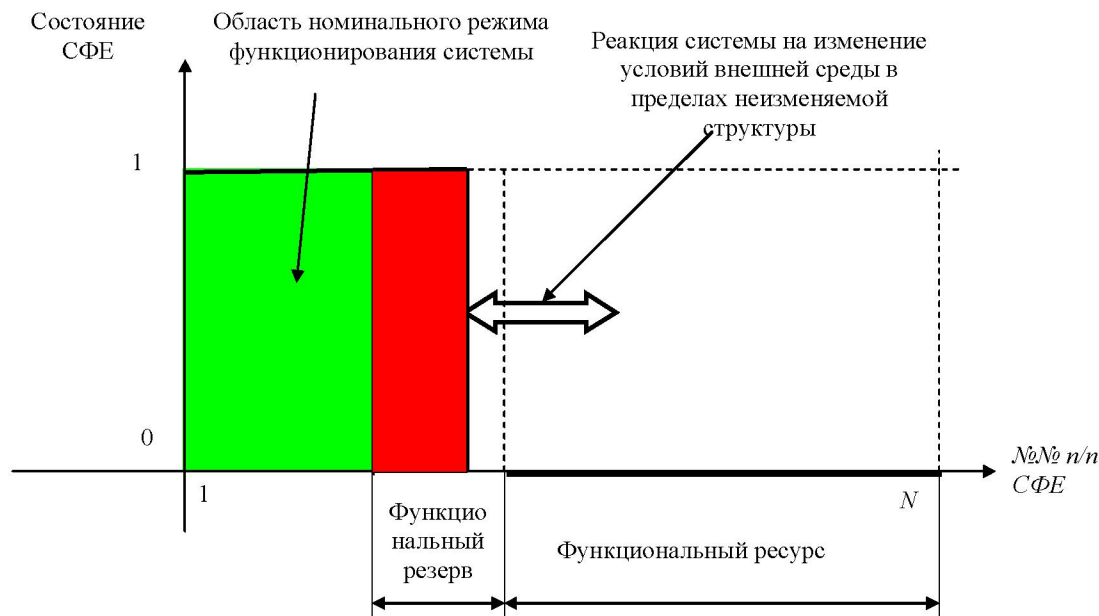


Рис. 1. Графическая модель, иллюстрирующая ФСС с позиций резерва и ресурса СФЕ

Согласно этой модели система располагает ресурсом в количестве N СФЕ. Эти СФЕ разделены на три класса. Часть СФЕ находится в активном состоянии (оно относится к классу «1» и обозначено на рисунке единицей). Вторая часть СФЕ — не активирована. Это состояние на рисунке показано нулевым уровнем. Находящиеся в этом состоянии СФЕ (они относятся к классу «2») составляют функциональный ресурс системы для данного ФС. Третья часть СФЕ в каждом ФС может находиться в активированном или не активированном состоянии (в зависимости от состояния внешней среды) и осуществлять обратимые переходы в/из этих состояний. Это вибрирующие СФЕ, которые составляют ФР в данном ФС — мы относим их к классу «3».

Переход системы из одного ФС в другое связан с ее структурными изменениями, которые могут быть как обратимыми, так и не обратимыми.

При фиксированном соотношении между ресурсом и резервом системы ее структура, то есть топология и взаимодействие СФЕ системы друг с другом, остаются неизменными. Перераспределение ресурса системы приводит к изменению структуры системы. Поэтому модель, основанную на такой гипотезе, назовем моделью с динамической структурой.

Концептуальная модель управления ФС сложной системы, основанная на введенном понятии СФЕ, представлена на рисунке 2.

В модель включен классификатор ФС, который позволяет отнести систему к определенному классу. Отметим, что в общем случае ФС не отождествляется с классом, так как ФС измеряется на интервальной шкале, а классы — на шкале наименований. В общем случае ФСС — это объективное свойство системы, определяемое ее латентными переменными, тогда как класс определен субъективными требованиями лица, принимающего решения (ЛПР). Согласно модели, представленной на рисунке 1, ФСС зависит от двух латентных переменных: функционального ресурса и ФР. Функциональный ресурс может принимать только дискретные значения: после того, как ФР в данном ФС будет исчерпан, запускается регламентированный процесс перераспределения функционального резерва между функциональным ресурсом для нового ФС и функциональным резервом в новом ФС (на рисунке 1 это

отрезок на оси абсцисс, характеризующий функциональный ресурс, который делится в определенной пропорции при переходе всех СФЕ функционального резерва в класс «1»).

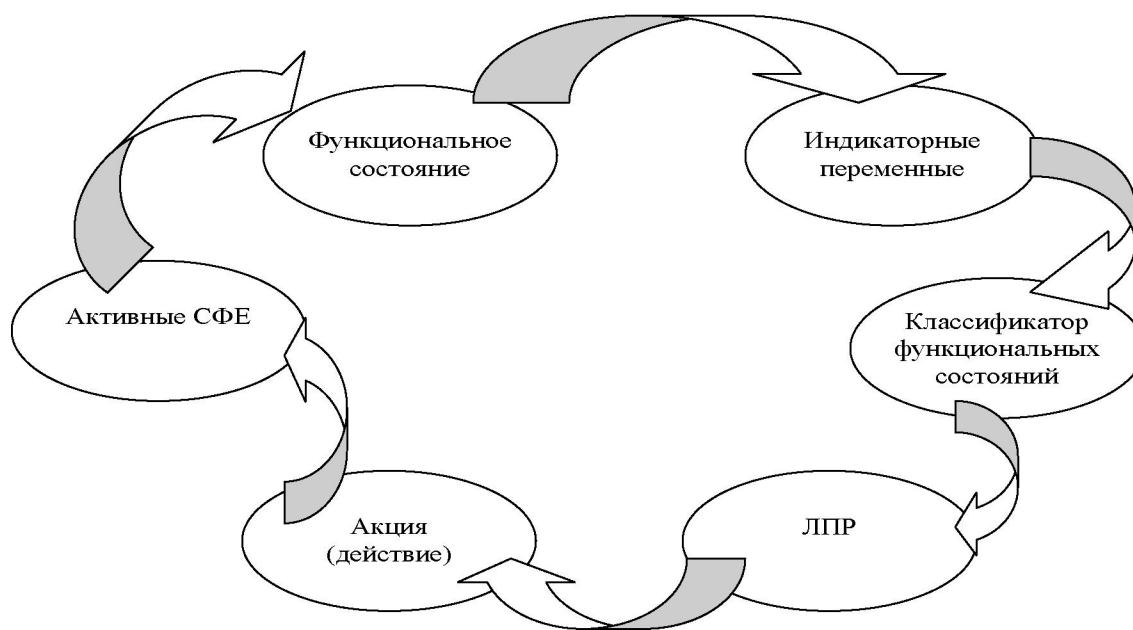


Рис. 2. Концептуальная модель управления сложной системой

Так как принята гипотеза, что СФЕ системы могут быть в трех состояниях, то ФС определяется количеством СФЕ, находящихся в этих трех типах состояний, причем эти величины выражаются в относительных единицах, так как общее число СФЕ в системе неизвестно.

Следующий вопрос, который должен быть решен при построении модели с динамической структурой – это выбор способа, позволяющего оценить, сколько СФЕ из ресурса выбирается резервом при переходе системы из одного ФС в другое. Здесь можно воспользоваться принципом «пятьдесят на пятьдесят» или принципом «Золотого сечения» [5].

Процесс перехода системы из одного структурного состояния в другое сопровождается перераспределением ресурса системы и с позиции теории сложных систем может быть описан посредством двух латентных переменных. Первая из них (θ) – характеризует ФСС (число активизированных СФЕ) и отражает «напряженность» внешней среды, а вторая (α) – уровень возмущающего (терапевтического) воздействия. Под переменной α понимается «измеряемое» воздействие на систему. Однако шкала измерения этого воздействия определена во внешней, относительно системы, среде. При переносе на системную шкалу имеют место определенные искажения, обусловленные отображением пространства возмущающего воздействия на системные координаты. Так как у каждой системы свои системные координаты (своя шкала), то отображение возмущающего воздействия для различных систем будет различно.

Формализованные математические описания поведения систем для их базовых моделей. Чтобы определить ФСС необходимо выбрать множество индикаторных переменных, которые, с одной стороны, были бы доступны для измерения, а, с другой – достаточно полно отражали ФСС или ее подсистем при всех дискретных значениях функционального ресурса. Это условие отражают следующие выражения:

$$\theta_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{Ni}), \quad (1)$$

$$\theta_i = \phi_i(Y_i), \quad (2)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \psi(P_i), \quad (3)$$

$$P_{ij} = \vartheta(\alpha_j | \theta_{i-1}), \quad (4)$$

где θ_i – i -ый дискретный уровень ФСС (при этом число ФСС может быть ограничено только множеством СФЕ, включенных в модель системы, характеризующейся дискретными значениями распределения ресурса); $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ – множество индикаторных переменных; Y_i – вектор i -ого дискретного ФСС θ_i , характеризующийся состояниями СФЕ, компоненты которых y_1 – число включенных в функциональную модель состояний θ_i СФЕ, а компонента y_2 – число СФЕ, находящихся в резерве в данном ФС θ_i ; P_{ij} – условная вероятность перехода системы из состояния θ_{i-1} в состояние θ_i при условии, что она была в состоянии θ_{i-1} , в случае воздействия на систему фактора α_j , $j = \overline{1, M}$ (при этом $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_M$).

В качестве индикаторов могут быть выбраны показатели крови (как одни из наиболее релевантных индикаторов) или показатели, предложенные в [9].

На рисунке 3 представлена динамика изменения структуры системы при выборе соотношения между резервом и ресурсом «пятьдесят на пятьдесят». В этом случае при переходе на следующий дискретный уровень функционального состояния, ФР предыдущего ФС распределяется поровну между ФР и функциональным ресурсом текущего ФС.

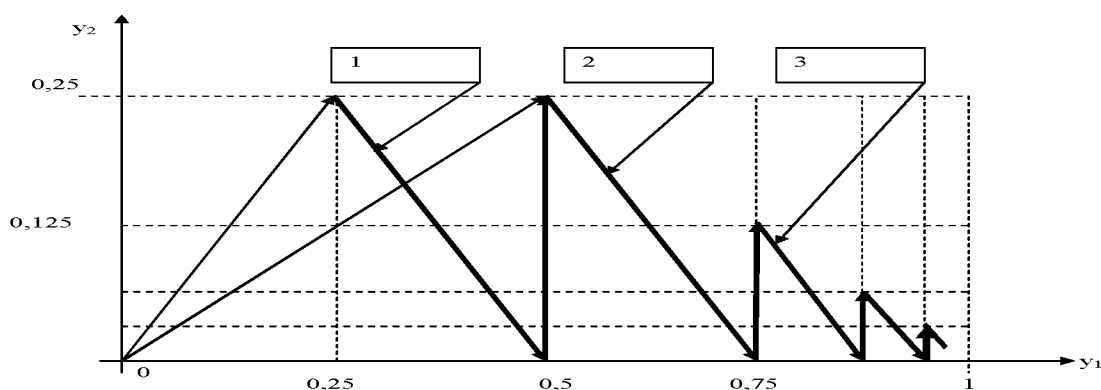


Рис. 3. Динамика изменения структуры системы (векторы, отражающие эту динамику, проведены более толстыми линиями) при выборе соотношения между резервом и ресурсом «пятьдесят на пятьдесят». Горизонтальные штриховые линии соответствуют динамике изменения резерва системы, а вертикальные штриховые линии – динамике изменения ресурса системы

Поведение вектора Y в каждом i -ом ФСС определяют прямые, обозначенные на рисунке 3 цифрами 1, 2, 3 и т.д. Согласно выбранному способу определения соотношения ресурс/резерв в начальном ФС θ_1 «задействуются» 50 % СФЕ. Из них в качестве резерва используются 50%. При этом, в зависимости от состояния внешней среды, вектор Y_i описывает

траекторию, определяемую прямой «1» на рисунке 3 и, таким образом, координаты вектора Y_i независимо от ФСС θ_i связаны соотношением:

$$y_2 = a \cdot (b - y_1) / (b - a), \quad (5)$$

где a – число СФЕ, активированных в состоянии θ_{i-1} ; b – максимальное число СФЕ, которое может быть активировано в состоянии θ_i .

Исходя из уравнения (5), число вибрирующих СФЕ R_i в состоянии θ_i определяется из соотношения:

$$R_i = b_i - y_1. \quad (6)$$

Это число и является ФР системы в состоянии θ_i .

Если состояние внешней среды таково, что вынуждает систему использовать весь резерв данного дискретного ФС, то система переходит в следующее дискретное состояние, увеличивая свой резерв за счет функционального ресурса. Следовательно, теперь конец вектора Y перемещается по отрезку прямой 2. Теоретически таких дискретных состояний может быть бесконечное множество. Оно ограничено возможностью получения целой части частного от деления пополам количества СФЕ, составляющих функциональный ресурс системы в текущем дискретном состоянии.

Таким образом, если система испытывает адекватные к своему дискретному состоянию внешние воздействия, то все перестройки СФЕ обратимы в пределах соотношения резерв/ресурс системы, определяемого уравнением (6). При выходе воздействий за пределы адекватности реакции наблюдаются необратимые перестройки структуры системы, которые приводят к необратимым изменениям ее свойств (индикаторных переменных). При этом свойства систем, относящихся к одному и тому же ФС (классу) при одном состоянии среды, могут изменять свою структуру неодинаково (при неизменной модели по рисунку 3). Это приводит к выделению различных классов при соответствующих изменениях внешней среды. Такие своеобразные расщепления классов иллюстрирует рисунок 4.

При одном и том же внешнем воздействии на системы, находящиеся в исходном состоянии в одном и том же ФС (классе), они могут переходить в различные классы ФС. Переход системы из одного класса в другой зависит не только от изменения внешней среды. Он определяется также индивидуальными особенностями системы, которые «заложены» в абсолютном числе СФЕ, а также в генотипе системы (СФЕ), определяемом функциональной способностью отдельно взятой СФЕ. При этом необходимо отметить следующий факт. Дискретное состояние системы θ_i – это ее внутреннее состояние, определяемое по собственной (индивидуальной) шкале. Отнесение системы к определенному классу – это процесс приведения совокупности систем к общей шкале оценки ФСС – абсолютной шкале.

Таким образом, способность системы адекватно реагировать на внешние возмущения определяется длиной отрезков 1, 2, 3 и т.д., показанных на рисунке 3. В тоже время, переход системы в другой класс не связан напрямую с длинами этих отрезков, так как зависит еще от генотипа СФЕ. Тем не менее, очевидно, что величина реакции системы на внешнее воздействие определяется изменением соотношения резерв/ресурс, то есть переходом системы из одного дискретного состояния в другое. Поэтому при должном выборе индикаторных переменных, позволяющих определять переход системы из одного ФС в другое, можно осуществлять мониторинг эффективности управляющих воздействий. В частности, появляется возможность контролировать уровень опасности экологического загрязнения окружающей среды, степень эффективности лекарственных средств и их побочные реакции, формировать тесты на профессиональную пригодность и т.п.

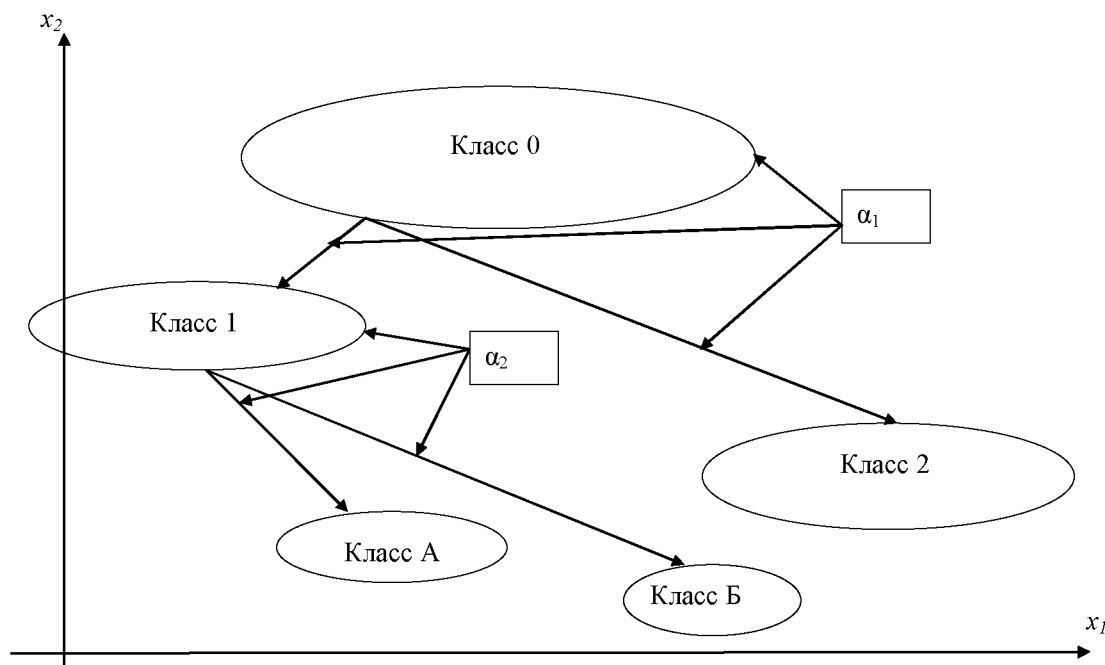


Рис. 4. Трансформация классов при одинаковых возмущающих факторах на континуум систем (на примере двух индикаторных переменных)

Пример использования модели ФСС на основе СФЕ для определения эффективности лекарственных назначений и побочных реакций. Сформируем выборку пациентов, описываемых различными латентными переменными $\theta_{k,i-1}$, и фиксированное внешнее воздействие (например, лекарственную дозу) α_j одинаковую для всех пациентов. Положительный эффект лекарственного назначения – активация/деактивация СФЕ третьего класса, отрицательный – их деактивация/активация. Будем считать, что при оптимальном сочетании латентной переменной θ и латентной переменной α (переменная α является латентной по отношению к обучающей или контрольной выборке), вероятности активации/деактивации всех вибрирующих СФЕ равны 0,5.

Все латентные переменные измеряются на одной шкале в относительных единицах. Следовательно, их значения лежат в диапазоне $[0,1]$. При высоком уровне α ($\alpha \gg \theta$) ФС изменяется у всех пациентов (активируются практически все СФЕ третьего класса и, следовательно, вероятность активации отдельной СФЕ стремится к единице). Наоборот, если α относительно мало ($\alpha \ll \theta$), то вероятность активации отдельной СФЕ третьего класса близка к нулю.

Таким образом, в качестве модели зависимости (4) для k -ого пациента из континуума можно использовать логистическую модель, которая представлена уравнением [10]:

$$P_{ki} = (\exp(\alpha_j - \theta_{k,i-1})) / (1 + \exp(\alpha_j - \theta_{k,i-1})). \quad (7)$$

Модель (7) позволяет перейти к мониторингу динамики ФС пациентов согласно уравнению (1). Для этого необходимо определить индикаторные (наблюдаемые) переменные. В качестве таких переменных можно использовать спектральные плотности медленных волн [13, 15]. При монотонном увеличении возмущающего воздействия (при лекарственном

назначении это длительность лекарственного воздействия) в момент, когда $\alpha_j = \theta_{i-1}$ индикаторная переменная имеет локальный экстремум, который назовем реперным сигналом.

При этом диапазон α разбивается на произвольное количество поддиапазонов $L > M$ и при каждом детектировании (обнаружении) реперного сигнала решается уравнение:

$$(\exp(\alpha_j - \theta_{k,i-1})) / (1 + \exp(\alpha_j - \theta_{k,i-1})) = 0,5. \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет получить ранжированный ряд ФС, которым соответствуют векторы индикаторных переменных. На основе этого ряда строится таблица экспериментальных данных для определения интерполирующей функции, аппроксимирующей функциональную зависимость (1). Интерполяция по (1) осуществляется для каждого пациента при условии, что на него осуществляется лекарственное воздействие в течение всего периода назначенной терапии. В случае отсутствия такой возможности, необходимо формировать обучающие выборки с известными ФС θ_i .

Согласно принятым гипотезам, ФСС θ характеризуется двумя параметрами y_1 и y_2 (см. рисунок 3) и связано с ними некоторой функциональной зависимостью:

$$\theta = f(y_1, y_2). \quad (9)$$

При нахождении системы в оптимальном состоянии (принимается соотношение между активированными СФЕ и резервными – «вибрирующими» СФЕ «50 : 50» %):

$$b = 0,5; \quad (10)$$

$$y_1 = (1/2)b. \quad (11)$$

Если ФСС определено ее резервом в этом состоянии, который вычисляется как:

$$y_2 = b - y_1, \quad (12)$$

то:

$$\theta_i = 1/2^i, \quad (13)$$

где i – номер ФС, принимающий значения чисел натурального ряда.

Согласно (7) вероятность перехода из одного ФС в другое при адекватном внешнем воздействии (например, равном 0,5), растет по мере снижения ФР в этом состоянии и в пределе стремится к величине $(0,5)\exp(0,5)=0,82$.

Если руководствоваться принципом «Золотого сечения» при определении соотношения между активированными СФЕ и резервными – «вибрирующими» СФЕ, то координата y_2 в номинальном режиме определяется из решения квадратного уравнения [5]:

$$y_2^2 + y_2 - 1 = 0. \quad (14)$$

Графики перехода пациента из одного ФС в другое, полученные посредством вышеописанных моделей, показаны на рисунке 5.

При построении моделей принималось во внимание, что переходы возможны только между дискретными состояниями θ_i , где i изменяется от единицы до бесконечности. В следующее ФС пациент переходит после того, как исчерпан резерв текущего состояния. При этом у моделирующей переходы функции имеет место разрыв первого рода, что обусловлено необходимостью использования части «вибрирующих» СФЕ данного состояния на поддержание системы в этом состоянии. Эти СФЕ могут перейти в резерв ФС, если $\theta_i > \alpha$. В противном случае, текущее состояние будет поддерживаться за счет потребления («задействования») СФЕ из резерва текущего состояния. При полном их потреблении система переходит в следующее ФС. Рассмотренная модель построена при условии паритетного соотношения между ресурсом и резервом состояний, а также между СФЕ резерва и СФЕ, используемыми для поддержки данного состояния.

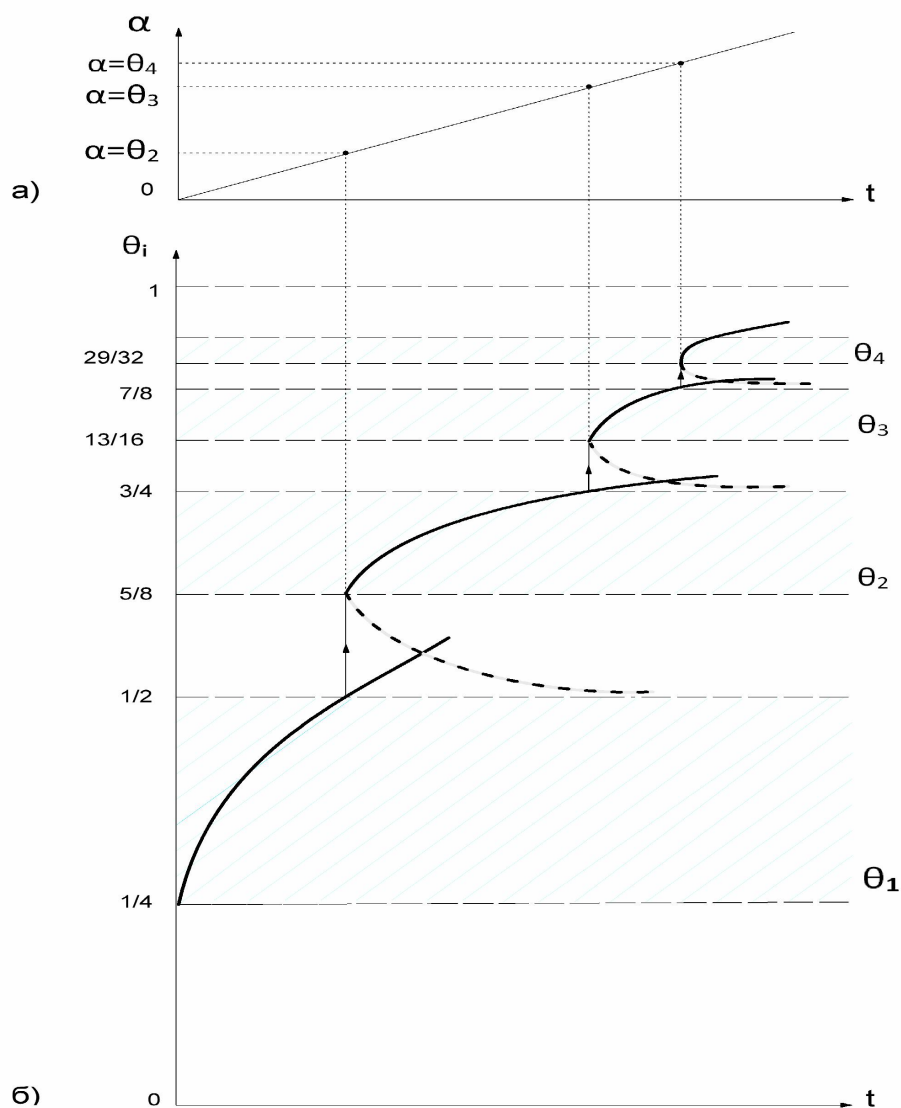


Рис. 5. Графические модели перехода системы из одного ФС в другое
(сплошной линией показаны переходы при $\theta > \alpha$, штриховой – в противном случае)

Итоги рассмотрения теоретического материала и их подтверждение результатами экспериментов.

1. Дискретное функциональное состояние системы через понятие структурно-функциональной единицы может быть описано двумя независимыми параметрами: числом структурно-функциональных единиц первого класса y_1 и третьего класса y_2 .

2. Поскольку параметры y_1 и y_2 являются не наблюдаемыми, то чтобы определить ФСС необходимо выбрать множество индикаторных переменных $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, которые, с одной стороны, были бы доступны для измерения, а с другой – достаточно полно отражали ФСС или ее подсистем на всех дискретных уровнях ФС θ .

3. Переход сложной системы из одного функционального состояния в другое связан с изменением числа активных СФЕ, которое может быть осуществлено как за счет «вибри-

рующих» СФЕ, так и за счет «включения в работу» невозбужденных СФЕ. Относительное число активизированных СФЕ зависит от параметров акции (действия) α и описано логической моделью.

4. На основе предложенных моделей может быть построен классификатор, посредством которого лицо, принимающее решение (ЛПР) будет выбирать соответствующую акцию (действие), позволяющую перевести систему из одного ФС в другое (желаемое) состояние.

5. Подставляя (1) в (7), а (7) в (9), ЛПР определяет оптимальные параметры акции, а также осуществляет, при необходимости, контроль динамики сложной системы как результат внешних управляемых воздействий.

6. Путем «размытия» третьего класса СФЕ, получаем «стробоскопическую» модель системы, представленную на рисунке 6, которая позволяет использовать для анализа и управления состоянием системы нечеткую логику принятия решений [9, 11, 16].

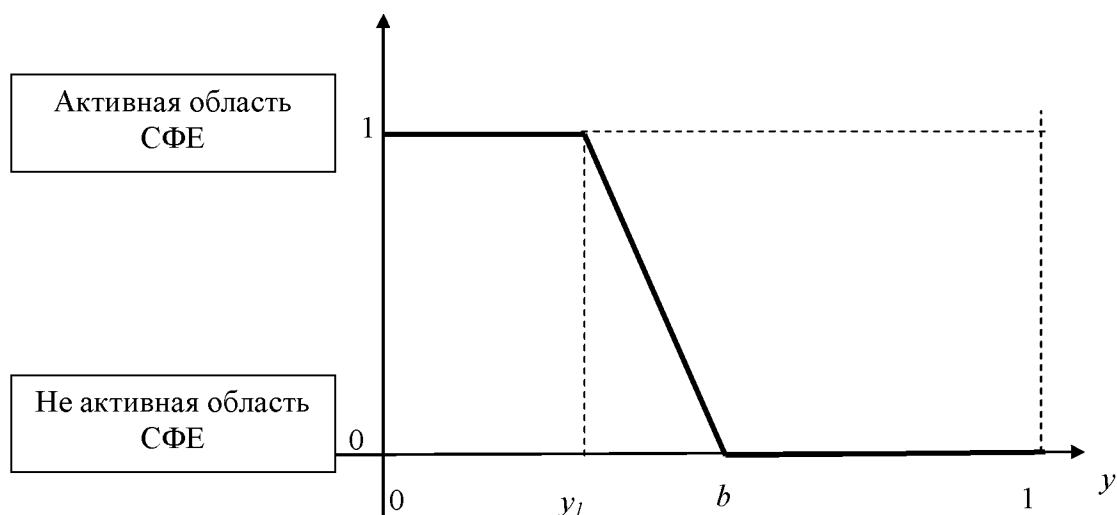


Рис. 6. Модель поведения ФСС при нечетком описании СФЕ третьего класса

Согласно этой модели, СФЕ, находящиеся в «вибрирующем» состоянии, определяются отрезком на оси абсцисс, заключенном между точками y_1 и b , и их состояние может описываться промежуточными значениями, заключенными между нулем и единицей.

7. Эксперименты с моделированием переходов системы из одного ФС в другое при мониторинге лекарственных воздействий показали, что в области $\theta_i \geq \alpha$ наблюдаются колебания реперного сигнала. Чем выше амплитуда его колебаний и больше коэффициент их затухания, тем выше положительный эффект лекарственных воздействий, и чем колебания более высокочастотные и низкоамплитудные, тем в более напряженном ФС находится система.

Список литературы

1. Анохин П.К. Избранные труды: Кибернетика функциональных систем / П.К. Анохин — М.: Медицина, 1998. — 400 с.
2. Антонов А.В. Системный анализ систем / А.В. Антонов — М.: Высшая школа, 2004 — 454с.
3. Брумштейн Ю.М. Функционально-стоимостные характеристики медицинских информационных систем: опыт системного анализа / Ю.М. Брумштейн, О.В. Сивер, А.Б. Кузьмина // Инженерный вестник Дона, 2014г.- №4, часть 2 [Электронный ресурс] ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2638 Дата обращения — 20.03.2015

4. Брумштейн Ю.М. Системный анализ направлений и особенностей информатизации сферы здравоохранения России / Ю.М. Брумштейн, Е.В. Скляренко, А.С. Мальвина и др. // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - Астрахань, 2013-№4. -С.73-86.
5. Васютинский Н. А. Золотая пропорция / Н. А. Васютинский — М.: Молодая гвардия. 1990. — 238 с.
6. Гайдес М.А. Общая теория систем (системы и системный анализ) / М.А. Гайдес // - Тель Авив: Госпиталь им. Хаима Шибы, Тель Ашмер, 2004. 360 с.
7. Дедов А.В. Использование при принятии диагностических решений результатов статистического анализа влияния вирусно-бактериальных маркеров на клиническую картину заболевания / А.В. Дедов, Г.А. Попов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии- 2014, №4-, 119-133 с.
8. Кеваль Джайн К. Персонализированная медицина / К. Кеваль Джайн // TERRA MEDICA NOVA. всероссийский журнал для врачей всех специальностей. 2009. № 1. С.4-9.
9. Корневский Н.А. Метод синтеза комбинированных нечетких правил принятия решений по оценке и коррекции состояния здоровья человека / Н.А. Корневский, Р.В. Рупкой, Е.Б. Рябова и др. // Системный анализ и управление в биотехнических системах, 2013, Т.12, №4.- С. 1075-1079.
10. Корневский Н.А. Синтез решающих правил для прогнозирования заболеваний желудка на основе модели Г. Раша / Н.А. Корневский, А.В. Бойцов, В.Г. Никитаев и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 5 (56). С. 69–76.
11. Корневский Н.А. Теория проектирования нечетких сетевых экспертных систем для управления медико-экологической безопасностью / Н.А. Корневский, С.А. Филист, А.Б. Красковский и др. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2009. № 9-1 (64) / том 11. С.146-151.
12. Мальвина А.С. Автоматизация, диспетчеризация и информатизация высокотехнологичных медучреждений как средство повышения эффективности их работы / А.С. Мальвина, Ю.М. Брумштейн, Е.В. Скляренко и др. // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии- 2014, №1. С.122-138.
13. Маслак А.А. Метод и алгоритм классификации сложных объектов на основе частотного и частотно-временного анализа медленных волн системных ритмов / А.А. Маслак, И.И. Волков и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №1(40). Часть 1. С.47-52.
14. Петленко И.П. Основы валеологии / И.П. Петленко - Книга 2, 1998. 335 с.
15. Филист С.А. Метод классификации сложных объектов на основе анализа структурных функций медленных волн / С.А. Филист, И.И. Волков, С.Г. Емельянов // Биомедицинская радиоэлектроника. №4. 2012. С.6-11.
16. Burak ErKayman A Fuzzy Topsis Approach For Logistics Center Location Selection / Burak ErKayman, Emin Gundogar, Gökay Akkaya, Mümtaz İpe // The 2011 New Orleans International Academic Conference. 2011. P. 515–521.

References

1. Anokhin P.K. Izbrannye trudy: Kibernetika funktsionalnykh sistem[Selected works: the Cybernetics of functional systems] / P.K. Anokhin — М.: Meditsina[Medicine], 1998. — 400 s.
2. Antonov A.V. Sistemnyy analiz sistem[System analysis systems] / A.V. Antonov – М.:Vysshaya shkola, 2004 – 454s.
3. Brumshteyn Yu.M. Funktsionalno-stoimostnye kharakteristiki meditsinskikh informatsionnykh sistem: opyt sistemnogo analiza[Functional and cost characteristics of medical information systems: the experience of system analysis] / Yu.M. Brumshteyn, O.V. Siver, A.B. Kuzmina // Inzhenernyy vestnik Dona, 2014g.- №4, chast 2 [Elektronnyy resurs] ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2638 Data obrashcheniya – 20.03.2015
4. Brumshteyn Yu.M. Sistemnyy analiz napravleniy i osobennostey informatizatsii sfery zdravookhraneniya Rossii[Systematic analysis of trends and characteristics of Informatization of healthcare of Russia] / Yu.M. Brumshteyn, Ye.V. Sklyarenko, A.S. Malvina i dr. // Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii[Caspian journal: management and high technologies]. - Astrakhan, 2013-№4.-S.73-86.

5. Vasyutinskiy N. A. Zolotaya propotsiya [Golden section] / N. A. Vasyutinskiy — M.: Molodaya gvardiya [The young guard]. - 1990. — 238 c.
6. Gaydes M.A. Obshchaya teoriya sistem (sistemy i sistemnyy analiz) [General systems theory (systems and system analysis)] / M.A. Gaydes // - Tel Aviv: Gospital im. Khaima Shiby, Tel Ashomer, 2004. 360 s.
7. Dedov A.V. Ispolzovanie pri prinyatii diagnosticheskikh resheniy rezultatov statisticheskogo analiza vliyaniya virusno-bakterialnykh markerov na klinicheskuyu kartinu zabolevaniya [Use when making diagnostic decisions the results of statistical analysis of the impact of viral and bacterial markers on the clinical picture of the disease] / A.V. Dedov, G.A. Popov // Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii [Caspian journal: management and high technologies]. - 2014, №4-, 119-133 s.
8. Keval Dzhayn K. Personalizirovannaya meditsina [Personalized medicine] / K. Keval Dzhayn // TERRA MEDICA NOVA. vserossiyskiy zhurnal dlya vrachey vseh spetsialnostey [TERRA MEDICA NOVA. national magazine for physicians of all specialties]. 2009. № 1. S.4-9.
9. Korenevskiy N.A. Metod sinteza kombinirovannykh nechetkikh pravil prinyatiya resheniy po otsenke i korrektsii sostoyaniya zdorovya cheloveka [Synthesis method combined fuzzy decision rules for the assessment and correction of the state of health of man] / N.A. Korenevskiy, R.V. Rutskey, Ye.B. Ryabkova i dr. // Sistemnyy analiz i upravlenie v biotekhnicheskikh sistemakh [System analysis and management in biotechnological systems]. - 2013, T.12, №4. - C. 1075-1079.
10. Korenevskiy N.A. Sintez reshayushchikh pravil dlya prognozirovaniya zabolevaniy zheludka na osnove modeli G. Rasha [Synthesis of decision rules to predict diseases of the stomach based on the model G. Rush] / N.A. Korenevskiy, A.V. Boytsov, V.G. Nikitaev i dr. // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of the southwestern state University]. - 2014. № 5 (56). S. 69-76.
11. Korenevskiy N.A. Teoriya proektirovaniya nechetkikh setevykh ekspertnykh sistem dlya upravleniya mediko-ekologicheskoy bezopasnostyu [The theory of design of fuzzy network expert systems to manage environmental health safety] / N.A. Korenevskiy, S.A. Filist, A.B. Kraskovskiy i dr. // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika [Scientific Bulletin of the Belgorod state University. Series: History. Political science. Economy. Informatics]. - 2009. № 9-1 (64) / tom 11. S.146-151.
12. Malvina A.S. Avtomatizatsiya, dispatcherizatsiya i informatizatsiya vysokotekhnologichnykh meduchrezhdeniy kak sredstvo povysheniya effektivnosti ikh raboty [Automation and Informatization of high-tech medical facilities as a means of improving the efficiency of their work] / A.S. Malvina, Yu.M. Brumshteyn, Ye.V. Sklyarenko i dr. // Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii [Caspian journal: management and high technologies]. - 2014, №1. S.122-138.
13. Maslak A.A. Metod i algoritm klassifikatsii slozhnykh obektov na osnove chastotnogo i chastotno-vremennogo analiza medlennykh voln sistemnykh ritmov [Method and algorithm for the classification of complex objects on the basis of frequency and time-frequency analysis of slow waves systemic rhythms] / A.A. Maslak, I.I. Volkov i dr. // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of the southwestern state University]. - 2012. №1(40). Chast 1. S.47-52.
14. Petlenko I.P. Osnovy valeologii [Bases of valueology] / I.P. Petlenko - Kniga 2, 1998. 335 s.
15. Filist S.A. Metod klassifikatsii slozhnykh obektov na osnove analiza strukturnykh funktsiy medlennykh voln [Method for the classification of complex objects based on the analysis of structure functions slow waves] / S.A. Filist, I.I. Volkov, S.G. Yemelyanov // Biomeditsinskaya radioelektronika [Biomedical electronics]. - №4. 2012. S.6-11.
16. Burak Erkeyman A Fuzzy Topsis Approach For Logistics Center Location Selection / Burak Erkeyman, Emin Gundogar, Gökay Akkaya, Mümtaz İpe // The 2011 New Orleans International Academic Conference. 2011. P. 515-521.