

КИБЕРНЕТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Выпуск 178

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1965 г.

Периодичность: 4 раза в год

КИЕВ 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Интеллектуальное управление и системы

Гриценко В.И., Гладун А.Я., Рогушина Ю.В. Семантическое распознавание информационных объектов на основе онтологического представления знаний о предметной области в задачах интеллектуального управления..... 5

Bobriakova I.L. Mathematical Modeling of Hypometabolism Process to Identify Peculiarities of Human Organism During the Work Under Condition of Highlands (*Бобрякова И.Л.* Математическое моделирование процесса гипометаболизма для выявления особенностей организма человека при работе в условиях высокогорья)..... 22

Павлов В.В., Волошенко Д.А., Волков А.Е. Сетецентрическая система управления посадкой самолетов по свободным траекториям с технологией решения возможных конфликтных ситуаций 36

Информатика и информационные технологии

Файнзильберг Л.С. Об одном подходе к персонификации диагностических решений на примере оценки сердечной деятельности 52

Писарчук А.А. Концепция идентификации контролируемых ситуаций на основе самоорганизации разнородных признаков 66

Медицинская и биологическая кибернетика

Lopata V.A., Popov A.A., Myasnyi I.S. Spectral analysis of airflow rate during forced expiratory process (*Лопата В.А., Попов А.А., Мясный И.С.* Спектральный анализ скорости воздушного потока в процессе форсированного выдоха)..... 82

Кузьмук В.В., Еремеев Б.Н., Тараненко Е.А. Моделирование сердечной деятельности на основе сетей Петри..... 91

Авторы номера 100

УДК 681.5 + 621.391:01

В журнале представлены результаты исследований в области теории и практики интеллектуального управления, информационных технологий, а также биологической и медицинской кибернетики.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.

У журналі надано результати досліджень у галузі теорії та практики інтелектуального керування, інформаційних технологій, а також біологічної та медичної кібернетики.

Для наукових співробітників, інженерів, аспірантів і студентів вузів відповідних спеціальностей.

The results of research in the field of theory and practice of information technologies, intellectual control, biological and medical cybernetics are presented.

It is intended for researchers, practical engineers, post-graduate students of corresponding specialties.

Редакционная коллегия

И.В. Сергиенко, акад. НАНУ, д.ф.-м.н., проф. (главный редактор),

В.И. Гриценко, к.т.н., проф. (главный редактор),

Л.М. Козак, д.б.н. (заместитель главного редактора),

Технические науки: Гарашенко Ф.Г., д.т.н., проф. (Киев), Губарев В.Ф., д.т.н., чл.-к. НАНУ, (Киев), Hänßgen Klaus, prof. (Leipzig, Germany), Кунцевич В.М., д.т.н., акад. НАНУ (Киев), Павлов В.В., д.т.н., проф. (Киев), Тимофеева Н.К., д.т.н. (Киев), Файнзильберг Л.С., д.т.н. (Киев).

Физико-математические науки: Анисимов А.В., д.ф.-м.н., чл.-к. НАНУ (Киев), Глибовец Н.Н., д.ф.-м.н., проф. (Киев), Гупал А.М., д.ф.-м.н., чл.-к. НАНУ (Киев), Модрухович Б.Ш., д.ф.-м.н., проф. (Detroit, USA), Онопчук Ю.Н., д.ф.-м.н., проф. (Киев), Ченцов А.Г., д.ф.-м.н., чл.-корр РАН (Екатеринбург, Россия), Чикрий А.А. д.ф.-м.н., чл.-к. НАНУ (Киев), Шлезингер М.И., д.ф.-м.н., проф. (Киев).

Медицинские науки: Белов В.М., д.м.н., проф. (Киев), Бычков В.В. д.м.н. (Киев), Ganushchak Yuri, MD, PhD (Maastricht, Netherlands), Годлевский Л.С., д.м.н., проф. (Одесса), Голубчиков М.В., д.м.н., проф. (Киев), Коваленко А.С., д.м.н., проф. (Киев), Майоров О.Ю., д.м.н., проф. (Харьков).

Биологические науки: Антомонов М.Ю., д.б.н., проф. (Киев), Кальниш В.В., д.б.н., проф. (Киев), Кифоренко С.И., д.б.н. (Киев), Книгавко В.Г., д.б.н., проф. (Харьков), Котова А.Б., д.б.н., проф. (Киев), Лябах Е.Г., д.б.н. (Киев), Navakatikyan Michael, PhD, BSc (Australia).

Научные разделы:

Информатика и информационные технологии

Интеллектуальное управление и системы

Медицинская и биологическая кибернетика

Журнал «Кибернетика и вычислительная техника» включен в перечень профильных изданий ВАК Украины по техническим, биологическим, медицинским и физико-математическим наукам.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Утверждено к печати ученым советом
Международного научно-учебного центра
информационных технологий и систем НАН Украины
и Министерства образования и науки Украины (протокол №13 от 27.11.2014)
План выпуска 2014 г.

Адрес редколлегии:
03680 Киев ГСП, просп. Академика Глушкова, 40
Международный научно-учебный центр
информационных технологий и систем НАН Украины
и Министерства образования и науки Украины
Тел: 503 95 62. E-mail: kvt@irtc.org.ua сайт: kvt.irtc.org.ua

Редактор *А.В. Ковалевский*. Компьютерная верстка *А.В. Тупальский*

Свидетельство о государственной регистрации КВ № 12649-1533Р от 14.05.2007

КИБЕРНЕТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Issue 178

SCIENTIFIC JOURNAL

Founded in 1965

Periodicity: 4 issues per year

KIEV 2014

TABLE OF CONTENTS

Intellectual Control and Systems

<i>Gritsenko V.I., Gladun A.Ya., Rogushina Yu.V.</i> Semantic Recognition of Information Object Based on Ontological Representation of Domain Knowledge in Problems of Intellectual Management.....	5
<i>Bobriakova I.L.</i> Mathematical Modeling of Hypometabolism Process to Identify Peculiarities of Human Organism During the Work Under Condition of Highlands	22
<i>V.V. Pavlov, A.E. Volkov, D.A. Voloshenyuk</i> The Networkcentric Management System for Landing Planes by the Free Path Using Technology of Conflict Situation Resolution	36

Informatics and Information Technologies

<i>Fainzilberg L.S.</i> An Approach to Diagnostic Personification Decisions on the Example of Evaluation of Cardiac Activity.....	52
<i>Pisarchuk A.A.</i> Conception of Identification Signs of the Controlled Situations on Basis of Self-Organisation of Heterogeneous Signs.....	66

Medical and Biological Cybernetics

<i>Lopata V.A., Popov A.A., Myasnyi I.S.</i> Spectral Analysis of Airflow Rate During Forced Expiratory Process.....	82
<u>Kuzmuk V.V.</u> , <i>Yeremeev B.N., Taranenko E.A.</i> Heart Modeling on the Basis of Petri Nets.....	91

Our authors	100
--------------------------	-----

КІБЕРНЕТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Випуск 178

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
Заснований у 1965 р.
Періодичність: 4 рази на рік

КИЇВ 2014

ЗМІСТ

Інтелектуальне керування та системи

- Гриценко В.І., Гладун А.Я., Рогушина Ю.В.* Семантичне розпізнавання інформаційних об'єктів на основі онтологічного представлення знань про предметну область в задачах інтелектуального керування..... 5
- Бобрякова І.Л.* Математичне моделювання процесу гіпометаболізму для виявлення особливостей організму людини при роботі в умовах високогір'я..... 22
- Павлов В.В., Волошенюк Д.О., Волков О.Є.* Концепція мережецентричного керування посадкою літаків за вільними траєкторіями з технологією вирішення конфліктних ситуацій 36

Інформатика та інформаційні технології

- Файнзільберг Л.С.* Про один підхід до персоніфікації діагностичних рішень на прикладі оцінки серцевої діяльності 52
- Писарчук О.О.* Концепція ідентифікації контрольованих ситуацій на основі самоорганізації різнорідних ознак..... 66

Медична та біологічна кібернетика

- Лопата В.О., Попов А.О., М'ясний І.С.* Спектральний аналіз швидкості потоку повітря в процесі форсованого видиху..... 82
- Кузьмук В.В., Єремєєв Б.М., Тараненко О.А.* Моделювання серцевої діяльності на основі мереж Петрі..... 91

- Інформація про авторів** 100

Системы и интеллектуальное управление

УДК 004.822

СЕМАНТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ О ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.И.Гриценко¹, А.Я. Гладун¹, Ю.В.Рогущина²

¹*Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины*

²*Институт программных систем НАН Украины*

В работе проанализированы особенности семантического распознавания информационных объектов в сведениях, доступных через Web. В качестве примеров рассматривается обнаружение устройств в Internet of Things, обнаружение Web-сервисов и поддержка информационной службы экстренного вызова. Для решения проблемы семантического распознавания в данной работе предложен переход на новый качественный уровень при обработке информации — использование обработки на семантическом уровне.

Ключевые слова: онтология, информационный объект, Semantic Web, OWL, распознавание объектов.

У роботі проаналізовано особливості семантичного розпізнавання інформаційних об'єктів у відомостях, доступних через Web. У якості прикладів розглядається виявлення пристроїв в Internet of Things, виявлення Web-сервісів та підтримка інформаційної служби екстреного виклику. Для вирішення проблеми семантичного розпізнавання в цій роботі запропоновано перехід на новий якісний рівень при обробці інформації — використання обробки на семантичному рівні.

Ключові слова: онтологія, інформаційний об'єкт, Semantic Web, OWL, розпізнавання об'єктів.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в области информационных технологий (ИТ) происходят глобальные изменения в организации и использовании информационных ресурсов (ИР), непосредственно связанных с интеллектуализацией ИТ, и созданных на их основе прикладных информационных систем, которые функционируют в открытой и динамической информационной Web-среде.

В реальном мире нас окружают разнообразные материальные объекты, наличие информации о которых обеспечивает возможность взаимодействия с ними и использования для своих нужд. Однако совокупность сведений об объектах реального мира порождает другой мир — виртуальный, где существует только информация. Этому виртуальному миру мы даем разнообразные названия, одно из которых — информационное пространство.

© В.И.Гриценко, А.Я. Гладун, Ю.В.Рогущина, 2014

ISSN 0452-9910. Кибернетика и вычисл. техника. 2014. Вып. 178

Познание реального мира происходит через это информационное пространство, которое представляет собой некоторую информационную картину мира [1].

Человек формирует собственное представление о реальном мире, получая и осмысливая информацию о каждом реальном объекте, процессе или явлении. При этом у каждого существует своя информационная картина мира, которая зависит от множества факторов как субъективного, так и объективного порядка, на что влияет уровень образованности человека.

Моделирование является одним из способов познания реального мира и, прежде всего, оно связано с отбором необходимой информации и построением модели. Информационное пространство представляет собой модель реального мира, доступную сознанию человека. Однако любая информационная модель отражает реальный объект только в ограниченном аспекте — в соответствии с поставленной человеком целью.

Существует непрерывная связь между моделями и объектами реального мира. Если иметь дело только с моделями, то исчезнет такое понятие, как адекватность. Устранив объект, мы тем самым разорвем виртуальную связь, устанавливающую объектно-модельное отношение. Поэтому модели находятся в динамическом развитии, совершенствовании на основе реальных объектов и превращаются в некоторый самостоятельный объект, который представляет собой совокупность информации об этом объекте.

Для того чтобы эффективно обнаруживать в Web-ресурсах сведения, необходимые пользователю для решения стоящих перед ним проблем, представляется целесообразным вначале определить, какие именно информационные объекты интересуют пользователя, т.е. построить формальную модель, описывающую свойства множества соответствующих информационных объектов и позволяющую отличать их от других, а затем использовать знания об их структуре, представленные в этой модели, для того, чтобы распознавать конкретные значения их свойств.

Цель данной работы заключается в разработке концептуального подхода к построению формальной онтологической модели информационных объектов в виртуальном информационном Web-пространстве и создания методики использования этой модели для восприятия, распознавания, интерпретации и обработки этих объектов в задачах интеллектуального управления.

Информационный объект (ИО) — представление (модель) объекта предметной области (ПрО) в информационном пространстве, которое определяет структуру, атрибуты, ограничения целостности и, возможно, поведение этого объекта [2].

ТАКСОНОМИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Материальный объект — элемент действительности, взятый без связи со временем, который имеет характеристики, может вступать в отношения и является результатом выделения из некоторой совокупности.

Объект (с точки зрения программирования и, в частности, объектно-ориентированного подхода) представляет собой некоторую сущность в

виртуальном пространстве, которая имеет определенное состояние и поведение, т.е. заданные значения свойств (атрибутов), и для которой определены операции над ними (методы). Как правило, при исследовании объектов выделяется то, что каждый объект принадлежит одному или нескольким классам, которые в свою очередь обуславливают поведение объекта, т.е. являются его моделью.

Информационный объект является расширением программного объекта и представляет собой некую сущность, содержащую в себе сведения в информационной системе о каком-либо реальном или виртуальном объекте (предмете, существе, событии, процессе и т.д.) — уникально идентифицированной материальной или нематериальной сущности реального мира, которая описывает структуру ИО, атрибуты, ограничение целостности и, возможно, поведение. Например, объектом может быть человек, публикация, организация, город, а информационным объектом — их описание.



Рис. 1. Структурная схема информационных объектов, представленных в распределенной Web-среде

В концепции Semantic Web и информационном Web-пространстве информационными объектами являются и такие объекты нематериального мира, как онтологии, программные агенты, Web-сервисы, информационные ресурсы, метаданные, базы данных и т.д. В информационном пространстве, также как и в реальном мире, существует множество информационных объектов, что требует в свою очередь разработки моделей, алгоритмов и методов для решения задач поиска (обнаружения), распознавания, восприятия, интерпретации, компоновки и выбора ИО.

На рис. 1 представлена таксономия информационных объектов, где реальные объекты представлены их моделями в информационном пространстве. Одной из насущных проблем информационного Web-пространства является поиск информации и знаний и распределенная

обработка информации.

Научный труд, газетная статья, приказ — примеры ИО в виде текстовых документов. Рисунки, чертежи, схемы — это ИО в виде графических документов. Ведомость начисления заработной платы, таблица стоимости произведенных покупок в оптовом магазине, смета на выполнение работ и прочие виды документов в табличной форме, где производятся автоматические вычисления по формулам, связывающим ячейки таблицы, — это примеры ИО в виде электронных таблиц. Результат выборки из базы данных — это тоже ИО.

Довольно часто мы имеем дело с составными документами, в которых информация представлена в разных формах. Такие документы могут содержать и текст, и рисунки, и таблицы, и формулы, и многое другое. Научные статьи, отчеты, книги — это примеры составных документов, являющихся ИО сложной структуры. Другими примерами сложных ИО могут служить создаваемые на компьютере презентации и гипертекстовые документы.

На основе представленной структурной схемы информационных объектов, и используя соответствующие инструментальные средства, мы разработали TaxPRO — таксономию информационных объектов, существующих в распределенной Web-среде на формализованном онтологическом языке, что позволяет прикладным программам использовать этот объект при выполнении своих задач.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОБЪЕКТЫ В WEB

Информационную модель, которая не имеет непосредственной связи с объектом из материального мира, тоже можно считать объектом, но не материальным, а информационным [3]. Таким образом, информационный объект получается из информационной модели путем «отчуждения» информации от объекта-оригинала. Как правило, ИО возникают в результате сознательной или несознательной целенаправленной деятельности людей, но могут также порождаться компьютерами (программами), например, нелинейно взаимодействующими информационными потоками в компьютерных сетях и пр.

Сам объект предметной области может быть как материальным (например, человек, организация, место), так и виртуальным, не имеющим конкретного материального эквивалента (например, книга, программа), хотя и связанного с тем или иным материальным носителем информации. Кроме того, объект ПрО может представлять собой чисто абстрактное понятие, в принципе не связанное с конкретным носителем информации и отображаемое лишь в сознании человека (например, «время», «мораль»).

Объект ПрО является синонимом экземпляра объекта – это уникально идентифицированная материальная или нематериальная сущность реального мира. Объекты имеют состояние и, возможно, явным образом специфицированное поведение. Примерами объектов могут служить личности, определенные предметы или их части, явления, события или процессы, которые с ними связаны. В распределенном информационном

Web-пространстве — это объекты нематериального мира: онтологии, программные агенты, Web-сервисы, метаданные, информационные ресурсы (ИР), которые могут быть как активными, так и пассивными.

ПРОБЛЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ В СЕМАНТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Как известно, проблема распознавания образов (изображений) является одной из наиболее фундаментальных проблем информатики и теории интеллектуальных систем, которая имеет огромное практическое значение. Распознавание образов — это научная проблема, целью которой является классификация объектов по нескольким категориям или классам с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные, из общей массы несущественных данных [4]. В традиционном распознавании объекты называются образами. Связано это с тем, что информация о многих объектах и явлениях в настоящее время регистрируется и хранится в виде цифровых изображений [5].

Проблема распознавания, как отдельная научная проблема и как научное направление, возникла и развивается с конца 50-х годов прошлого века и в настоящее время получает все большую значимость и все более широкое распространение. Трудно назвать такую сферу деятельности, где не используется задача распознавания. Проблема распознавания в глобальном масштабе (в материальном и нематериальном мире) определяется как отнесение исходных данных к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные, из общей массы несущественных данных.

В информатике распознавание образов — раздел информатики и смежных дисциплин, развивающий основы и методы классификации и идентификации предметов, объектов, явлений, процессов, сигналов, ситуаций и т. п., которые характеризуются конечным набором некоторых свойств и признаков.

Классическая постановка задачи распознавания образов [6] может быть сформулирована следующим образом:

- задано конечное множество классов P , $P = \{p_j\}, j = \overline{1, m}$;
- задано конечное множество объектов O , $O = \{o_i\}, i = \overline{1, n}$, о каждом из которых известно, что он может быть однозначно отнесен к одному из классов из P : $\forall o_i \in O \exists p_j \in P: o_i \in p_j$;
- каждый объект $o_i = \langle a_{i_1}, \dots, a_{i_k} \rangle$ из O обладает набором из k свойств $A_q, q = \overline{1, k}$ таких, что $a_{i_q} \in A_q$;
- задано классифицированное подмножество объектов (обучающая выборка) $O_{Cl} \subseteq O$ такое, что $\forall o_i \in O_{Cl}$ известно, к какому именно классу $p_j \in P: o_i \in p_j$ относится этот объект.

Необходимо определить, к каким классам относятся все объекты из O .

Для объектов реального мира типовая постановка задачи классификации

предполагает выделение определенного конкретного объекта среди подобных ему (например, узнать среди множества школьников своего ребенка).

В наиболее общем случае задача распознавания может быть разделена на две подзадачи, которые выполняются итеративно до получения приемлемого результата:

Шаг 1. Построение гипотезы о том, к каким классам могут относиться объекты, и как именно характеризуются объекты внутри класса;

Шаг 2. Отнесение конкретного объекта к одному из этих классов.

Если на 2-м этапе распознавание оказывается unsuccessful, то необходимо вернуться к шагу 1 и сформировать другое множество классов (расширить начальное множество или изменить критерии принадлежности к классу). Например, услышав звук шагов в квартире, человек может предположить, что их издает другой человек — так как ему известно о наличии в помещении других людей. Однако если затем он слышит, например, мяуканье, то он может предположить, что источником звуков является либо кошка, либо работающий телевизор.

В *информационном пространстве Web* задача распознавания объектов непосредственно связана с информационным поиском и той целью, для которой пользователь осуществляет этот поиск. В отличие от реального мира инициатором распознавания является сам пользователь, так как он получает сведения из информационного пространства лишь в ответ на какие-то свои действия.

Задачу распознавания в таком случае можно разделить на несколько этапов (рис.2):



Рис. 2. Этапы распознавания ИО в Web

Этап 1. Проанализировав возникшую перед пользователем цель, необходимо определить, к какому классу относится необходимый ему информационный объект.

Для этого есть несколько возможных путей:

- выбрать явным образом класс искомого ИО из таксономии ИО (например, «Web-сервис», «сотрудник», «статья», «организация»;
- задать свойства и ограничения для искомого ИО с целью автоматического обнаружения этого класса в таксономии ИО (например, «возраст», «фамилия», «профессия», «URL-адрес», «количество страниц» — обнаружение будет успешным, если заданный набор свойств не противоречив и может принадлежать одному ИО;
- задать примеры ИО, относящихся к этому классу, приведя указания на экземпляры ИО этого класса (например, «Келли Лада де Мандрака» позволит идентифицировать класс «собака», а «ISBN 978-3-659-56520-5» — класс «публикация»).

Кроме описания того класса $p_{ИО} \in P$, к которому относится искомый ИО, следует задать связи этого класса с другими семантически связанными классами ИО:

- подклассы $p_{подкласс}, p_{подкласс} \in P: \forall o \in p_{подкласс} \Rightarrow o \in p_{ИО}$;
- надклассы $p_{надкласс}, p_{надкласс} \in P: \forall o \in p_{ИО} \Rightarrow o \in p_{надкласс}$;
- классы, к которым относятся свойства объектов $o_i = \langle a_{i_1}, \dots, a_{i_k} \rangle$ из O $A_q, q = \overline{1, k}$, если эти свойства также являются классами $A_q \in P$.

Этап 2. Сформировать массив информации, в котором надо найти сведения об ИО.

Для этого можно:

- явно указать адрес хранилища структурированных сведений выбранного класса (например, адрес репозитория онтологий или Web-сервисов);
- указать критерий поиска в Web (поисковый запрос, переадресуемый внешней информационно-поисковой системе);
- задать перечень ИР, релевантных решаемой задаче, в которых неявным образом (неструктурированно) содержатся сведения о распознаваемом ИО.

Этап 3. Сформировать ограничения на ИО выбранного класса, удовлетворяющие потребностям пользователя. Для этого надо — явно или неявно — связать свойства ИО с приемлемыми или неприемлемыми их значениями. Чем более точно задан на этапе 1 класс искомого ИО, тем более детализированно могут быть заданы эти условия. Например, если на этапе 1 было определено, что ИО относится к классу «человек», то в условиях можно задавать его фамилию и возраст, но если ИО был отнесен к классу «сотрудник», являющемуся подклассом класса «человек», то для него можно определять значения таких свойств, как «профессия», «место работы» и «стаж».

Например, если пользователю для каких-то целей надо найти научных сотрудников, проживающих на территории Украины и имеющих не менее 100 научных публикаций, то при распознавании нужно будет распознавать их

место работы, место жительства и должность, и не будут учитываться такие свойства людей, как возраст или наличие домашних животных.

Этап 4. Осуществить распознавание сведений об искомым ИО, которое сводится к семантической разметке набора ИР, сформированного на этапе 2, понятиями (свойствами), выделенными на этапе 3.

При этом могут применяться методы лингвистического анализа, распознавания речи и изображений (для анализа мультимедийных ИР), а также средства менеджмента знаний, направленные на автоматизированное использование знаний о структуре искомым ИО, представленных в интероперабельной форме, допускающих автоматизированную обработку.

Кроме того, для интероперабельного представления знаний соответствующих ПрО целесообразно использовать онтологии, используемые в качестве их формальных моделей. Понятия онтологий позволяют семантически аннотировать свойства классов и их значения. Например, достаточно часто при обнаружении ИО, относящихся к классу «Web-сервис», именно онтологический подход позволяет семантически аннотировать их входы и выходы.

ОНТОЛОГИИ КАК ИСТОЧНИК СВЕДЕНИЙ О СТРУКТУРЕ ИО

Достаточно очевидно, что задание иерархии классов той или иной предметной области, а также свойств этих классов, является сложной и трудоемкой задачей, требующей как экспертных знаний об этой ПрО, так и навыков, связанных с менеджментом знаний. Поэтому целесообразно использовать такие формализованные и интероперабельные модели ПрО, как онтологии, в которых эти знания представлены явным образом и пригодны для автоматизированной обработки различными программными средствами. На сегодня онтологии фактически стали стандартом для представления знаний в Web.

При этом следует учитывать, что сегодня Web обеспечивает доступ к большому количеству онтологий как верхнего уровня, так и различных достаточно узких ПрО. В частности, ряд языков, стандартов, методов и программных средств создания и развития онтологий был разработан в рамках проекта Semantic Web, а на их основе уже создано достаточно много прикладных онтологий.

Научить компьютер (программу) распознавать смысл ИО (его семантику), интерпретировать эти объекты и на этой основе создать Web нового поколения, Semantic Web, — это проблема, над которой активно работают многочисленные исследователи в мире, и это направление в ИТ является сегодня актуальным и получает все более широкое развитие.

Проект Semantic Web направлен на то, чтобы дать информации "четкое значение, позволяя компьютерам и людям работать в тесном и более эффективном и плодотворном сотрудничестве" [7]. При этом для решения представленной проблемы предлагается переход на новый качественный уровень при обработке информации — использование обработки на семантическом уровне.

Целью проекта Semantic Web является преобразование всей

совокупности информационных ресурсов Web в единую базу знаний, пользоваться которой могут как люди, так и программы. Для этого необходимо снабдить каждый ресурс описанием его семантики и предоставить средства для автоматизированной обработки этих описаний и представления знаний о них [8].

Автором этой концепции является Т. Бернерс-Ли, который ранее задумал и разработал Web, а теперь возглавляет Консорциум W3. Целью Бернерса-Ли было сформировать информационное пространство, к которому каждый имеет непосредственный и интуитивный доступ, и не только для просмотра, но и для создания информации. Компьютеры становятся способными анализировать все данные в Web — контент, связи и транзакции между людьми и компьютерами. Эта концепция была принята и продвигается Консорциумом W3 — лидером в развитии технологий для Web (многие из основополагающих технологий, таких, как XML и RDF [9], были разработаны именно W3C).

Для её внедрения предполагается создание сети документов, содержащих метаданные о ресурсах Web, тогда как сами ресурсы предназначены для восприятия человеком, метаданные используются машинами (поисковыми роботами и другими интеллектуальными агентами).

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ В SEMANTIC WEB

В Semantic Web информации придают четкое значение (смысл), что улучшает доступ компьютеров и людей к информации и обеспечивает их совместную работу в тесном сотрудничестве. Для того, чтобы Web достигла своего полного потенциала, она должна трансформироваться в Semantic Web, обеспечивая универсально доступную платформу, позволяющую при этом распределенным данным быть обработанными как программами, так и людьми.

Средства подхода Semantic Web — это набор методов и технологий, предназначенных для представления информации в пригодном для машинной обработки виде. Эти средства позволяют представлять информацию в виде семантической сети, специфицированной с помощью онтологий. Благодаря стандартизованному представлению программа-клиент может непосредственно извлекать факты и делать из них логические заключения, используя протокол HTTP и идентификаторы ресурсов URI. Использование средств Semantic Web становится в последние годы актуальным для разработки интеллектуальных приложений.

С точки зрения распознавания ИО важно, что Semantic Web является источником семантической метаинформации о распределенных ИО и ИР, аннотируя их контент и обеспечивая возможность автоматизированного извлечения из них сведений об искомым ИО.

При этом задачи традиционного распознавания образов и семантического распознавания становятся, по сути, очень близкими. Можно сказать, что задача распознавания образов является подклассом более общей и глобальной задачи распознавания материальных и нематериальных объектов, с которыми взаимодействует человек в своей деятельности.

В семантическом распознавании проблема восприятия, распознавания и интерпретации объектов — комплексная проблема, которая разбивается на отдельные подзадачи [10]. Например, программные агенты должны воспринимать окружающую среду для успешного выполнения поставленных перед ними задач, агенты могут распознавать других агентов в мультиагентной системе для совместного выполнения задачи. Задача поиска информации и знаний — это поиск релевантных объектов для задач функционирования интеллектуальной информационной системы (ИИС), также как и проблема содержательной интерпретации объектов (онтология дает содержательное описание объекта).

Например, пользователю необходимо найти набор исполнителей для выполнения определенной НИР или проекта. Онтология ПрО позволяет узнать, что искомым объектом является сущность, относящаяся к классу «человек» и обладающая такими параметрами, как образование, стаж, навыки, наличие публикаций, ученой степени, дипломов и опыта работы и т.д. Но только наличие соответствующей онтологии позволяет структурировать сведения, извлекаемые из ИР, с точки зрения конкретной проблемы, так как при решении другой проблемы информация, извлекаемая из тех же ИР о тех же самых людях, может быть совсем иной (например, при обнаружении эффективных способов лечения пациентов с похожими симптомами или при поиске владельцев собак одной породы).

Традиционное распознавание образов, распознавание речи и распознавание текста являются лишь частными случаями значительно более общей проблемы. Распознавание предполагает обнаружение в каком-либо информационном ресурсе (ИР) сведений о том или ином информационном объекте (ИО), интересующем пользователя [11]. Например, распознавание лиц — это обнаружение в графическом ИР элементов, характеризующих внешние данные ИО типа «человек».

Основопологающим понятием Semantic Web является онтология. Одним из определений понятия «онтология» является понятие «концептуализация», под которым понимается строгое описание системы понятий, объектов и других сущностей и отношений между ними. Можно сказать, что концептуализация — это абстрактное, упрощенное видение мира, который мы стремимся представить для каких-то целей. Таким образом, концептуализация расчленяет какую-либо область знаний, которая существует в целостном виде, выделяет из этой области отдельные объекты, а потом формулирует отношения, присущие для данной области. Основная часть формально представленного знания базируется на концептуализации; каждая база знаний или система, которая базируется на знаниях, явным образом или неявно связывается с какой-то концептуализацией.

Созданные на основе семантических технологий ИТ отличаются от традиционных тем, что используют явно выраженные (в виде онтологии) знания о предметной области, где онтология выступает как средство формализации знаний. ИО имеют заложенное в них человеком или программой поведение и взаимодействуют как с информационным, так и с физическим пространством. В последнем случае взаимодействие осуществляется через физических носителей (людей).

Онтологию можно рассматривать как основу для представления структуры ИО, т.е. класс онтологии, а различные ИР — как источник для создания экземпляров этого объекта [13]. Такой подход позволяет интегрировать информацию, поступающую из различных источников, и сформировать необходимые пользователю знания. При этом задача подразделяется на несколько подзадач:

- *формирование (или поиск) онтологии*, отражающей структуру ИО (или множества объектов), знания о которых необходимы пользователю для решения стоящей перед ним проблемы;
- *поиск ИР*, явно или неявно содержащих сведения об этих ИО;
- *извлечение знаний об ИО* из ИР;
- *представление извлеченных знаний в форме, понятной и удобной пользователю.*

Следует отметить, что во многих случаях этот процесс является итеративным и при повторном решении проблемы информацию об ИО необходимо обновлять, извлекая необходимые сведения из тех ИР, которые доступны пользователю (например, через Web или корпоративную сеть).

РАСПОЗНАВАНИЕ WEB-СЕРВИСОВ

Рассмотрим в качестве примера распознавание сведений о таком ИО, как Web-сервис. Концепция Web-сервисов возникла в конце 90-х гг. XX века, и их архитектура базируется на протоколах SOAP, UDDI и WSDL. Стандарт SOAP (Simple Object Access Protocol) — протокол для посылки сообщений по HTTP; WSDL (Web Services Description Language) — язык для описания программных интерфейсов Web-сервисов; UDDI (Universal Description, Discovery and Integration) — стандарт индексации Web-сервисов.

Используя OWL-S (Web Ontology Language for Services), Web-сервис может сообщать о своих функциональных возможностях потенциальным пользователям. Описание OWL-S для сервиса состоит из профиля, модели и обоснования сервиса (рис. 3) [14].

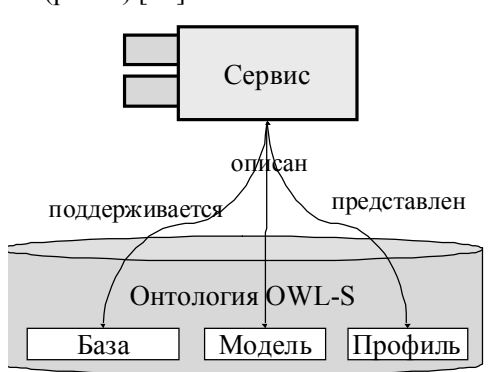


Рис. 3. Структура OWL-S описания Web-сервиса

Чтобы использовать Web-сервис, нужно интерпретировать компьютерам описание сервиса и средств доступа к нему, т.е. решить проблему распознавания нужного пользователю сервиса из множества других сервисов,

содержащихся в репозитории. Информацию о том, какие функции предоставляет данный Web-сервис, дает нам его WSDL-описание, а UDDI-реестры используются для поиска существующих Web-сервисов. Самой большой проблемой при обнаружении сервисов является их распределенный характер.

На основе языка онтологий OWL разработан язык для сервисов OWL-S. Цель разработки OWL-S состоит в том, чтобы сделать возможным использование логического вывода для Web-сервисов, планирование компоновки Web-сервисов, автоматическое применение сервисов программными агентами. OWL-S обеспечивает декларативные описания свойств Web-сервиса и возможности, которые могут использоваться для автоматического обнаружения сервиса.

На рис. 4 показано, как OWL-S используется для распознавания Web-сервисов.

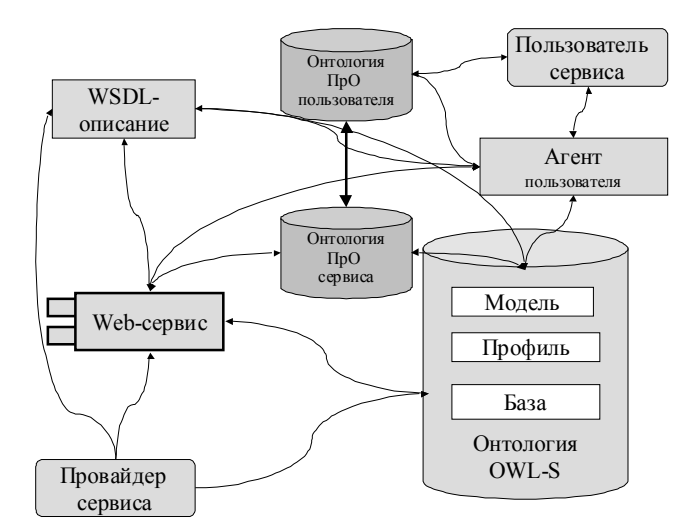


Рис. 4. Процесс распознавания Web-сервиса

Для описания функциональных возможностей Web-сервиса можно использовать семантические аннотации в соответствии со спецификацией OWL-S. Запрос ссылается на онтологию домена на языке OWL, которая может аннотировать запрос на основе общей семантики. Онтологический инжиниринг играет ведущую роль в добавлении семантики к описанию Web-сервисов. Описание OWL-S содержит:

- *ServiceProfile*, включающий в себя общую информацию, такую как имя, описание, входы и выходы;
- *ServiceModel*, описывающий, как действует функция Web-сервиса;
- *ServiceGrounding*, показывающий, как связаться с Web-сервисом.

Среди трех видов информации, предоставляемой в соответствии с описанием OWL-S, для аннотирования Web-сервиса наиболее интересны понятия профиля OWL-S (входы и выходы) и *ServiceGrounding*. Поскольку оба эти понятия являются полезными для поиска и композиции Web-сервисов, то понятие *ServiceGrounding* базируется на следующих принципах соответствий между OWL-S и WSDL:

- атомарный процесс OWL-S соответствует операции в WSDL;
- вход или выход атомарного процесса соответствуют сообщению в WSDL;
- типы сообщений атомарного процесса соответствуют абстрактным типам в WSDL.

Описание запроса выглядит следующим образом. Запрос рассматривается как сервис Semantic Web в OWL-S. Любой запрос, представленный клиентом, анализируют с помощью парсера (синтаксического анализатора), который извлекает только те параметры, которые необходимы для композиции (входы и выходы).

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ИО

Реальными примерами использования семантического подхода к распознаванию ИО явился ряд международных проектов, подготовленных нами в рамках европейской программы научных исследований и технологического развития Horizon–2020 (2014–2020). Один из проектов главной целью имел реализацию семантической интероперабельности в гетерогенной среде Интернета вещей [15]. Как известно, концепция Интернета вещей (Internet of Things, IoT) предполагает объединение вещей (физических объектов), используя Интернет-протоколы для решения задач в разных сферах деятельности человека (экономия энергоемких ресурсов, городской и другие виды транспорта, промышленность, безопасность человека и многие другие). Концепция IoT предусматривает технологии взаимодействия вещей друг с другом или с внешней средой, что может перестроить экономические и общественные процессы, при этом исключая из части действий и операций необходимость участия человека. Задача семантической интероперабельности предполагает онтологическое представление знаний об устройстве — семантическим описанием (онтология — модель знаний), а также наделение каждого устройства определенным интеллектом, который должен помочь ему как распознать контекст своего окружения (местонахождение, собственное состояние и положение объекта, который контролирует эту вещь), так и наладить диалог с окружающими вещами и управляющим устройством. Таким образом, имея онтологическое представление каждой вещи в виде виртуального ИО, пользователь или программа смогут найти, распознать и использовать релевантное устройство для решения своей задачи. Кроме того, гетерогенные устройства смогут правильно понимать друг друга при обмене информации на основе онтологического представления о них знаний.

Еще одним проектом, требующим решения семантического распознавания ИО, является проект геоинформационной системы — системы вызова экстренных оперативных служб по номеру «112» для оказания экстренной помощи населению при угрозах для жизни и здоровья, для уменьшения материального ущерба при несчастных случаях, авариях, пожарах, нарушениях общественного порядка и при других происшествиях и чрезвычайных ситуациях.

Одной из главных проблем проекта является оперативное распознавание человека, обратившегося в службу за помощью, в условиях ограниченных

информационных сведений о нем и ресурсов по времени. В данном случае ИО является сам пострадавший человек (т.е. некоторая модель, описывающая характеристики этого человека: адрес, поликлиника, к которой он прикреплен, информация как о пациенте и др.). Стоит задача распознать потребности этого человека и предоставить ему определенные ресурсы для ликвидации последствий. Семантический подход позволяет определить недостающие знания о человеке на основе базы знаний (онтологий), агентно-ориентированных приложений, что обеспечивает быструю реакцию на аварийный вызов. Кроме того, решается та же задача интероперабельности устройств, с помощью которых был осуществлен вызов: смартфон, планшет, ноутбук, телефон и пр.

Выводы

Для решения проблемы семантического распознавания в данной работе предлагается переход на новый качественный уровень при обработке информации — использование обработки на семантическом уровне. ИТ, созданные на основе семантических технологий, отличаются от традиционных тем, что используют явно выраженные (в виде онтологии) знания о предметной области, где онтология выступает как средство формализации знаний.

В интеллектуальных Web-приложениях есть своя специфика — они функционируют в открытом информационном пространстве, поэтому они нуждаются в постоянном обновлении знаний и их подкачке из внешней среды. В распределенном информационном Web-пространстве ИО, отчужденные от реальных физических объектов, определяют структуру, атрибуты, ограничения целостности и поведение физического объекта. Онтологическое представление знаний о рассматриваемых объектах позволяет улучшить задачу поиска, распознавания и интерпретации ИО (и соответствующих им физических объектов) при создании интеллектуальных информационных систем и приложений в распределенной и гетерогенной Web-среде. В работе рассмотрены конкретные примеры проектов, в которых решающей составляющей является задача распознавания ИО в интеллектуальных информационных системах различного целевого назначения.

1. Гриценко В.И. Введение в архитектуру информационного пространства / Гриценко В.И., Вовк М.И., Котова А.Б. — К.: Наукова думка, 2003. — 167с.
2. Глоссарий по информационному обществу / Под общ. ред. Ю.Е. Хохлова. — М.: Институт развития информационного общества, 2009. — 162 с.
3. Newhagen J. Interactivity, Dynamic Symbol Processing, and the Emergence of Content in Human Communication. *The Information Society* (20) (Taylor and Francis Inc, 2004), 395p.
4. Ту Д. Принципы распознавания образов / Д. Ту, Р. Гонсалес. — М. 1978. — 325с.
5. Лифшиц Ю. *Современные задачи теоретической информатики. Лекции по статистическим методам распознавания образов, распознаванию лиц, классификации текстов*— <http://yury.name/modern/>
6. Журавлев Ю.И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания и классификации // Проблемы кибернетики. — М.: Наука, 1978, вып. 33. — С. 5–68.

7. Berners-Lee T., Hendler J., Lassila O. The Semantic Web. *Scientific American Magazine*. Retrieved March 26, 2008.
8. *W3C Semantic Web Activity*. — <http://www.w3.org/2001/sw/Activity/>.
9. *Resource Description Framework (RDF) Model and Syntax Specification. W3C Proposed Recommendation*. January 1999. <http://www.w3.org/TR/PR-rdf-syntax>.
10. Kirasic D., Basch D. Ontology-Based Design Pattern Recognition Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. *Lecture Notes in Computer Science*, V. 5177, 2008. — P. 384–393.
11. Gladun A., Rogushina J., Andrushevich A. and Kurbatski A. User-oriented recognition of intelligent information objects in distributed dynamic informational Web-space. *Proceedings of the 12-th Inter. conf. on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'14)*, 2014, Minsk, Belarus, 2014, P.70–75.
12. Gladun A., Rogushina J. Use of Semantic Web Technologies and Multilinguistic Thesauri for Knowledge-Based Access to Biomedical Resources. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2012, №1, P.11–20.
13. *OWL-S Home Page*. — <http://www.daml.org/services/>
14. Рогушина Ю.В. Онтологический подход к поиску Web-сервисов в распределенной среде Интернет / Рогушина Ю.В., Гладун А.Я. //Информатика, Минск, № 4, 2006. — С.116–127.
15. Gladun A., Rogushina J., Andrushevich A., Kurbatski A. Use of the Ontological Approach to Semantic Search in the Environment of the Internet of Things. *Proceedings of the 4-th Inter. conf. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems OSTIS-2014*, Minsk, Belarus, 2014, P.353–356.

UDC: 004.822

SEMANTIC RECOGNITION OF INFORMATION OBJECT BASED ON ONTOLOGICAL REPRESENTATION OF DOMAIN KNOWLEDGE IN PROBLEMS OF INTELLECTUAL MANAGEMENT

Gritsenko V.I.¹, Gladun A.Ya.¹, Rogushina Yu.V.²

¹*International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine*

²*Institute of Software Systems of National Academy of Sciences of Ukraine*

Introduction: In this paper analysis of the features of semantic recognition of information objects from the resources available by the Web is made. To solve the problem of semantic recognition we propose a transition to a qualitatively new level of information processing — the use of the processing at the semantic level. As examples, the detection of devices in the Internet of Things, the discovery of Web-services and support of emergency information services are consider.

In order to effectively detect information necessary for the user problem solving from the Webresource it seems appropriate to determine at first which information objects are interested to users, ie, construct a formal model that describes the properties of a set of relevant information objects and to distinguish them from the others, and then use the knowledge about the structure presented in this model for identification of the specific values of their properties.

The purpose of this work is to develop a conceptual approach to the construction of formal ontological model of information objects in the virtual information space of the Web and to create a technique of this model using for perception, recognition, interpretation and processing of these objects for the tasks

of intelligent control. Information object is a representation that models an object from subject domain in the information space, which defines the structure, attributes, constraints, and perhaps behavior of the object.

Results: To solve the problem of semantic recognition we propose a transition to a qualitatively new level of information processing – at the semantic level. Modern IT that are based on semantic technologies, different from the traditional ones by the explicit (ontology-based) knowledge representation of the subject area, where the ontology serves as a means of knowledge formalizing .

The specifics of the new intelligent Web-based applications are an operatiin in an open information space: they need permanent updating of knowledge and its pumping from the external environment. In the distributed information space of the Web information objects alienated from the real physical objects define the structure, attributes, constraints and behavior of these physical objects.

Conclusions: The ontological representation of knowledge about the considered objects can improve the problem of finding, recognizing and interpreting the IOs (and corresponding physical objects) for creating intelligent information systems and applications in a distributed and heterogeneous Web-based environment.

Keywords: ontology, an information object, Semantic Web, OWL, object recognition.

1. Gritsenko V.I. Vovk M.I., Kotova A.B. *Introduction to the architecture of the information space*. Kiev, Naukova Dumka, 2003, 167 p. (in Russian).
2. Newhagen J. Interactivity, Dynamic Symbol Processing, and the Emergence of Content in Human Communication. *The Information Society (20)* (Taylor and Francis Inc, 2004), 395 p. (in Russian).
3. *Glossary on Information Society* / under total. Ed. Y.E. Khokhlova. Moscow: Institute of the Information Society, 2009. — 162 p.
4. Tu D., Gonzalez R. *Principles of Pattern Recognition*. Moscow: 1978. 325 p. (in Russian).
5. Lifshitz Y. *Modern problems of theoretical computer science. Lectures on statistical methods for pattern recognition, face recognition, text classification* — <http://yury.name/modern/> (in Russian).
6. Zhuravlev Y.I. On the algebraic approach to the solution of problems of recognition and classification. *Problems of Cybernetics*. Moskow: Nauka, 1978, vol. 33. P. 5–68 (in Russian).
7. Berners-Lee T., Hendler J., Lassila O. The Semantic Web. *Scientific American Magazine*. Retrieved March 26, 2008.
8. *W3C Semantic Web Activity*. — <http://www.w3.org/2001/sw/Activity/>.
9. *Resource Description Framework (RDF) Model and Syntax Specification. W3C Proposed Recommendation*. January 1999. — <http://www.w3.org/TR/PR-rdf-syntax>.
10. Kirasic D., Basch D. Ontology-Based Design Pattern Recognition Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5177, 2008. P. 384–393.
11. Gladun A., Rogushina J., Andrushevich A. and Kurbatski A. User-oriented recognition of intelligent information objects in distributed dynamic informational Web-space. *Proc. of the 12-th Inter. conf. on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'14)*, 2014, Minsk, Belarus, 2014, P.70–75.
12. Gladun A., Rogushina J. Use of Semantic Web Technologies and Multilinguistic Thesauri for Knowledge-Based Access to Biomedical Resources. *International Journal of Intelligent*

- Systems and Applications*, 2012, no 1. P.11–20. OWL-S Home Page. – <http://www.daml.org/services/>
13. *OWL-S Home Page*. — <http://www.daml.org/services/>
 14. Rogushina J., Gladun A. Ontological approach to search of Web-services in the distributed environment of the Internet. *Informatics*, Minsk, no 4, 2006. P.116–127 (in Russian).
 15. Gladun A., Rogushina J., Andrushevich A., Kurbatski A. Use of the Ontological Approach to Semantic Search in the Environment of the Internet of Things. *Proceedings of the 4-th Inter. conf. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems OSTIS-2014*, Minsk, Belarus, 2014. P.353–356.

Получено 24.07.2014

MATHEMATICAL MODELING OF HYPOMETABOLISM PROCESS TO IDENTIFY PECULIARITIES OF HUMAN ORGANISM DURING THE WORK UNDER CONDITION OF HIGHLANDS

I.L. Bobriakova

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine

Предложена математическая модель динамики напряжений респираторных газов с учетом гипометаболизма, который развивается в организме человека на высокогорье. Анализ вычислительных экспериментов позволил сделать выводы о характере изменений режимов функционирования организма при переходных процессах и в стационарных состояниях, влиянии систем внешнего дыхания и кровообращения на формирование уровней управляющих параметров, а также о роли гипометаболизма при воздействии на организм возмущений внутренней и внешней сред.

Ключевые слова: математическая модель, системы дыхания и кровообращения, напряжение газов, гипоксия, гипометаболизм, возбуждающие воздействия, вычислительные эксперименты.

Запропоновано математичну модель динаміки напружень респираторних газів з урахуванням гіпометаболізму, який розвивається в організмі людини на високогір'ї. Аналіз обчислювальних експериментів дозволив зробити висновки щодо характеру змін режимів функціонування організму при перехідних процесах і в стаціонарних станах, впливу систем зовнішнього дихання та кровообігу на формування рівнів керуючих параметрів, а також ролі гіпометаболізму при впливі на організм збурень внутрішнього і зовнішнього середовища.

Ключові слова: математична модель, система дихання і кровообігу, напрута газів, гіпоксія, гіпометаболізм, збурюючі впливи, обчислювальні експерименти.

INTRODUCTION

Hypometabolic and hypoxic states are in the focus of attention of researchers since organism is often impacted by hypoxic factors, particularly under conditions of highlands, as well as during significant physical loads or some severe pathologic process.

Hypoxic or exogenous hypoxia is developed during decreasing of partial pressure of oxygen in inhaled air. During hypoxic hypoxia the oxygen tension in arterial blood, the saturation of hemoglobin with oxygen and its total content in the blood are being decreased. Negative impact can be caused also by hypocapnia, developed as a result of compensatory hyperventilation of lungs. Extreme hypocapnia causes worsening of blood supply to brain and heart (vasoconstriction) and respiratory alkalosis. In this connection, it is interesting to investigate the energy reserves of organism and the ways of its strengthening under hypoxic conditions.

THE RELEVANCE OF THE TOPIC

Investigation of the processes of human organism breathing system self-regulation represents particular scientific area that is being widely developed last years as a result of success in mathematical modeling. However the regulation mechanisms of functional state of human organism under conditions of highland hypoxia are not sufficiently studied yet. Impossibility of such investigations was related with the difficulties of experimental determination of the several most important parameters and with the absence of adequate mathematical models for dynamics of these processes.

PROBLEM DEFINITION

Mechanisms of formation of hypometabolic state of human being under conditions of highlands are considered. Mathematical model of functional systems of breathing and blood circulation has been used to analyze this phenomenon on system level.

The purpose of this work is development and investigation of mathematical model of hypometabolism, and development of software for execution of computing experiments with the model.

RESULTS

1. Developed complex of mathematical model of the gas mass carry process in organism and software is applied for assessment of the dynamics of functional state of human being on conditions of work at highlands.

2. Implemented numerical analysis of the models of respiratory exchange control enables to:

- follow dynamics of the main physiological parameters of the model during transient processes and in stationary states;
- forecast and quantitatively assess regulatory reactions of the organism under given disturbances;
- carry out individualization of model developments on condition of availability of array of data on anatomic-physiological peculiarities of specific human being.

Obtained results are well correlated with the physiological experimental data.

Mathematical model of tension dynamics of respiratory gas is developed using ideas of compartmental modeling [1, 2], i.e. describes the mass carry process of respiratory gases among functionally connected but relatively autonomous compartments.

Model represents the system of ordinary nonlinear differential equation whose number depends on the degree of detailing of structural scheme of the object (number of tissue regions, portions of blood washing the tissue etc.), describing the dynamics of oxygen tension p (hereinafter the first index at variable — (1)), carbon dioxide (2) and nitrogen (3) in structural compartments of the system — respiratory tract (second index at variable — (rw)), alveolar space (A), blood of pulmonary capillaries (LC), arterial blood (a), blood of tissue capillaries (ct_i), tissue

reservoirs (t_i) and mixed venous blood (\bar{v}).

As distinct from existing models of gas mass transfer in the organism this model presents dynamics of gas partial pressures in alveolar space during the breathing cycle including phases of inhalation, exhalation and pause; process of gas diffusion through air-blood barrier, as well as through capillary-tissue membranes taking into account their structural and functional peculiarities have been considered [3]. In addition tissue reservoirs are differentiated and peculiarities of energy exchange of tissues of brain, heart muscle, liver, kidneys, skeletal muscles, skin and other organism's tissues have been considered. Presented below equations of mathematical model of object have been obtained on the basis of continuity and material balance principles (conservation of mass) using known empiric physiological dependencies among variables. Model equations are described as follows.

Let p_1, p_2, p_3 — partial pressures of oxygen, carbon dioxide and nitrogen in inhaled air and $p_1 + p_2 + p_3 = B$, where B — total barometric pressure.

Then dynamics of partial pressures of gases in respiratory tract during breathing cycle can be presented as follows:

$$\frac{dp_{1_{rw}}}{d\tau} = \frac{\dot{V}}{n_1 V_{rw}} [\tilde{p}_1 - \tilde{p}_{1_{rw}}], \quad (1)$$

$$\frac{dp_{2_{rw}}}{d\tau} = \frac{\dot{V}}{n_2 V_{rw}} [\tilde{p}_2 - \tilde{p}_{2_{rw}}], \quad (2)$$

$$\frac{dp_{3_{rw}}}{d\tau} = \frac{\dot{V}}{n_3 V_{rw}} [\tilde{p}_3 - \tilde{p}_{3_{rw}}], \quad (3)$$

where V_{rw} — volume of respiratory tract (generalized reservoir), \dot{V} — ventilation depending of values of respiratory volume and duration of breathing cycle; n_1, n_2, n_3 — conversion factors for respiratory gases and nitrogen respectively, and

$$\tilde{p}_j = \begin{cases} p_j, & (\dot{V} > 0), \\ p_{j_{rw}}, & (\dot{V} \leq 0), \end{cases} \quad j = \overline{1,3}, \quad (4)$$

$$\tilde{p}_{j_{rw}} = \begin{cases} p_{j_{rw}}, & (\dot{V} > 0), \\ p_{j_A}, & (\dot{V} \leq 0), \end{cases} \quad j = \overline{1,3}.$$

During modeling of partial pressures of gases in alveolar space with volume V_L it is necessary to take into account gas flow through air-blood barrier

$$G_{j_{LC}} = D_j S_{LC} (p_{j_A} - p_{j_{LC}}), \quad (5)$$

where D_j — coefficients characterizing permeability of gases through air-blood barrier, S_{LC} — area of gas mass transfer surface.

Then

$$\frac{dp_{1A}}{d\tau} = \frac{1}{n_1(V_L - V_{rw})} [n_1 \dot{V} \tilde{p}_{1rw} - G_{1LC} - n_1 p_{1A} \frac{dV_L}{d\tau}], \quad (6)$$

$$\frac{dp_{2A}}{d\tau} = \frac{1}{n_2(V_L - V_{rw})} [n_2 \dot{V} \tilde{p}_{2rw} - G_{2LC} - n_2 p_{2A} \frac{dV_L}{d\tau}], \quad (7)$$

$$\frac{dp_{3A}}{d\tau} = \frac{1}{n_3(V_L - V_{rw})} [n_3 \dot{V} \tilde{p}_{3rw} - G_{3LC} - n_3 p_{3A} \frac{dV_L}{d\tau}]. \quad (8)$$

It is assumed that lung volume during breathing cycle is changed according to

$$V_L = \begin{cases} V_L(\tau_0) + \frac{D}{2} (1 - \cos \frac{\tau - \tau_0}{t_c} 2\pi), & \text{at inhale and exhale} \\ V_L(\tau_0), & \text{at pause} \end{cases} \quad (9)$$

where D — respiratory volume of lungs, τ_0 — start of breathing cycle, t_c — its duration.

It is also assumed that

$$\dot{V} = \frac{dV_L}{d\tau} \quad (10)$$

($\dot{V} = 0$ during pause).

As it can be seen from the equations (1)–(8), gas diffusion from respiratory tract to alveolar space during pause is not considered.

Equations of blood gas tension dynamics are developed taking into account biophysical and chemical properties of blood. It is known that oxygen and carbon dioxide can be transported with blood flow both physically dissolved in blood plasma, and attached to hemoglobin (and CO_2 is bound also with buffer bases), while nitrogen is transported only in dissolved form.

Changes of blood gas tension in pulmonary capillaries can be influenced by gas flows from alveolar space G_{jLC} (5), from mixed venous blood and gas flow passing with circulating blood into arterial channel. In addition model takes into account presence of pulmonary shunt having volumetric speed of blood flow Q_s . Equations of dynamics of blood gas tension in pulmonary capillaries in connection with above mentioned are as follows:

$$\begin{aligned} \frac{dp_{1LC}}{d\tau} = & \frac{1}{V_{LC} (\alpha_1 + \gamma Hb \frac{\partial \eta_{LC}}{\partial p_{1LC}})} [\alpha_1 (Q - Q_s) (p_{1v} - p_{1LC}) + \\ & + G_{1LC} + \gamma Hb (Q - Q_s) (\eta_v - \eta_{LC})], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_{2LC}}{dt} = & \frac{1}{V_{LC}(\alpha_2 + \gamma_{BH}BH \frac{\partial z_{LC}}{\partial p_{2LC}})} [(((1 - \eta_v^-)z_v^- - (1 - \eta_{LC})z_{LC})\gamma Hb + \\ & + \gamma_{BH}BH(z_v^- - z_{LC}))(Q - Q_S) + \\ & + (p_{2v}^- - p_{2LC})\alpha_2(Q - Q_S) + G_{2LC} + \gamma Hb V_{LC} \frac{d\eta_{LC}}{dt}], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{dp_{3LC}}{d\tau} = \frac{1}{\alpha_3 V_{LC}} [\alpha_3 p_{3v} (Q - Q_S) + G_{3LC} - \alpha_3 p_{3LC} (Q - Q_S)]. \quad (13)$$

For more precise description of gas mass carry process in pulmonary capillaries in the section «alveoli — pulmonary capillaries blood» the structure of pulmonary capillaries can be differentiated, considering the elements of pulmonary artery, capillary network itself and pulmonary vein.

In the equations (11)–(13) V_{LC} — volume of blood of pulmonary capillaries, Q — volume velocity of system blood flow, α_1 , α_2 , α_3 — coefficients of gas solubility in blood; γ , γ_{BH} — physiological constants, determined in Haldane and Verigo-Bohr equations; η — hemoglobin saturation rate (its concentration will be denoted as Hb) with oxygen, determined by empiric dependency

$$\eta_{LC} = 1 - 1,75 \exp(-0,052 m_{LC} p_{1LC}) + 0,75 \exp(-0,12 m_{LC} p_{1LC}). \quad (14)$$

At $m_{LC} = const$ dependency of hemoglobin saturation rate Hb with oxygen has a shape of S -curve, that is approximated by the expression (14). But it is known, that alteration of pH value in blood causes shifting of the curve of oxyhemoglobin dissociation (Bohr effect). Carbon dioxide facilitates displacement of oxygen from oxyhemoglobin, and shape and location of dissociation curve are changed depending on CO_2 tension, namely, with its increasing affinity of hemoglobin with oxygen is decreasing and dissociation curve is shifted to the right, i.e. oxyhemoglobin dissociation is increased. Following equations serve as mathematical interpretation of Bohr effect in the model

$$m_{LC} = 0,25(pH_{LC} - 7,4) + 1, \quad (15)$$

$$pH_{LC} = 6,1 + \lg \frac{BH}{\alpha_2 p_{2LC}}. \quad (16)$$

Dependency (16) is Henderson-Hasselbach equation that is used for determination of correlation among blood acidity (pH), tension of CO_2 in blood and concentration of hydrocarbonates that are buffer bases (BH). Saturation rate of buffer bases of blood with carbon dioxide is expressed by the Michaelis-Menten formula

$$Z_{LC} = \frac{p_{2LC}}{P_{2LC} + 35}. \quad (17)$$

Equations (1)–(17) describe first three links of controlled system — change of partial pressures of gases in respiratory tract, alveoli and blood of pulmonary capillaries.

The blood saturated in pulmonary capillaries is flowing in the arterial channel with volume velocity $(Q-Q_s)$, and, as a result of pulmonary shunt, — mixed venous blood is flowing with volume velocity Q_s , while the arterial blood is flowing out with volume velocity Q . Taking into account conditions of continuity and material balance the following can be written

$$\begin{aligned} \frac{dp_{1a}}{d\tau} = & \frac{1}{V_a(\alpha_1 + \gamma Hb \frac{\partial \eta_a}{\partial p_{1a}})} [\alpha_1(Q - Q_s)p_{1LC} + \\ & + \alpha_1 Q_s p_{1\bar{v}} - \alpha_1 Q p_{1a} + \\ & + \gamma Hb(Q - Q_s)\eta_{LC} + \gamma Hb Q_s \eta_{\bar{v}} - \gamma Hb Q \eta_a], \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_{2a}}{d\tau} = & \frac{1}{V_a(\alpha_2 + \gamma_{BH} BH \frac{\partial z_a}{\partial p_{2a}})} [((1 - \eta_{\bar{v}})Q_s z_{\bar{v}} + \\ & + (1 - \eta_{LC})(Q - Q_s)z_{LC} - (1 - \eta_a)Q_{z_a})\gamma Hb + (z_{\bar{v}}Q_s + \\ & + z_{LC}(Q - Q_s) - z_a Q)\gamma_{BH} BH + \alpha_2(Q_s p_{2\bar{v}} + \\ & + (Q - Q_s)p_{2LC} - Q p_{2a}) + \gamma Hb V_a \frac{d\eta_a}{d\tau}], \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_{2a}}{d\tau} = & \frac{1}{V_a(\alpha_2 + \gamma_{BH} BH \frac{\partial z_a}{\partial p_{2a}})} [((1 - \eta_{\bar{v}})Q_s z_{\bar{v}} + \\ & + (1 - \eta_{LC})(Q - Q_s)z_{LC} - (1 - \eta_a)Q_{z_a})\gamma Hb + (z_{\bar{v}}Q_s + \\ & + z_{LC}(Q - Q_s) - z_a Q)\gamma_{BH} BH + \alpha_2(Q_s p_{2\bar{v}} + \\ & + (Q - Q_s)p_{2LC} - Q p_{2a}) + \gamma Hb V_a \frac{d\eta_a}{d\tau}], \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{dp_{3a}}{d\tau} = \frac{1}{\alpha_3 V_a} [\alpha_3(Q - Q_s)p_{3LC} + \alpha_3 Q_s p_{3\bar{v}} - \alpha_3 Q p_{3a}].$$

Let's express changes in organism gas tensions in tissue capillaries blood (ct_i) and tissues (t_i). Tissue reservoirs are considered on the level of organs and tissues, namely, brain, heart, liver, kidneys, skeletal muscles (sk.m.), skin, adipose and bone tissues (let m — number of tissue reservoirs).

Krogh model has been chosen as a model of tissue reservoir [4, 5], where capillary network of tissues or organs is represented with one generalized cylindrical capillary in the inlet of whose arterial blood is coming. During flowing of blood along the capillary respiratory exchange between capillary blood and tissue is occurring through its wall. Then blood is flowing in the vein.

In the same way as other equations of mathematical model, equations of

dynamics pO_2 , pCO_2 , pN_2 in blood of tissue capillaries and tissue are compiled on the basis of principles of materiality of balance and flow continuity.

$$\frac{dp_{1ct_i}}{d\tau} = \frac{1}{V_{ct_i}(\alpha_1 + \gamma Hb \frac{\partial \eta_{ct_i}}{\partial p_{1ct_i}})} [\alpha_1 Q_{t_i} (p_{1a} - p_{1ct_i}) - G_{1t_i} + \gamma Hb Q_{t_i} (\eta_a - \eta_{ct_i})] \quad (21)$$

$$\frac{dp_{2ct_i}}{d\tau} = \frac{1}{V_{ct_i}(\alpha_2 + \gamma_{BH} BH \frac{\partial z_{ct_i}}{\partial p_{2ct_i}})} [\alpha_2 Q_{t_i} (p_{2a} - p_{2ct_i}) - G_{2t_i} +$$

$$+ Q_{t_i} BH \gamma_{BH} (z_a - z_{ct_i}) +$$

$$+ (1 - \eta_a) \gamma Hb Q_{t_i} z_a - (1 - \eta_{ct_i}) \gamma Hb Q_{t_i} z_{ct_i} + \gamma Hb V_{ct_i} \frac{d\eta_{ct_i}}{d\tau}],$$

$$\frac{dp_{3ct_i}}{d\tau} = \frac{1}{\alpha_3 V_{ct_i}} [\alpha_3 p_{3a} Q_{t_i} - \alpha_3 p_{3ct_i} Q_{t_i} - G_{3t_i}]. \quad (23)$$

Rate of intensity of metabolic process in tissue regions of this model is characterized by the rate of oxygen consumption q_{1t_i} and rate of carbon dioxide evolution q_{2t_i} . It is considered, that dependence of oxygen consumption rate q_{1t_i} in tissues of brain, kidneys and heart is determined by equation of Michaelis-

Menten: $q_{1t_i}(\tau) = q_{1t_i}^0 \frac{p_{1t_i}}{R + p_{1t_i}}$, and in peripheral tissues, including skeletal muscles, by correlation

$$q_{1t_i}(\tau) = q_{1t_i}^0 \left(\frac{\eta_{ct_i}(\tau)}{\eta_{ct_i}^0} \right)^2, \quad (24)$$

where $q_{1t_i}^0$ — consumption rate of O_2 at given intensity of load under normal conditions of external environment, R — *const*, $\eta_{ct_i}^0$ — saturation rate of Hb in blood with oxygen in these conditions, and $\eta_{ct_i}(\tau)$ — saturation rate of Hb in changed conditions of experiment.

In addition, for definiteness it is considered that consumption rate of O_2 in heart muscles is linear function of the value of volume velocity of systemic blood flow

$$q_{1sk.m.} = \alpha Q + \beta,$$

$$q_{2_{t_i}} = n_{t_i} q_{1_{t_i}}, \quad (25)$$

where n_{t_i} — respiratory coefficient.

In this connection dynamics of gas tension in tissue reservoirs in normal physiological organism may be described by the equations

$$\frac{dp_{1_{t_i}}}{d\tau} = \frac{1}{V_{t_i}(\alpha_{1_{t_i}} + \gamma_{Mb_i} Mb_i \frac{\partial \eta_{Mb_i}}{\partial p_{1_{t_i}}})} (G_{1_{t_i}} - q_{1_{t_i}}), \quad (26)$$

$$\frac{dp_{2_{t_i}}}{d\tau} = \frac{1}{V_{t_i} \alpha_{2_{t_i}}} (q_{2_{t_i}} + G_{2_{t_i}}), \quad (27)$$

$$\frac{dp_{3_{t_i}}}{d\tau} = \frac{1}{\alpha_{3_{t_i}} V_{t_i}} G_{3_{t_i}}, \quad (28)$$

where $\eta_{Mb_i} = 1 - \exp(-0,12 p_{1_{t_i}})$ — saturation rate of myoglobin with oxygen, $0 \leq \eta_{Mb_i} \leq 1$, γ_{Mb_i} — coefficient characterizing maximal amount of O_2 , that can be attached with 1 g of myoglobin (Mb_i).

The link of breathing system «blood — tissue reservoirs» can be detailed at the account of both differentiation of tissue reservoirs and modeling of transport and exchange functions of blood in arterioles, tissue capillaries and venules.

To conclude the model it is necessary just to present equations representing the dynamics of gas tension in mixed venous blood:

$$\frac{dp_{1_v^-}}{d\tau} = \frac{1}{V_v^-(\alpha_1 + \gamma Hb \frac{\partial \eta_v^-}{\partial p_{1_v^-}})} [\alpha_1 (\sum_{i=1}^m Q_{t_i} p_{1_{ct_i}} - Q p_{1_v^-}) + \gamma Hb (\sum_{i=1}^m Q_{t_i} \eta_{ct_i} - Q \eta_v^-)], \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_{2_v^-}}{d\tau} = & \frac{1}{V_v^-(\alpha_2 + \gamma_{BH} BH \frac{\partial z_v^-}{\partial p_{2_v^-}})} [\alpha_2 (\sum_{i=1}^m Q_{t_i} p_{2_{ct_i}} - Q p_{2_v^-}) + \\ & + \gamma Hb (\sum_{i=1}^m Q_{t_i} (1 - \eta_{ct_i}) z_{ct_i} - (1 - \eta_v^-) Q z_v^-) + \\ & + \gamma_{BH} BH (\sum_{i=1}^m Q_{t_i} z_{ct_i} - Q z_v^-) + \gamma Hb V_v^- \frac{d\eta_v^-}{d\tau}], \end{aligned} \quad (30)$$

$$\frac{dp_{3_v^-}}{d\tau} = \frac{1}{\alpha_3 V_v^-} (\alpha_3 \sum_{i=1}^m p_{3_{ct_i}} Q_{t_i} - \alpha_3 p_{3_v^-} Q). \quad (31)$$

It is obvious that equations (1)–(31) represent dynamics of gas mass transfer in organism in simplified form. However the principle of model development allows the possibility to consider also arteriovenous anastomosis and model gas tension on the walls of vessels — capillary, change of blood volume in tissue capillaries, enabling to solve different tasks of theoretical and applied physiology.

The model is developed for average statistical (reference) person and it uses the known experimental data on diffusion coefficients and gas permeability through the membranes separating the medium, on other parameters characterizing gas transport in the organism and metabolic processes taking place in tissues.

It would be important to clarify the role of these parameters in stabilization of transients occurring during violation of equilibrium state caused by changes of internal or external conditions. Transients caused by changes of composition of inhaled air, transition from steady state to load and vice versa, during pressure difference and process of the control of level of organism's gas homeostasis have been studied. Data obtained in other studies [6, 7] have been accounted during the work with the model.

On the model described above the simulation of functional self-organization of physiological breathing system under conditions of highlands has been carried out.

It was assumed that before experiments the gas mass transfer system in organism was in stationary state, breathing gas normoxic (21 % O_2 and 79 % N_2). Calculations have been executed for normal physiological data of person weighting 75 kg, volume velocity of oxygen consumption under calm conditions $q = 4,3$ ml/sec, $Q = 96$ ml/sec, $Hb = 0,14$ g/ml, $BH = 0,479$ g/ml, $D = 550$ ml, $t_c = 4$ sec. To determine initial status of the system in simulation of arbitrary extreme situation it was necessary to simulate first calm conditions under normal external conditions Q_{t_i} , $p_{1_{t_i}}$, and $p_{2_{t_i}}$ since experimental determination of initial values is complicated. Therefore starting from certain determined approximated state of the system (1)–(31) trajectories $p_{1_{t_i}}$ and $p_{2_{t_i}}$ have been put in steady regime for time T . Calculations have been executed during time interval $T = 3000$ sec with simulation time-step $\Delta\tau = 0,01$.

Air pressure at sea level everywhere on the globe is on average close to one atmosphere. Going up from the sea level air pressure is decreasing; respectively its density is also decreasing: air becomes more and more rarefied, i.e. amount of oxygen in inhaled air is decreased. Therefore for simulation of highlands conditions known data of air pressure and oxygen content at different heights have been taken [8].

In present work computer analysis of model at different heights has been carried out: 1 km ($B_o = 674$ mm Hg), 2 km ($B_o = 596$ mm Hg), 3 km ($B_o = 526$ mm Hg), 4 km ($B_o = 462$ mm Hg) with oxygen content in air respectively 18,5 %, 16,2 %, 14,3 %, 12,6 %. At the time zero values of gas tensions in arterial blood and skeletal muscles were taken at normal state, i.e. in calm conditions at sea level.

For every height set of experiments have been carried out under following conditions:

I. Hypoxia in calm state with compensation — increasing of $Q_{sk.m}$ in 2 times, V_{inhale} in 1,5 times: $V_{inhale} = 800$ ml; $t_c = 4,0$ sec; $t_{inhale} = t_{exhale} = 1,5$ sec; $Q = 117,1$ ml/sec; $Q_{brain} = 14,88$; $Q_{heart} = 6,135$; $Q_{sk.m.} = 38,45$; $Q_{other\ tissues} = 57,595$; $q = 4,44$ ml/sec; $q_{brain} = 0,632$; $q_{heart} = 0,4725$; $q_{sk.m.} = 1,488$; $q_{other\ tissues} = 1,849$.

II. Load hypoxia with compensation — increasing of $q_{sk.m.}$ and $Q_{sk.m.}$ in 2 times, V_{inhale} in 1,5 times: $V_{inhale} = 800$ ml; $t_c = 4,0$ sec; $t_{inhale} = t_{exhale} = 1,5$ sec; $Q = 117,1$ ml/sec; $Q_{brain} = 14,88$; $Q_{heart} = 6,135$; $Q_{sk.m.} = 38,45$; $Q_{other\ tissues} = 57,595$; $q = 5,9292$ ml/sec; $q_{brain} = 0,6321$; $q_{heart} = 0,4725$; $q_{sk.m.} = 2,9756$; $q_{other\ tissues} = 1,849$.

III. Load hypoxia with compensation — increasing of $q_{sk.m.}$ in 2 times, $Q_{sk.m.}$ in 4 times, V_{inhale} up to 1000 ml: $V_{inhale} = 1000$ ml; $t_c = 3,0$ sec; $t_{inhale} = t_{exhale} = 1,5$ sec; $Q = 159,2$ ml/sec; $Q_{brain} = 14,88$; $Q_{heart} = 9,84$; $Q_{sk.m.} = 76,90$; $Q_{other\ tissues} = 57,595$; $q = 6,2146$ ml/sec; $q_{brain} = 0,6321$; $q_{heart} = 0,7579$; $q_{sk.m.} = 2,9756$; $q_{other\ tissues} = 1,8490$.

Results of experiments are presented in the table and on figures 1–4.

On figures 1–4:

row 1 — Hypoxia in calm state with compensation — increasing of $Q_{sk.m.}$ in 2 times, V_{inhale} in 1,5 times:

row 2 — Load hypoxia with compensation — increasing of $q_{sk.m.}$ and $Q_{sk.m.}$ in 2 times, V_{inhale} in 1,5 times:

row 3 — Load hypoxia with compensation — increasing of $q_{sk.m.}$ in 2 times, $Q_{sk.m.}$ in 4 times, V_{inhale} up to 1000 ml:

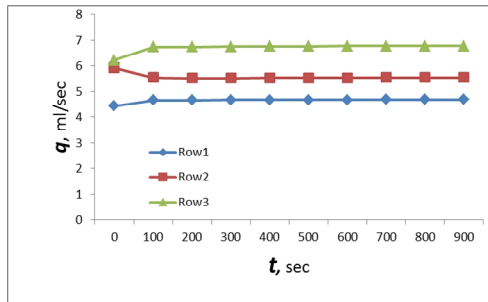


Fig. 1. Oxygen consumption at height 1 km

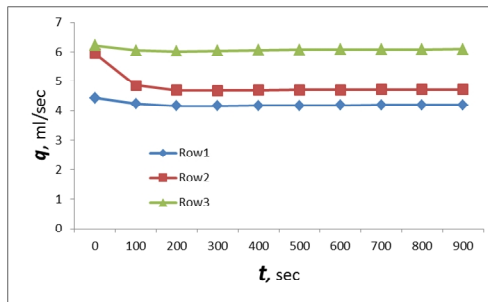


Fig. 2. Oxygen consumption at height 2 km

Comparative analysis of results demonstrates, that with the same values \dot{V} and Q levels of p_aO_2 are below normal, and levels of $p_{sk.m.}O_2$, p_aCO_2 , $p_{sk.m.}CO_2$ are higher, but later on significantly decreasing.

To approximate gas tension levels to normal values, \dot{V} and $Q_{sk.m.}$ have to be significantly higher.

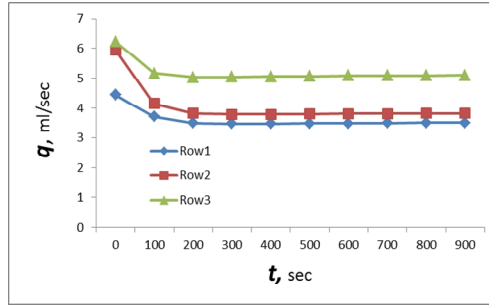


Fig. 3. Oxygen consumption at height 3 km

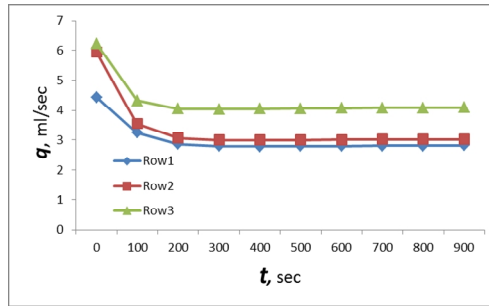


Fig. 4. Oxygen consumption at height 4 km

Table Results of experiments

I	V _{inh} =800 ml, t _c =4 s, \dot{V} =12 l/min, Q=117,1 ml/sec, q=4.44 ml/sec											
	H=1 km B ₀ =674 mm Hg			H=2 km B ₀ =596 mm Hg			H=3 km B ₀ =526 mm Hg			H=4 km B ₀ =462 mm Hg		
	t, c	0	100	2800	0	100	2800	0	100	2800	0	100
q, ml/sec	4.4414	4.6629	4.6912	4.4414	4.2340	4.2052	4.4414	3.7204	3.5163	4.4414	3.2325	2.8227
P _a O ₂ , mm Hg	92.9	70.33	73.76	92.9	46.53	45.25	92.9	34.28	30.35	92.9	26.82	21.58
P _{sk.m.} O ₂ , mm Hg	26.71	35.95	33.46	26.71	30.81	27.71	26.71	25.86	21.41	26.71	21.92	16.33
P _a CO ₂ , mm Hg	26.17	34.73	18.40	26.17	34.22	16.61	26.17	33.54	13.93	26.17	32.89	11.21
P _{sk.m.} CO ₂ , mm Hg	32.03	47.53	22.07	32.03	47.13	19.69	32.03	46.65	16.30	32.03	46.19	12.94
II	V _{inh} =800 ml, t _c =4 s, \dot{V} =12 l/min, Q=117,1 ml/sec, q=5,93 ml/sec											
	H=1 km B ₀ =674 mm Hg			H=2 km B ₀ =596 mm Hg			H=3 km B ₀ =526 mm Hg			H=4 km B ₀ =462 mm Hg		
	t, c	0	100	2800	0	100	2800	0	100	2800	0	100
q, ml/sec	5.9292	5.5470	5.5540	5.9292	4.8573	4.7243	5.9292	4.1594	3.8328	5.9292	3.5410	3.0263
P _a O ₂ , mm Hg	92.9	58.16	60.08	92.9	39.28	37.17	92.9	29.41	25.79	92.9	23.17	18.78
P _{sk.m.} O ₂ , mm Hg	26.71	25.66	24.08	26.71	21.96	19.61	26.71	18.68	15.48	26.71	16.03	12.13
P _a CO ₂ , mm Hg	26.17	36.14	21.81	26.17	35.26	18.66	26.17	34.36	15.18	26.17	33.58	12.01
P _{sk.m.} CO ₂ , mm Hg	32.03	48.92	27.24	32.03	48.29	22.94	32.03	47.65	18.38	32.03	47.09	14.31
III	V _{inh} =1000 ml, t _c =3 s, \dot{V} =20 l/min, Q=159,2 ml/sec, q=6,21 ml/sec											
	H=1 km B ₀ =674 mm Hg			H=2 km B ₀ =596 mm Hg			H=3 km B ₀ =526 mm Hg			H=4 km B ₀ =462 mm Hg		
	t, c	0	100	2800	0	100	2800	0	100	2800	0	100
q, ml/sec	6.2146	6.7337	6.7791	6.2146	6.0453	6.0920	6.2146	5.1688	5.0975	6.2146	4.3299	4.0948
P _a O ₂ , mm Hg	92.9	67.67	70.52	92.9	43.58	43.83	92.9	31.26	29.45	92.9	23.74	20.91
P _{sk.m.} O ₂ , mm Hg	26.71	35.12	32.75	26.71	29.29	27.05	26.71	23.53	20.74	26.71	19.04	15.72
P _a CO ₂ , mm Hg	26.17	31.00	16.01	26.17	30.43	14.50	26.17	29.70	12.20	26.17	29.00	9.94
P _{sk.m.} CO ₂ , mm Hg	32.03	40.79	19.13	32.03	39.98	17.09	32.03	38.98	14.13	32.03	38.03	11.20

CONCLUSIONS

Presented results of computer analysis of the model show that hypometabolism is a necessary condition for stabilization of the status of organism during highland hypoxia.

Calculations using mathematical model (1)-(33) with hypometabolism mechanism (24) demonstrates that stabilization of the status of the breathing and blood circulation system require less metabolic cost of regulatory mechanism during the work under conditions of highlands.

1. Gray J.S. The multiple factor theory of respiratory regulation. *Science*. 1946. V.103. P.739–744.
2. Grodins F. Mathematical analysis and digital simulation of the respiratory control system. *J. Appl. Physiol.* 1967. Vol. 22, № 2. P.260–276.
3. Bioecomedicine. United information space / edited by V.I. Grytsenko. Kiev: Naukova dumka, 2001. 318 p. (in Russian).
4. Lauer N.V., Kolchinskaya A.Z., Kulikov M.A. Calculation of parameters of organism's oxygen regimes and development of oxygen cascades. *Organism's oxygen regime and its regulation*. - Kiev: Naukova dumka, 1966, p.16–22 (in Russian).
5. Kolchinskaya A.Z., Man'kovskaya I.N., Misiura A.G. *Breathing and oxygen regimes of dolphins' organisms*. — Kiev: Naukova dumka, 1980. 332 p. (in Russian).
6. Biloshyts'kyi P. V., Kliuchko O. M., Onopchuk Yu. M. Study of hypoxia issues by Ukrainian scientists in the area of Elbrus mountain. *Bulletin of NASU*. 2007, no 3–4. P. 44–50 (in Russian).
7. Onopchuk Yu.N., Misiura A.G. Methods of mathematical modeling and control in theoretical research and applied problem solving in sports medicine and physiology. *Sports medicine*. 2008, no 1. P. 181–188 (in Russian).
8. *Table of International Standard Atmosphere*. Available at: <http://www.vsetabl.ru/154.htm>.

UDK 519.876

MATHEMATICAL MODELING OF HYPOMETABOLISM PROCESS TO IDENTIFY PECULIARITIES OF HUMAN ORGANISM DURING THE WORK UNDER CONDITION OF HIGHLANDS

I.L. Bobriakova

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine

Introduction: Hypometabolic and hypoxic states are in the focus of attention of researchers since organism is often impacted by hypoxic factors, particularly under conditions of highlands, as well as during significant physical loads or some severe pathologic process.

Hypoxic or exogenous hypoxia is developed during decreasing of partial pressure of oxygen in inhaled air. During hypoxic hypoxia the arterial oxygen tension, the saturation of hemoglobin with oxygen and its total content in the blood are being decreased. Negative impact can be caused also by hypocapnia, developed as a result of compensatory hyperventilation of lungs. Extreme hypocapnia causes worsening of blood supply to brain and heart (vasoconstriction) and respiratory alkalosis. In this connection, it is interesting to investigate the energy reserves of

organism and the ways of its strengthening under hypoxic conditions.

Problem definition: Investigation of the processes of human organism breathing system self-regulation represents particular scientific area that is being widely developed last years as a result of success in mathematical modelling. However the regulation mechanisms of functional state of human organism under conditions of highland hypoxia are not sufficiently studied yet. Infeasibility of such investigations was related with the difficulties of experimental determination of the several most important parameters and with the absence of adequate mathematical models for dynamics of these processes.

The main task of this work consists in investigation of the mechanism of formation of hypometabolic state of human being under conditions of highlands. Mathematical model of functional systems of breathing and blood circulation has been used to analyze this phenomenon on system level.

The purpose of this work is to develop and to investigate the mathematical model of hypometabolism, and to develop the software for execution of computing experiments with the model.

Results:

1. Developed complex of mathematical model of the gas mass carry process in organism and software is applied for assessment of the dynamics of functional state of human being on conditions of work at highlands.

2. Implemented numerical analysis of the models of respiratory exchange control enables to:

- follow dynamics of the main physiological parameters of the model during transient processes and in stationary states;
- forecast and quantitatively assess regulatory reactions of the organism under given disturbances;
- carry out individualization of model developments on condition of availability of array of data on anatomic-physiological peculiarities of specific human being.

Obtained results are well correlated with the physiological experimental data.

Conclusions: Presented results of computer analysis of the model demonstrate that hypometabolism is a pre-requisite for stabilization of organism's state under highland hypoxia.

Calculations on mathematical model of the process of gas mass transfer with hypometabolism mechanism demonstrate that stabilization of breathing and blood circulation system state require less metabolic cost of regulatory mechanisms under highland conditions.

Keywords: mathematical model, breathing and blood circulation system, gas tensions, hypoxia, hypometabolism, disturbing impacts, computing experiments.

1. Gray J.S. The multiple factor theory of respiratory regulation. *Science*. 1946. V.103. P.739–744.
2. Grodins F. Mathematical analysis and digital simulation of the respiratory control system. *J. Appl. Physiol.* 1967. Vol. 22, № 2. P.260–276.
3. *Bioecomedicine. United information space* / edited by V.I. Grytsenko. Kiev: Naukova dumka, 2001. 318 p. (in Russian).

4. Lauer N.V., Kolchinskaya A.Z., Kulikov M.A. Calculation of parameters of organism's oxygen regimes and development of oxygen cascades. *Organism's oxygen regime and its regulation*. - Kiev: Naukova dumka, 1966, p.16–22 (in Russian).
5. Kolchinskaya A.Z., Man'kovskaya I.N., Misiura A.G. *Breathing and oxygen regimes of dolphins' organisms*. — Kiev: Naukova dumka, 1980. 332 p. (in Russian).
6. Biloshyts'kyi P. V., Kliuchko O. M., Onopchuk Yu. M. Study of hypoxia issues by Ukrainian scientists in the area of Elbrus mountain. *Bulletin of NASU*. 2007, no 3–4. P. 44–50 (in Russian).
7. Onopchuk Yu.N., Misiura A.G. Methods of mathematical modeling and control in theoretical research and applied problem solving in sports medicine and physiology. *Sports medicine*. 2008, no 1. P. 181–188 (in Russian).
8. *Table of International Standard Atmosphere*. Available at: <http://www.vsetabl.ru/154.htm>.

Получено 29.09.2014

КОНЦЕПЦИЯ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДКОЙ САМОЛЕТОВ ПО СВОБОДНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ С ТЕХНОЛОГИЕЙ РЕШЕНИЯ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ

В.В. Павлов, Д.А. Волошенюк, А.Е. Волков

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины

Рассмотрен вопрос необходимости создания комплексной системы управления посадкой самолетов по свободным траекториям, основанной на принципах эргатичности и сетецентричности и учитывающей возможные конфликтные ситуации самолетов в воздухе с целью их предупреждения или разрешения. Задачей системы станет повышение безопасности авиационных перевозок, решение части экологических и экономических проблем, решение проблемы перегруженности аэропортов по причине возрастающей интенсивности воздушного движения.

Ключевые слова: сетецентрическая система, посадка самолетов, конфликтные ситуации, свободные траектории, планирование, расхождение самолетов, угроза столкновения.

Розглянуто питання необхідності створення комплексної системи керування посадкою літаків за вільними траєкторіями, заснованої на принципах ергатичності та мережецентричності з врахуванням можливих конфліктних ситуацій літаків в повітрі, з метою попередження або вирішення цих ситуацій. Завданням системи стане підвищення безпеки авіаційних перевезень, вирішення частини екологічних та економічних проблем, вирішення проблеми перевантаженості аеропортів з причини зростаючої інтенсивності повітряного руху.

Ключові слова: мережецентрична система, посадка літаків, конфліктні ситуації, вільні траєкторії, планування, розбіжність літаків, загроза зіткнення.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на сменяющиеся технологические уклады, авиастроение остается одной из ключевых отраслей мировой экономики. Даже в условиях затяжного экономического кризиса отрасль сохраняет высокие темпы роста.

Объем и характер задач, выдвинутых сейчас как перед гражданской авиацией Украины, так и перед мировыми компаниями авиастроения, требует не частичных улучшений, а значительных комплексных мер, которые бы определили дальнейший качественный прыжок в ее развитии.

Исходя из этого, и учитывая резко возрастающую интенсивность воздушного движения в мире, и становится очевидной актуальность создания комплексной системы, которая сможет управлять посадкой самолетов по свободным траекториям в условиях возможных конфликтных ситуаций, основываясь на эргатических и сетецентрических принципах управления.

Высокий уровень риска авиационного происшествия связан с такими этапами и ситуациями полета, как взлет и посадка воздушных кораблей (ВК) в аэропортах с высокой интенсивностью воздушного движения, посадка в

сложных метеорологических условиях, угроза конфликтных ситуаций с другими воздушными кораблями, технические неисправности на борту самолета или в системах связи с землей и другими.

Следует помнить и о тех проблемах в авиации, необходимость решения которых закреплена доктринами и резолюциями различных мировых общественных авиационных организаций, таких как ИКАО (Международная организация гражданской авиации) [1]. Речь идет о следующих проблемах:

- экологической, основная часть которой заключается в необходимости уменьшения авиационных шумов и вредных выбросов в атмосферу;
- экономической, которая состоит в необходимости экономии средств и материальных ресурсов, особенно в периоды мировых экономических кризисов;
- транспортной, суть которой в необходимости создания новых и модернизации старых аэропортов, пересадочных и технических пунктов, транспортных развязок и т.д.;
- проблеме повышения безопасности полетов, которая является одной из основных.

Постановка задачи

Исходя из сказанного и учитывая современные тенденции в развитии науки, техники и непосредственно авиации, мы видим задачу в том, чтобы создать комплексную систему, которая будет:

- обеспечивать посадку самолетов в аэропортах по новой технологии свободных траекторий в режиме планирования или малой тяги;
- обеспечивать предупреждение угрозы столкновения воздушных кораблей и при необходимости решать конфликтные ситуации такого рода по высшим современным требованиям авиационной безопасности;
- обеспечивать наблюдение за всем процессом полета воздушного корабля и передавать все необходимые данные в диспетчерские центры в реальном масштабе времени;
- работать, основываясь на принципах и технологиях интеллектуальных сетевых систем удаленного управления, оставаясь при этом эргатической.

Соответственно, **целью** работы является создание эргатической сетевых системы управления посадкой самолетов по свободным траекториям с учетом факторов конфликтных ситуаций.

Идея создания такой системы заключается в применении сетевых технологий и систем удаленного управления динамическими объектами, а именно воздушными кораблями. При этом необходимо отметить, что под сетевых системой удаленного управления ВК понимается такая структура удаленного управления, которая предусматривает взаимосвязь бортовых систем управления ВК с системой наземного управления, которая в свою очередь взаимодействует с распределенной сетевых системой выдачи команд управления и передачи данных. Сетевых система предусматривает управление

ВК в реальном масштабе времени с учетом сетевых задержек и потерь пакетов информационных данных. Такая система обеспечивает системную и функционально-временную совместимость ВК, как объекта управления, с наземными интеллектуальными информационно-управляющими комплексами диспетчерских центров.

Результатом работы станет создание в области авиационной индустрии системы, которая позволит:

- количественно и качественно повысить уровень экологичности и экономичности полетов в авиации в целом;
- существенно повысить уровень безопасности полетов;
- разгрузить воздушную зону ожидания в районе аэропорта;
- решить проблему перегрузки аэропортов воздушным движением;
- повысить эффективность использования авиационной техники и т.д.

Внедрение сетевцентрической системы управления посадкой самолетов по свободным траекториям с технологией решения конфликтных ситуаций приведет к переходу на новый уровень технологического обеспечения в авиации.

Анализ последних исследований и публикаций по данной проблеме показывает, что в настоящее время широкое распространение получили два классических принципа управления движением ВК — принципы «жестких» и «гибких» траекторий [2].

Принцип «жестких» траекторий реализует программно-позиционную стратегию управления и отвечает известной концепции «невозмущенного-возмущенного» движения Ляпунова-Летова и заключается в стабилизации заранее рассчитанной «жесткой» программной (номинальной, опорной) траектории движения объекта $x^*(t)$, обеспечивающей выполнение управления при идеальных условиях движения. Здесь алгоритм управления $u(t)$ состоит из программной составляющей $u^*(t)$, реализующей требуемое невозмущенное движение аппарата $x^*(t)$, и стабилизирующей составляющей $\Delta u(t)$:

$$u(t) = u^*(t) + \Delta u(t), \quad (1)$$

$$x(t) = x^*(t) + \Delta x(t), \quad (2)$$

где $\Delta x(t)$ — отклонение фактического движения $x(t)$ от требуемого $x^*(t)$, вызванное действием неконтролируемых возмущающих факторов:

Алгоритм программного управления является решением задачи управления «в большом» на основе исходной нелинейной модели объекта (1)–(2). Здесь решение задачи расчета программных траекторий может осуществляться априорно (жесткое программирование) или непосредственно в процессе управления (свободное программирование) и связано с использованием вычислительных методов решения двухточечных краевых задач.

Алгоритм стабилизации является решением классической задачи управления «в малом» на основе его линеаризованной модели:

$$\Delta dx/dt = A(t)\Delta x + B(t)\Delta u, \quad (3)$$

$$\Delta y = C(t)\Delta x, \quad (4)$$

где функциональные матрицы $A:T \rightarrow R^{n \times n}$, $B:T \rightarrow R^{n \times r}$, $C:T \rightarrow R^{m \times r}$ рассчитываются через матрицы Якоби правых частей уравнений (1)–(2):

$$A(t) = \delta / \delta x * f(t, x, u)^*, B(t) = \delta / \delta u * f(t, x, u)^*, C(t) = \delta / \delta x * g(t, x)^*, \quad (5)$$

которые вычисляются для невозмущенного движения $(u^*(t), x^*(t))$.

Анализ стратегий управления на основе концепции «невозмущенного-возмущенного» движения показывает, что они оправданы лишь при малых возмущениях номинальной траектории движения ВК и становятся нерациональными при больших ее возмущениях, что распространено в современных технологиях посадки самолетов.

Принцип «гибких» траекторий реализует чисто программную стратегию управления и заключается в реализации «гибкой», обновляемой (многократно пересчитываемой) с заданной периодичностью программной траектории движения объекта, обеспечивающей выполнение управления в реальных условиях движения из состояния, соответствующего моменту времени ее обновления. Здесь рассчитываемый и исполняемый на каждом интервале обновления алгоритм программного управления является решением задачи управления «в большом» на основании исходной нелинейной модели ВК.

Согласно терминологии Н.Н. Моисеева, способ управления по принципу «жестких» траекторий именуется коррекцией по заданной программе, а способ управления по принципу «гибких» траекторий — коррекцией по конечному состоянию.

Принцип «гибких» траекторий заключается в отказе от привязки управляемого движения ВК к заранее запланированной (номинальной) траектории и формировании (при необходимости) более выгодных траекторий движения к целевому состоянию, исходя из фактических условий движения объекта. Возможны следующие три способа реализации данного принципа.

1. Процесс управления разбивается на временные циклы, на каждом из которых рассчитывается желаемая траектория движения, исходя из измерительной информации о фактическом состоянии объекта вначале этого цикла. В течение цикла расчетная (плановая) траектория стабилизируется.

2. Переход на новую плановую траекторию осуществляется при возмущениях расчетной траектории, превышающих заданный порог.

3. Планирование траекторий осуществляется для каждого состояния объекта. Данный способ можно интерпретировать как принцип «размораживания» начальных условий, суть которого состоит в построении алгоритма управления для фиксированных начального момента времени t_0 и начального состояния $x(t_0) = x_0$:

$$u = h(t | t_0, x_0), \quad (6)$$

и далее — в замене начальных условий текущими:

$$u(t) = h(t | t, x(t)). \quad (7)$$

Качественное отличие стратегий управления на основе концепции «невозмущенного-возмущенного» движения и принципа гибких траекторий иллюстрирует рис. 1. Здесь показано номинальное движение и рассмотрены три различные стартовые ситуации для возмущенного движения. Стратегиям жесткой траектории отвечают пунктирные кривые. Видно, что в ситуации 1 такая стратегия нерациональна, а в ситуации 3 — неприемлема. Для сравнения показаны соответствующие движения, реализующие принцип гибких траекторий.

На рис. 2 иллюстрируется возможность сочетания обоих принципов в решении задач управления: в окрестности номинальной траектории вводится коридор стабилизации движений, внутри которого осуществляется стабилизация номинальной траектории. Вне данного коридора включается механизм действия гибких траекторий.

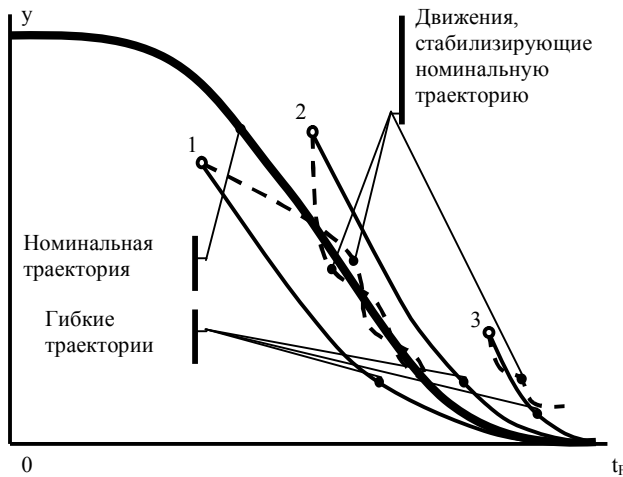


Рис. 1. Сравнение принципа гибких траекторий и концепции «невозмущенного-возмущенного» движения

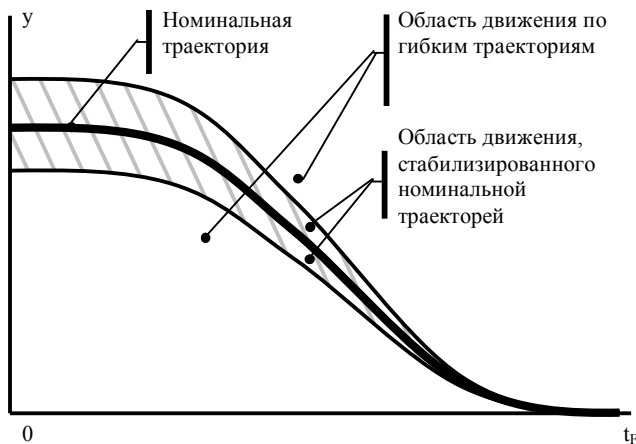


Рис. 2. Возможность сочетания обоих принципов

Необходимо отметить, что управление воздушным кораблем различается по типу программ:

- управление с временной программой, когда программное значение управляемой величины задается в виде определенной функции времени;
- управление с параметрической программой, когда программное значение управляемой величины задается как определенная функция другой переменной (например, задание программного угла тангажа как функции величины кажущейся скорости объекта или задание программной величины перегрузки как функции величины пройденного объектом пути).

Высокие требования к качеству процессов управления приводят к необходимости их оптимизации. Наибольшее распространение получили критерии оптимальности, характеризующие точность управления в момент времени (задача Майера) и качество управления на всем временном интервале (задача Лагранжа). Следует отметить, что в настоящее время широкое распространение имеет точка зрения, что «процессы управления в бортовых системах существенно стохастичны» и «наиболее подходящим, органически необходимым при построении бортовых систем управления является стохастический синтез оптимального управления» [3, 4].

Основная трудность решения задачи управления по «гибким» траекториям обусловлена их двухточечным краевым характером. Весьма эффективный подход к ее преодолению основан на использовании так называемого метода обратных задач динамики [5]. Характерная особенность последнего состоит в том, что сначала задается программное движение объекта (удовлетворяющее заданным краевым условиям), а затем определяется управление, реализующее это движение в силу динамики объекта. Однако, данный подход неприменим для общего класса нелинейных и негладких аффинных (линейных по управлению) объектов управления.

Принцип управления ВК по технологии «гибких» траекторий является одним из наиболее популярных и развитых. Однако и он имеет ряд недостатков, которые не позволяют решить проблемы, описанные в начале статьи. И прежде всего, данная технология так и не была полноценно внедрена.

Необходимо отметить, что относительно новых технологий и систем посадки по «гибким» или «свободным» траекториям и различных способов решения конфликтных ситуаций воздушных кораблей, основанных на различных концепциях и принципах управления, было опубликовано немало патентов на изобретения в разных странах мира: Способ определения скорости захода самолёта на посадку по параметрам полёта (патент RU 2444706); Способ и система управления самолетом при бездвигательной посадке (патент US 23215); Способ автоматической посадки самолета (патент RU 2061624); Способ управления летательным аппаратом при заходе на посадку (патент RU 2496131); Устройство для предотвращения столкновений летательного аппарата (патент RU 2153195).

Подводя итог анализу современных систем и технологий посадки самолетов, средств и способов предотвращения конфликтных ситуаций

воздушных кораблей, можно выделить нерешенные вопросы в этой проблеме. Описанные выше способы и устройства, так же как и описанная технология управления по «гибким» траекториям, имели ряд существенных недостатков и так и не были внедрены. Не была решена комплексная проблема разработки новой системы посадки, которая повысила бы экологичность и экономичность полетов, решила бы проблему перегруженности аэропортов воздушным движением, учитывала бы факторы конфликтных ситуаций, и которая была бы построена на сетевых технологиях удаленного управления, что позволило бы повысить безопасность полетов.

ПОСАДКА САМОЛЕТОВ ПО СВОБОДНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ С ТЕХНОЛОГИЕЙ РЕШЕНИЯ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ

Для начала опишем и охарактеризуем современный процесс посадки самолета в аэропорту с интенсивным движением воздушного транспорта [6].

Посадка является завершающим этапом полета и представляет собой замедленное движение самолета с высоты эшелона до полной остановки после пробега по земле. Посадка самолета, как правило, состоит из следующих этапов: снижения, планирования, выравнивания, выдерживания, приземления, пробега (рис. 3).

Посадка — сложный и ответственный маневр, завершающий полет. Ему предшествуют этап выхода к аэродрому и этап захода на посадку.

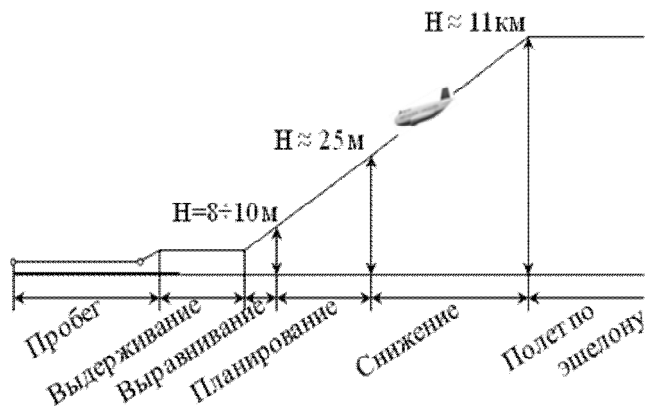


Рис. 3. Современная технология посадки самолетов

Посадка самолета начинается со снижения самолета. Затем следует предпосадочное планирование, которое выполняется с выпущенными шасси и закрылками (щитками), что делает аэродинамическое качество небольшим. Угол планирования и вертикальная скорость при этом значительно увеличиваются, что усложняет впоследствии технику выполнения выравнивания. При наличии тяги угол планирования и вертикальная скорость уменьшаются, поэтому на современных скоростных самолетах планирование осуществляется, как правило, с некоторой тягой, тем более, что в этом случае облегчается уход на второй круг.

Выравнивание представляет собой процесс перехода от прямолинейного равномерного снижения к траектории горизонтального полета в конце выравнивания. При подходе к высоте начала выравнивания (которая определяется визуально и составляет 8–10 м) летчик увеличивает угол атаки самолета, создавая тем самым дополнительную подъемную силу ΔY , которая искривляет траекторию. Увеличение угла атаки сопровождается увеличением силы лобового сопротивления, вследствие чего происходит уменьшение поступательной скорости.

Выдерживание производится для уменьшения скорости до посадочной и представляет собой торможение самолета в горизонтальном полете. При выдерживании самолет летит горизонтально, так как подъемная сила равна весу, а скорость полета уменьшается из-за того, что сила лобового сопротивления ничем не уравновешена и тормозит движение. Для поддержания заданной высоты над поверхностью аэродрома по мере падения скорости летчик соразмерно увеличивает угол атаки (т. е. C_y), что позволяет сохранить подъемную силу, а следовательно, и прямолинейность траектории.

В момент, когда угол атаки окажется равным посадочному ($\alpha = \alpha_{\text{пос}}$), дальнейшее его увеличение прекращают. Скорость полета при выдерживании, соответствующая этому моменту, называется посадочной. В процессе выдерживания самолет снижается до высоты менее одного метра. После этого начинается парашютирование, при котором $Y < G$, а скорость практически не успевает измениться, так как оно длится малое время и самолет приземляется на посадочную полосу.

В конце выдерживания перед приземлением подъемная сила равна весу самолета, т.е. $Y = G$, а угол атаки равен посадочному, тогда:

$$Y = G = C_{y \text{ пос}} * ((\rho * V_{\text{пос}}^2) / 2) * S, \quad (8)$$

где G — вес самолета при посадке; $C_{y \text{ пос}}$ — коэффициент подъемной силы при посадочном угле атаки; 0,94 — коэффициент, учитывающий близость земли.

Откуда

$$V_{\text{пос}} = (2 * G / (C_{y \text{ пос}} * \rho * S))^{0,5}. \quad (9)$$

При приближении к поверхности земли начинает сказываться эффект «воздушной подушки», вследствие чего происходит как бы увеличение плотности воздуха. С учетом этого явления можно записать:

$$V_{\text{пос}} = 0,94 * (2 * G / (C_{y \text{ пос}} * \rho * S))^{0,5}. \quad (10)$$

Посадочной скоростью называется скорость в момент приземления. Она у всех самолетов меньше скорости отрыва. Это объясняется тем, что посадочный вес самолета меньше веса взлетного, а $C_{y \text{ пос}} > C_{y \text{ отр}}$, поскольку используется больший угол отклонения закрылков (щитков), а, кроме того, перед самым приземлением нет необходимости иметь запас угла атаки, как после отрыва.

Пробег самолета является заключительным этапом посадки. После касания земли самолет совершает пробег на основных колесах шасси, после чего летчик плавно опускает носовое колесо и начинает торможение

основных колес. У самолетов с хвостовым колесом посадка совершается на все три точки и торможение основных колес производится с таким расчетом, чтобы не было капотирования самолета.

Однако необходимо отметить, что используемый в наше время процесс посадки самолета (описанный выше) не соответствует многим современным требованиям в области гражданской авиации и не решает многие из проблем, озвученных перспективными доктринами ИКАО. Поэтому создание новой сетцентрической системы управления посадкой самолетов по свободным траекториям с технологией решения конфликтных ситуаций имеет высокую и объективную актуальность.

Рассмотрим принцип и технологию работы такой новой системы (рис. 4).

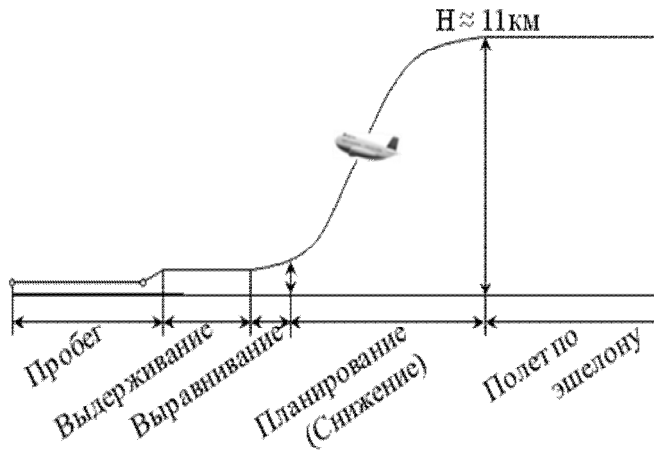


Рис. 4. Технология посадки самолета по свободным траекториям

В основу разрабатываемой системы посадки положена идея объединения этапов снижения и планирования только в этап планирования с высоты эшелона до этапа выравнивания перед посадкой (рис. 4). Предусматривается существенное сокращение дистанций и высоты этапов выравнивания и выдерживания.

Первые полученные результаты расчетов и моделирования показывают, что это возможно. С помощью достаточного управления аэродинамическими характеристиками самолета процесс его планирования с эшелонной высоты (например, 11 км) при режиме работы двигателей «малый газ» или «полетный малый газ», до высоты его окончательного выравнивания и посадки (около 8–10 метров) позволит:

- существенно повысить уровень экологичности полетов за счет уменьшения вредных выбросов в атмосферу и уменьшить авиационные шумы в районе аэропортов за счет работы двигателей в режиме «малый газ»;
- увеличить экономичность полетов за счет экономии топлива на этапе посадки;
- разгрузить воздушную зону ожидания в районе аэропорта и решить проблему перегрузки аэропортов воздушным движением;
- и, соответственно, повысить эффективность использования

авиационной техники.

Основной проблемой при разрабатываемой технологии посадки и планирования самолета является вопрос сохранения стабильной подъемной силы и, соответственно, обеспечения максимального уровня безопасности. Однако решение этой проблемы не вызывает сложностей благодаря современным возможностям воздушного корабля, а именно, большому разнообразию систем управления и корректировки аэродинамических характеристик: различные формы и площади крыла, изменяемая конфигурация крыла, динамическое изменение угла установки двигателей, системы элеронов, закрылок, предкрылок, интерцепторов, тормозных щитков и т.д. Также актуальным здесь будет использование способа распределенной аэродинамической компенсации действия ветровых возмущений на траекторию полета воздушного судна [7], который включает измерение величины действия ветрового возмущения, создание сигнала компенсации изменением профиля крыла и подачу его к контуру управления высотой полета. Перед подачей сигнала компенсации путем изменения профиля крыла к контуру управления высотой полета создают противоположный по знаку сигнал компенсации действия ветровых возмущений, определяют дополнительные изменения величин характеристик аэродинамической схемы профиля крыла, выбирают лучший вариант распределения сил и моментов изменения аэродинамической схемы профиля крыла, при котором достигается максимальное значение подъемной силы. Использование такого способа позволит оперативно и качественно управлять подъемной силой самолета при планировании.

На данный момент уже успешно разрабатываются программы по моделированию новой системы посадки на различных языках программирования. Планируется создание универсальной программы, которая будет точно моделировать посадку самолета по свободным траекториям, производя расчеты всех этапов посадки для любого конкретного самолета с учетом его характеристик, и будет строить модель траектории посадки на всех этапах: переход из полета по эшелону к планированию, планирование, выравнивание, выдерживание и приземление с пробегом по взлетно-посадочной полосе (ВПП).

Следует отметить, что для создания такой программы моделирования, которая будет способна наглядно и точно продемонстрировать процесс и преимущества новой разрабатываемой системы посадки, необходимо построить точную математическую модель конкретного самолета с учетом всех его физических, аэродинамических и других характеристик. Уже сейчас удалось создать математическую модель современного самолета Ан-148 в среде MatLab. Ведутся работы над созданием моделей Ан-158, Ан-124, Ту-154, Boeing-737. В ходе исследований удалось получить аэродинамические характеристики самолета, в том числе и параметры подъемной силы, такие как коэффициента лобового сопротивления (C_x) и коэффициента подъемной силы (C_y), а также их зависимости от угла атаки (α) (рис. 5, 6). Также уже были получены и первые графики построения траектории посадки самолета (рис. 7).

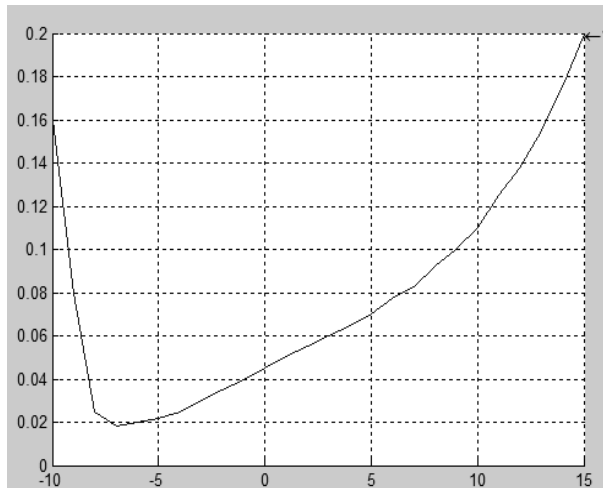
C_x 

Рис. 5. Полученные зависимости коэффициента лобового сопротивления от угла атаки

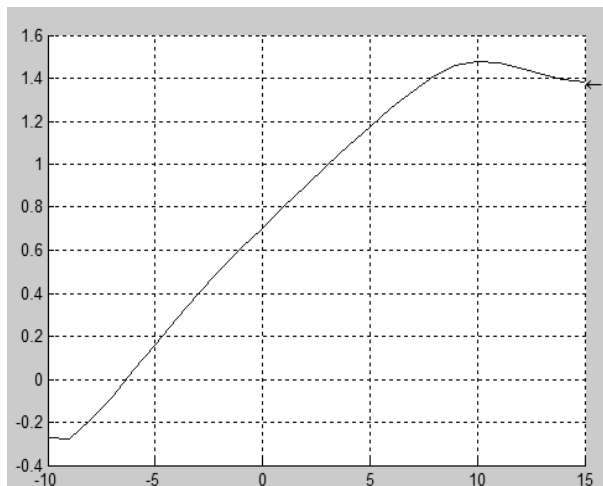
 C_y 

Рис. 6. Полученные экспериментально зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки

Параллельно создаются и более наглядные программы моделирования (рис. 8), которые основаны на полученной математической модели самолета [8].

Перспективными направлениями в данной области исследований и в вопросах создания новых систем управления воздушными кораблями, в том числе и систем посадки, является использование сетцентрических и нейросетевых технологий. Это позволит системе быть более точной и быстрой, что создаст новую концепцию управления ВК, которая позволит повысить безопасность полетов. Использование сетцентрических

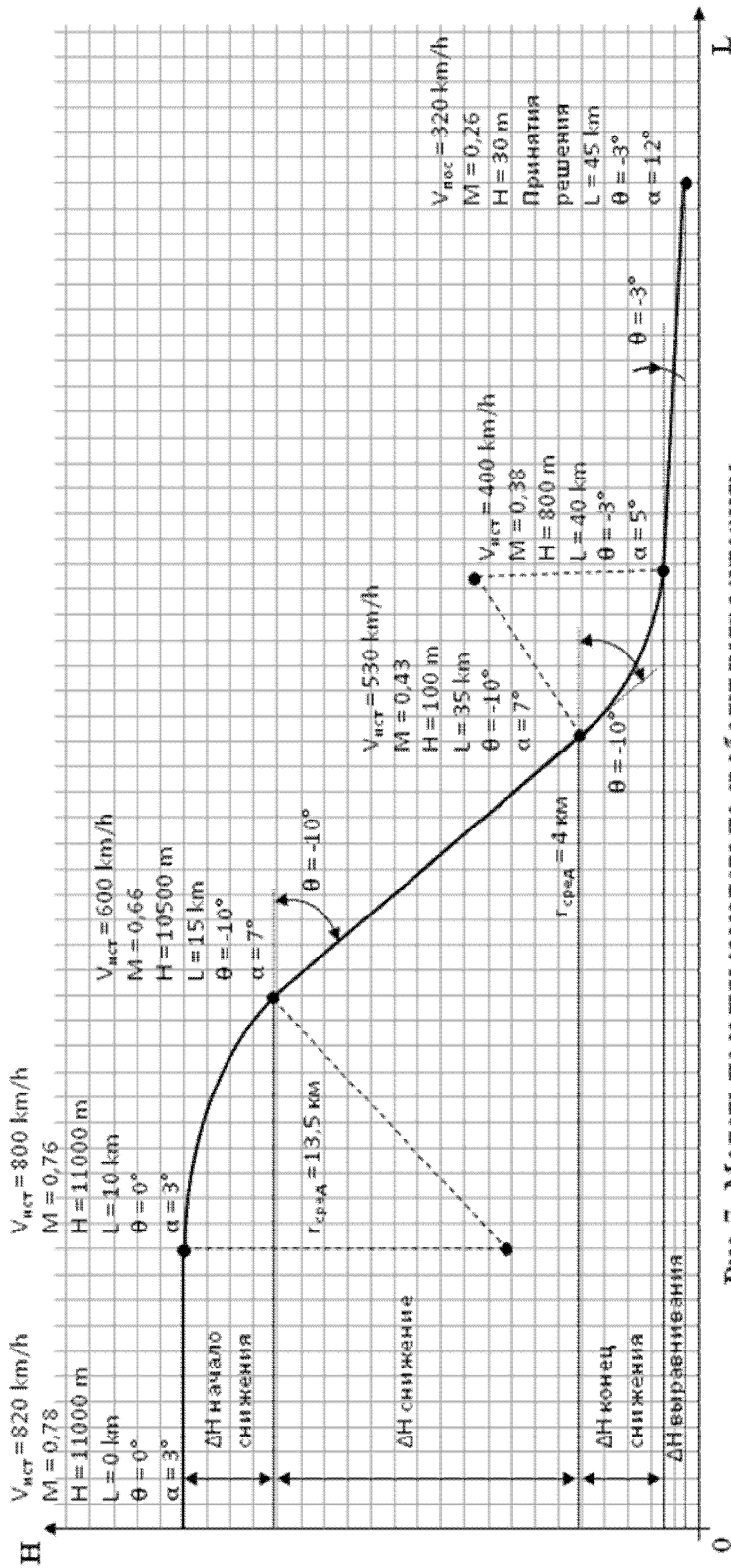


Рис. 7. Модель посадки самолета по свободным траекториям

технологий даст возможность улучшить систему передачи и приема информационных данных в разных направлениях (между системами на борту самолета, между самолетами на земле и в воздухе, между диспетчерскими и инженерными центрами на земле, между самолетами и диспетчерскими центрами и т.д.), создать средства защиты от постороннего вмешательства и обеспечить наземные службы возможностями контроля, наблюдения и управления системами самолета.

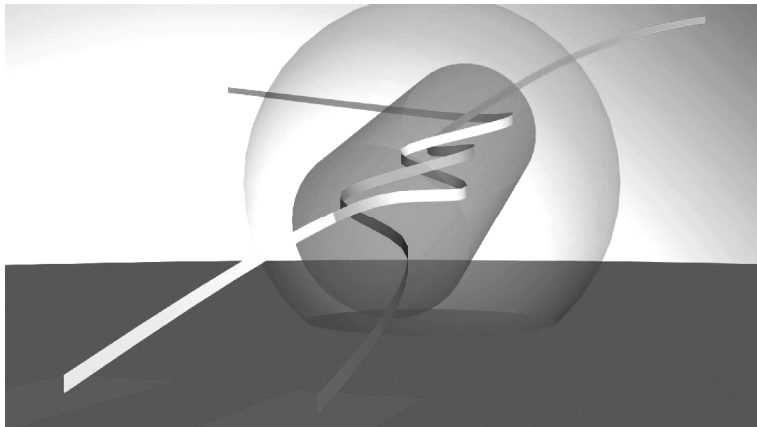


Рис. 8. Технология решения конфликтных ситуаций ВК на этапе посадки

Перспективным является и проблема создания комплексной системы управления посадкой, которая будет способна решать конфликтные ситуации между воздушными кораблями. В процессе решения данной проблемы уже получены существенные результаты. Разрабатывается технология решения конфликтных ситуаций воздушных кораблей для предложенной системы посадки самолетов. Моделирование работы данной технологии показывает успешное расхождение воздушных кораблей в районе аэропорта (рис. 8).

ВЫВОДЫ

Сетецентрическая система, основанная на автоматическом управлении посадкой самолета с максимальной точностью и безопасностью, повышающая уровень экологичности за счет снижения вредных выбросов в атмосферу и снижения шумов, является одной из первоочередных задач в усовершенствовании использования авиационной техники, что закреплено резолюциями многих международных и государственных авиационных организаций. Использование в такой системе сетевых технологий для управления в масштабе реального времени дает возможность снизить напряженность пилотов на одном из самых трудных этапов полета — на посадке. Заход на посадку по свободным траекториям с учетом особенностей каждого самолета позволит уменьшить нагрузку в аэропортах с большой интенсивностью движения, освободить дополнительные эшелоны, снять проблему воздушных очередей в зоне аэропорта. Введение в такую систему функционала решения конфликтных ситуаций воздушных кораблей на этапе посадки позволяет создать новую концепцию управления самолетами.

Как итог, необходимо отметить что:

- результаты математических расчетов и компьютерного моделирования показывают возможность создания сетцентрической системы управления посадкой самолетов по свободным траекториям с технологией решения конфликтных ситуаций;
- созданная математическая и компьютерная 3D-модель самолета позволяет проводить точные исследования и эксперименты с получением реальных аэродинамических характеристик и показателей;
- полученные путем моделирования аэродинамические характеристики самолета совпадают с данными технической документации, что подтверждает их достоверность;
- рассчитанная траектория захода на посадку регионального самолета по свободным траекториям (в режиме работы двигателей «малый газ») показывает практическую целесообразность данной технологии посадки за счет снижения расходов топлива, а соответственно, и уменьшения вредных выбросов и шумов в районе аэропорта;
- принцип свободных траекторий захода на посадку в сочетании с сетцентрической автоматической системой такой посадки позволяет снизить напряженность пилотов и диспетчеров, частично решить проблему интенсивности воздушного движения в аэропортах;
- реализованная программа анализа работы сетевых технологий и управления динамическими объектами дает возможность оценивать качество работы системы в целом и позволяет контролировать и улучшать работу систем передачи данных;
- технология предотвращения конфликтных ситуаций воздушных кораблей и/или их разрешения на этапе посадки самолета позволяет обеспечить высокую безопасность полетов, особенно на одном из сложнейших этапов.

Разработка и внедрение такой системы, переход на новую концепцию управления воздушными кораблями – это шаг вперед в развитии авиационной промышленности как в Украине, так и в мире, переход на новый уровень безопасности авиационного движения.

1. Циркуляры ИКАО по эргономике и человеческому фактору (вып. 1–12). — ИКАО: 2000.
2. Теряев Е.Д. Развитие концепции гибких траекторий в задаче терминального управления подвижными объектами / Е.Д. Теряев, К.В. Петрин. — М.: Известник Института машиноведения РАН, 2009. — 18–23 с.
3. Петров Б.Н. Бортовые терминальные системы управления: Принципы построения и элементы теории / Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов. — М.: Машиностроение, 1983. — 542 с.
4. Бек В.В. Интегрированные системы терминального управления / В.В. Бек, Ю.С. Вишняков, А.Р. Махлин. — М.: Наука, 1989. — 254 с.
5. Жевнин А.А. Синтез алгоритмов терминального управления на основе концепции обратных задач динамики / А.А. Жевнин, К.С. Колесников. — Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, 1985, №4. — С. 180–188.
6. Мхитарян А.М. Динамика полета / А.М. Мхитарян, П.С. Лазнюк, В.С. Максимов и др. — М.: Машиностроение, 1978. — 424 с.

7. Павлов В.В. Технология композиционного управления конфигурацией крыла / В.В. Павлов, К.А. Копытова. — Сборник научных трудов «Кибернетика и вычислительная техника», 2012, №168. С. 53–60.
8. Павлов В.В. Компьютерное моделирование современных воздушных судов с использованием сетевых технологий отдалённого управления / В.В. Павлов, А.Е. Волков, Д.А. Волошенюк. — Вестник Национального авиационного университета, 2013, №4 (57). — С. 18–22.

UDC 681.518

THE NETWORKCENTRIC MANAGEMENT SYSTEM FOR LANDING PLANES BY THE FREE PATH USING TECHNOLOGY OF CONFLICT SITUATION RESOLUTION

V.V. Pavlov, A.E. Volkov, D.A. Voloshenyuk

International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine

Introduction: Comprehensive implementation of virtual technology development and support is a prerequisite for performing a variety of important tasks such as maintenance of complex scientific and engineering calculations, updating production, reduce risks, improve the reliability of products.

Purpose: The creation of a network-centric control system for planes landing at free path with regard to the factors of conflict situations.

Results: The development and the use of aircraft are directly related to modeling in those areas where information systems are complex. In addition, the simulation is a major step in system analysis. So, of course, there are modern information technologies that provide automation of this process.

However, it should be noted that the specific main task that stands before us now is not normal flight simulation aircraft and its flight simulations under difficult circumstances, conflicts, threats to the collision at take-off and landing phases. That is, those flight conditions when the danger is at its highest level and taking into account the human factor may be a threat of disaster.

Conclusion: The question of the need to create a complex control system planes landing at free paths, which will be based on the principles of network-centric and ergatic, and will take into account potential conflicts of aircraft in the air for the purpose of warning or permission. The task of the system will improve the safety of air transportation, the solution of the environmental and economic problems, the problem of congestion of airports because of increasing air traffic.

Keywords: network-centric system, landing of aircraft, conflict situations, free trajectory planning, divergence aircraft, collision threat.

1. *The ICAO circulars on ergonomics and human Factors* (№. 1–12). ICAO: 2000 (in Russian).
2. E.D. Teryaev, K.V. Petrin Development of the concept of flexible trajectories in the backs of the terminal control moving objects. Moscow: *Bulletin of the Institute of Mechanical Engineering RAS*, 2009. 18–23 p. (in Russian).
3. Petrov B.N., Portnov-Sokolov Yu.P., Andrienko A.Ya., Ivanov V.P. *Onboard terminal management system: Principles and elements of the theory*. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 542 p. (in Russian).

4. Bek V.V., Vishnyakov Yu.S., Mahlin A.R. *Integrated systems of the terminal control*. Moscow: Nauka, 1989. 254 p. (in Russian).
5. Zhevnin A.A., Kolesnikov K.S. Synthesis of terminal control algorithms based on the concept of inverse problems of dynamics. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Tehn. cybernetics*, 1985, №4. P. 180–188 (in Russian).
6. Mhitaryan A.M., Laznyuk P.S. and other. *Aircraft Flight Dynamics*. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 424 p. (in Russian).
7. Pavlov V.V., Kopyitova K.A. Technology composite wing configuration management. *Cybernetics and Computer Science*, 2012, №168. P. 53–60. (in Russian).
8. Pavlov V.V., Volkov A.E., Voloshenyuk D.A. Computer simulation of modern aircrafts using network technologies remote management. *Bulletin of the National Aviation University*, 2013, №4 (57). P. 18–22. (in Russian).

Получено 05.07.2014

Информатика и информационные технологии

УДК 616.1/8-07:577.2

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПЕРСОНИФИКАЦИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Л.С. Файнзильберг

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины

Предложен подход к персонифицированной диагностике, основанный на оценке индивидуальной нормы конкретного пользователя по результатам многократных наблюдений. Рассмотрены схемы персонифицированных решений, предусматривающие анализ взаимного расположения в пространстве диагностических признаков областей индивидуальной и популяционной норм. Приведены примеры персонифицированных диагностических решений для оценки текущего состояния сердечно-сосудистой системы.

Ключевые слова: персонифицированная медицина, диагностика, сердечно-сосудистая система.

Запропоновано підхід до персоніфікованої діагностики, заснований на оцінці індивідуальної норми конкретного користувача за результатами багаторазових спостережень. Розглянуто схеми персоніфікованих рішень, що передбачають аналіз взаємного розташування в просторі діагностичних ознак областей індивідуальної та популяційної норм. Наведені приклади персоніфікованих діагностичних рішень для оцінки поточного стану серцево-судинної системи.

Ключові слова: персоніфікована медицина, діагностика, серцево-судинна система.

ВВЕДЕНИЕ

В традиционной медицине давно уже сложилась ситуация, когда диагностические решения опираются на понятие медицинской нормы [1]. Однако клиническая практика показывает, что у многих людей протекание заболеваний выходит за общепринятые рамки. В связи с этим ученые активно обсуждают концепцию так называемой *персонифицированной* медицины [2, 3], способной повысить качество диагностики и лечения.

Основной принцип персонифицированной медицины — лечить больного, а не болезнь, опираясь на *индивидуальные* особенности организма. Для этого необходимы современные средства диагностики, которые позволяют выявить риск возникновения того или иного заболевания у *конкретного* пациента на ранних стадиях и выбрать для него оптимальную врачебную тактику.

Согласно результатам аналитических исследований [4], в последнее время рынок медицинских изделий существенно изменил свое направление от

сложных систем клинического использования, на котором наблюдается относительная стагнация, к портативным цифровым приборам, которые *самостоятельно* могут использовать пациенты в домашних условиях. К таким изделиям относятся не только хорошо известные бытовые тонометры, глюкометры, пульсоксиметры, но и портативные электрокардиографы.

Приближение медицинских средств непосредственно к пациенту не может осуществляться лишь незначительными доработками и упрощением приборов клинического использования. Наоборот, разработка таких средств требует привлечения наукоемких информационных технологий, которые реализуют новые подходы к обработке информации и специфические методы предоставления наглядной информации пользователю, не имеющему медицинского образования [5].

Возникает естественный вопрос: какую информацию следует предоставить пользователю для самостоятельного принятия решений, сохранив при этом основной принцип медицины: «*не навредить*».

Цель статьи — предложить общую схему построения *персонализированных* диагностических решений и продемонстрировать возможность практической реализации такой схемы при оценке текущего функционального состояния сердечно-сосудистой системы с учетом *индивидуальных* особенностей электрокардиограммы конкретного пациента.

ОБЩАЯ ИДЕЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ

В клинической практике понятие медицинской нормы связывают с *референтными интервалами* — диапазонами значений физиологических показателей, полученных на основе популяционных обследований репрезентативных групп практически здоровых людей¹.

Однако следует заметить, что в соответствии с существующими методиками [6] при определении референтных интервалов для большинства физиологических показателей используются значения, полученные лишь у 95 % обследуемой группы здоровых людей. Это означает, что результат *отдельного* исследования конкретного пациента, вообще говоря, нельзя считать статистически значимым, поскольку показатели 5 % здоровых людей, т.е. *каждого двадцатого*, не «падают» в установленные рамки референтного значения.

Кроме того, хорошо известно, что большинство физиологических показателей, которые обычно измеряют у конкретного пациента для постановки диагноза (артериальное давление, частота пульса и многие другие), подвержены значительным спонтанным колебаниям (*true biological variability*) и это считается физиологической нормой [7–9]. В последнее время, в отличие от ранее существовавших представлений, многие исследователи обращают внимание на *интраиндивидуальные* изменения электрокардиограммы (ЭКГ) здорового человека в покое [10, 11], которые не является предвестником каких либо патологий.

¹ Подразумеваются не абсолютно здоровые люди, а лица, у которых отсутствует исследуемое заболевание.

Из сказанного следует, что если у здорового человека одно и то же исследование, например, регистрацию ЭКГ, повторить 20 раз, то с высокой вероятностью один из результатов этого исследования может оказаться *вне пределов* референтных диапазонов, указанных в [1, с. 62]. Поэтому для повышения достоверности диагностики необходим *персонафицированный* подход к трактовке значений измеренных показателей (диагностических признаков) с учетом возраста, пола пациента, образа жизни и других индивидуальных особенностей.

Рассмотрим вначале общую идею реализации такого подхода. Предположим, что на основе популяционных обследований репрезентативной группы практически здоровых людей в M -мерном пространстве показателей (диагностических признаков) x_1, \dots, x_M выделена популяционная «норма» в виде области Ω_0 с центром (средним значением) в точке C_0 .

Будем также полагать, что имеется возможность на достаточно *большом* промежутке времени проводить *многократные* измерения показателей x_1, \dots, x_M у *конкретного* пациента. В результате таких измерений в этом же пространстве строится «персонафицированная» область Ω_i с центром C_i , на которой распределены значения показателей этого пациента.

Рассмотрим четыре варианта взаимного расположения областей Ω_0 и Ω_i в пространстве признаков (рис. 1):

- $\Omega_i \subset \Omega_0$, т.е. область Ω_i *полностью* входит в референтную область Ω_0 популяционных обследований (рис. 1, а);
- $(\Omega_i \cap \Omega_0) \neq \emptyset$, $\Omega_i / (\Omega_i \cap \Omega_0) \neq \emptyset$, $C_i \in \Omega_0$, т.е. область Ω_i лишь частично входит в референтную область Ω_0 популяционных обследований, причем центр области персонафицированной нормы находится в области популяционной нормы (рис. 1, б);
- $(\Omega_i \cap \Omega_0) \neq \emptyset$, $\Omega_i / (\Omega_i \cap \Omega_0) \neq \emptyset$, $C_i \notin \Omega_0$, т.е. область Ω_i также входит в референтную область Ω_0 популяционных обследований, однако центр области персонафицированной нормы не находится в области популяционной нормы (рис. 1, в);
- $(\Omega_i \cap \Omega_0) = \emptyset$, т.е. область Ω_i выходит за пределы референтной области Ω_0 популяционных обследований (рис 1, г).

Следуя методологии, принятой в теории распознавания образов, будем оценивать степень отклонения состояния i -го пациента от нормы в момент времени t по расстоянию r между значением текущего вектора $x^{(M)}(t) = (x_1(t), \dots, x_M(t))$ из области Ω_i и эталоном C_0 . Тогда в первой ситуации (рис. 1, а) пациента следует признать здоровым. Поскольку во второй ситуации (рис. 1, б) среднее значение C_i также принадлежит области Ω_0 референтных значений, то в этой ситуации разумно отнести пациента к условно здоровым, несмотря на то, что результаты отдельных измерений не соответствовали референтным величинам.

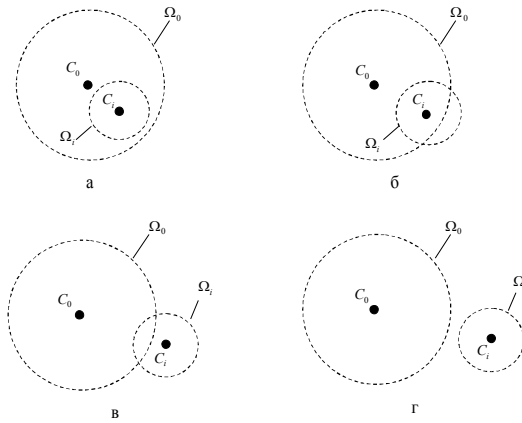


Рис. 1. Популяционная Ω_0 и индивидуальная Ω_i области значений показателей с центрами C_0 и C_i соответственно

В третьей же ситуации (рис. 1, в) и особенно в четвертой (рис. 1, г) не остается ничего иного как отнести пациента к группе больных или группе высокого риска заболеть, требующей углубленного дообследования.

Анализ взаимного расположения индивидуальных областей Ω_i , Ω_j разных пациентов по отношению к референтной области Ω_0 популяционных обследований (рис. 2) позволяет сравнивать *степени* выраженности патологии i -го и j -го пациента по расстояниям r_i и r_j между соответствующими центрами C_i , C_j и эталоном C_0 (рис. 2, а).

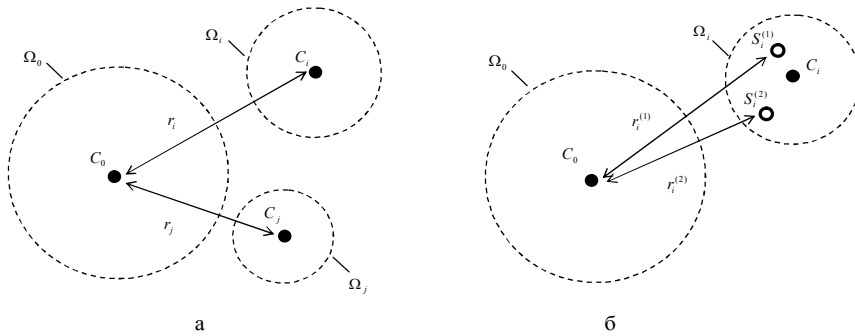


Рис. 2. Идея метода принятия персонифицированных решений:
а) — для двух пациентов; б) — для одного пациента

Понятно, что результаты каждого нового измерения показателей i -го пациента могут постоянно уточнять его персонифицированную норму Ω_i , а сравнение расстояний $r_i^{(1)}$ и $r_i^{(2)}$ между векторами признаков $x_i^{(M)}(t_1)$, $x_i^{(M)}(t_2)$ в состояниях $S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$ и эталоном C_0 позволяют заключить, что

состояние $S_i^{(2)}$ лучше состояния $S_i^{(1)}$, если $r_i^{(2)} < r_i^{(1)}$ (рис. 2, б).

И, наконец, *персонифицированная* область Ω_i показателей i -го пациента может быть разделена на отдельные зоны персонифицированных решений (рис. 3), а именно зоны

- I — персональной «нормы»;
- II — умеренных отклонений от персональной «нормы»;
- III — выраженных отклонений от персональной «нормы».

При этом с помощью разделяющей линии (поверхности) B , определяемой уравнением $r = r_i$, где r_i — расстояние между центром C_i и эталоном C_0 , зоны II и III разумно разделить на две подобласти: умеренных и выраженных ухудшений, когда $r > r_i$, и умеренных и выраженных улучшений, когда $r < r_i$.

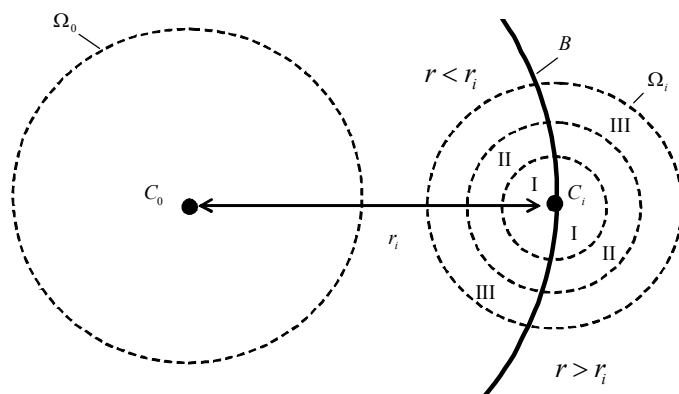


Рис. 3. Зоны персонифицированных решений

Такова общая схема построения персонифицированных решений. Вполне очевидно, что для практической реализации такой схемы требуются персонифицированные средства цифровой медицины, которыми пациент может самостоятельно пользоваться в течение достаточно большого промежутка времени для накопления данных.

Поскольку примеры довольно часто более убедительны, чем общие рассуждения, рассмотрим задачу построения таких средств на примере отечественного изделия цифровой медицины — диагностического комплекса ФАЗАГРАФ® [5] для оперативной оценки функционального состояния сердца.

ПЕРСОНИФИЦИРОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ О ФУНКЦИОНАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ СЕРДЦА

Комплекс ФАЗАГРАФ® состоит из портативного сенсора с пальцевыми электродами для регистрации ЭКГ первого стандартного отведения и компьютерной программы, которая реализует оригинальный метод обработки

ЭКГ в фазовом пространстве (рис. 4).

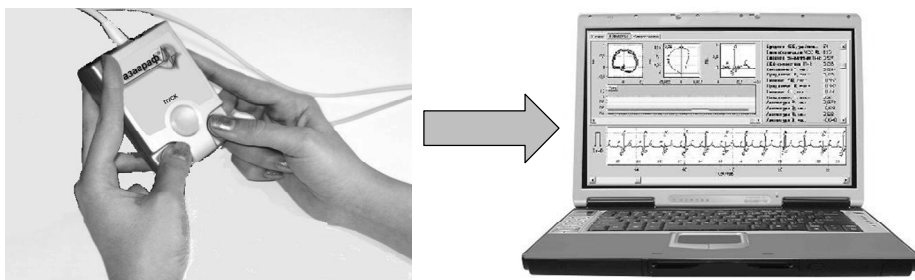


Рис. 4. Диагностический комплекс ФАЗАГРАФ®

Отличительная особенность алгоритмов, реализованных в комплексе ФАЗАГРАФ® — анализ не только традиционных, но и *дополнительных* диагностических показателей [12]. В частности, с помощью этого устройства удалось с высокой точностью контролировать показатель β_T , характеризующий симметрию фрагмента реполяризации ЭКГ (T -зубца) на фазовой плоскости, изменения которого почти незаметны при отображении ЭКГ во временной области (рис. 5).

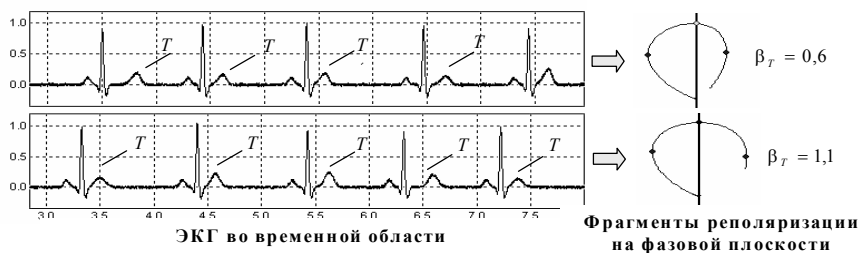


Рис. 5. ЭКГ с низким (вверху) и высоким (внизу) значениями показателя β_T

Хотя диагностическая ценность анализа симметрии T -зубца давно уже обсуждалась в работах кардиологов, нам *неизвестны* другие электрокардиографы, которые позволяли бы *автоматически* измерять β_T , по-видимому, из-за сложностей оценки такого показателя по реальным ЭКГ, искаженным помехами разного типа.

Для оценки референтного диапазона показателя β_T проведена статистическая обработка результатов обследований 329 здоровых лиц разного пола в возрасте от 21 до 54 лет. На основании обработки 720 записей ЭКГ установлено, что среднее значение показателя β_T составляет $\bar{\beta}_T = 0,692 \pm 0,114$, а референтный диапазон², в который попадают 95 % записей ЭКГ здоровых добровольцев (рис. 6), определяет неравенство

$$\beta_T \leq 0,87. \quad (1)$$

² По мере накопления данных указанный референтный диапазон будет уточняться

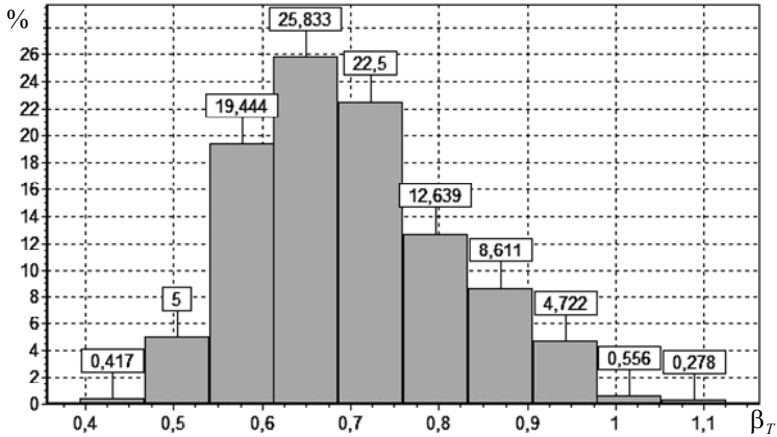


Рис. 6. Распределение показателя β_T в группе здоровых лиц

Наблюдения показали, что показатель β_T может претерпевать достаточно большие изменения даже у одного испытуемого на протяжении *короткого* интервала времени. Поэтому потребовалось построить *доказательный* эксперимент, который бы подтвердил, что динамика изменений β_T , наблюдаемых у конкретного пациента, обусловлена *полезной* информацией — кратковременными функциональными изменениями состояния сердечно-сосудистой системы, а не случайными возмущениями, сопутствующими измерению ЭКГ в реальных условиях.

Для постановки и выполнения такого эксперимента была использована генеративная модель порождения искусственной ЭКГ реалистической формы [13], упрощенный вариант которой можно записать в виде

$$z_m(t) = \sum_{i \in \{P, Q, R, S, T\}} A_i \exp\left[-\frac{(t - \mu_i)^2}{2\tilde{b}_{im}^2}\right] + h(t), \quad m = 1, \dots, M, \quad (2)$$

где

$$\tilde{b}_{im} = \begin{cases} b_i, & \text{если } i \neq T, \\ b_T^{(1)}(1 + \varepsilon_{Tm}^{(1)}) \quad \forall t \leq \mu_T, & \text{если } i = T, \\ b_T^{(2)}(1 + \varepsilon_{Tm}^{(2)}) \quad \forall t > \mu_T, & \text{если } i = T, \end{cases} \quad (3)$$

A_i , μ_i , b_i , $i \neq T$ — параметры, определяющие форму зубцов P, Q, R, S , а параметры A_T , μ_T , $b_T^{(1)}$, $b_T^{(2)}$ — форму зубца T .

Соотношение параметров $b_T^{(1)}$ и $b_T^{(2)}$ определяет степень симметрии зубца T *полезного сигнала* — «эталонного» цикла. Последовательности независимых случайных величин

$$\varepsilon_{Tm}^{(1)} \in [-\varepsilon_T^0, \varepsilon_T^0], \quad \varepsilon_{Tm}^{(2)} \in [-\varepsilon_T^0, \varepsilon_T^0], \quad m = 1, \dots, M, \quad (4)$$

которые с нулевыми математическими ожиданиями равномерно распределены на интервалах, ограниченных числами $\pm \varepsilon_T^0$, определяют уровень *независимых* случайных искажений параметра β_T на генерируемых циклах тестового сигнала, а функция $h(t)$ моделирует внешние аддитивные помехи, в частности, сетевую помеху 50 Гц.

На основе модели (2), (3) может быть порождено *сколько угодно много* тестовых сигналов, искаженных возмущениями $\varepsilon_{Tm}^{(1)}$, $\varepsilon_{Tm}^{(2)}$ и $h(t)$, для которых, в отличие от реальных ЭКГ, *известны* истинные значения показателя β_T *ненаблюдаемого* полезного сигнала. Идея экспериментов [14] состояла в сравнении истинных значений β_T и оценок $\hat{\beta}_T$, которые автоматически определялись комплексом ФАЗАГРАФ® на основе усреднения в фазовом пространстве последовательности искаженных циклов тестового сигнала.

Эксперименты показали, что если истинные значения β_T лежат в диапазоне 0,3–3,0 и случайные возмущения $\varepsilon_{Tm}^{(1)}$, $\varepsilon_{Tm}^{(2)}$ ограничены 50 %, а сетевая помеха $h(t)$ не превышает 50 % диапазона изменения тестового сигнала, то при усреднении не менее 50 искаженных циклов стандартная ошибка в оценке показателя β_T составляет всего лишь 0,021, а средняя относительная ошибка не превышала 2,64 %.

Этот результат позволил утверждать, что кратковременные изменения показателя β_T , наблюдаемые у конкретного пациента *в реальных ситуациях*, являются неслучайными, а значит, β_T может использоваться как чувствительный биомаркер функционального состояния сердца.

Понятно, что главный вопрос, который интересует пациента при самостоятельном использовании комплекса ФАЗАГРАФ® в домашних условиях, — насколько *текущее* состояние требует повышенного внимания, коррекции образа жизни, дополнительного приема назначенных лекарств или же срочного обращения к врачу. Ответ на этот вопрос как раз и дает реализация предложенной идеи *персонализированных* диагностических решений, основанных на автоматическом определении *индивидуальных* характеристик ЭКГ конкретного пользователя, которые постоянно *уточняются* по ходу накопления данных (рис. 7).

При каждом сеансе тестирования блок 1 определяет *персонализированную* норму — среднее значение $M(\beta_T)$ показателя β_T *конкретного* пользователя

$$M(\beta_T) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \beta_T[n] \quad (5)$$

и *персонализированное* среднеквадратическое отклонение

$$\delta(\beta_T) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [\beta_T[n] - M(\beta_T)]^2}, \quad (6)$$

где N — общее число наблюдений, проведенных для данного пользователя, а $\beta_T[n]$ — значение показателя, вычисленное на n -м наблюдении.

В результате на следующем $(N+1)$ -м сеансе блок 2 вычисляет текущее отклонение

$$\Delta_\beta = \beta_T - M(\beta_T), \quad (7)$$

а с помощью блока 3 принимаются *персонализированные* решения на основании сравнения Δ_β с величиной $\delta(\beta_T)$. Тем самым реализуется принцип персонализированной диагностики, основанный на учете *индивидуальных* особенностей конкретного организма.

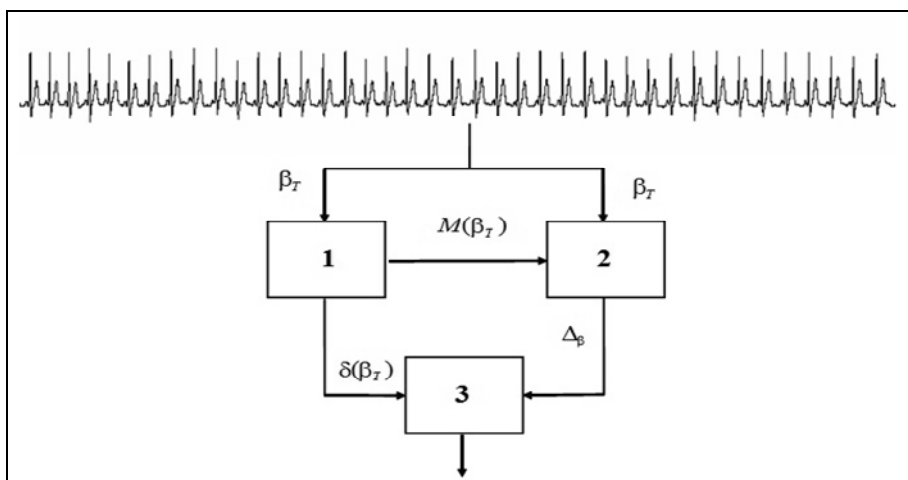


Рис. 7. Схема формирования персонализированных решений

В соответствии с предложенным подходом (см. рис. 3) в базе данных комплекса ФАЗАГРАФ® для *каждого* зарегистрированного пользователя автоматически формируются пять зон персонализированных решений (таблица 1), которые постоянно уточняются по мере накопления результатов.

Для удобства персонализированная норма i -го пациента вычисляется с помощью рекуррентного соотношения

$$M_i^{(n)}(\beta_T) = M_i^{(n-1)}(\beta_T) + \frac{1}{n} [\beta_i^{(n)} - M_i^{(n-1)}(\beta_T)], \quad n = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

с начальным условием $M_i^{(0)}(\beta_T) = 0$, где $\beta_i^{(n)}$ — значение показателя β_T , полученное на n -м шаге тестирования i -го пациента.

Таблица 1.

Вариант формирования зон персонифицированных решений

Знак $\Delta\beta$	Условие	Персонифицированные решения	Сообщения пользователю
+	$ \Delta\beta > 1,5\delta(\beta_T)$	Существенное ухудшение	Будьте внимательны
+	$0,5\delta(\beta_T) \leq \Delta\beta \leq 1,5\delta(\beta_T)$	Умеренное ухудшение	Вам нужно отдохнуть
+ или -	$ \Delta\beta < 0,5\delta(\beta_T)$	Персональная норма	Это Ваша норма
-	$0,5\delta(\beta_T) \leq \Delta\beta \leq 1,5\delta(\beta_T)$	Умеренное улучшение	Вы в хорошей форме
-	$ \Delta\beta > 1,5\delta(\beta_T)$	Существенное улучшение	Вы в отличной форме

Аналогичным образом на каждом сеансе тестирования уточняется персонифицированное среднеквадратическое отклонение $\delta_i(\beta_T)$ с использованием рекуррентной формулы для вычисления модифицированной оценки дисперсии случайной величины по выборке независимых наблюдений, предложенной в работе [15].

В таблице 2 представлен пример персонифицированного решающего правила, построенный для пользователя, у которого по результатам тестирования (1856 наблюдений за 8 лет) определены персональная норма $M(\beta_T) = 0,781$ и персонифицированное среднеквадратическое отклонение $\delta(\beta_T) = 0,115$. В правой колонке приведена статистика персонифицированных решений по результатам этих наблюдений.

Таблица 2.

Пример персонифицированного решающего правила

Текущие значения показателя β_T	Персонифицированные решения	Оценка распределения персонифицированных решений (%)
$\beta_T > 0,953$	Существенное ухудшение	6
$0,838 \leq \beta_T \leq 0,953$	Умеренное ухудшение	17
$0,723 < \beta_T < 0,838$	Персональная норма	47
$0,608 \leq \beta_T \leq 0,723$	Умеренное улучшение	28
$\beta_T < 0,608$	Существенное улучшение	2

Заметим, что в данном случае персонифицированная норма $M(\beta_T) = 0,781$ принадлежит референтному диапазону (1), т.е. имеет место ситуация, показанная на рис. 1, б, а значит, этого пациента можно признать условно здоровым.

Для наглядности в комплексе ФАЗАГРАФ® персонифицированные решения и оценка их распределений отображаются в виде характерных графических образов (рис. 8) и сопровождаются голосовыми сообщениями.

Понятно, что предложенная схема персонифицированных решений о сердечной деятельности естественным образом может быть обобщена на случай, когда, помимо показателя β_T , в диагностическом правиле используются и другие признаки ЭКГ.

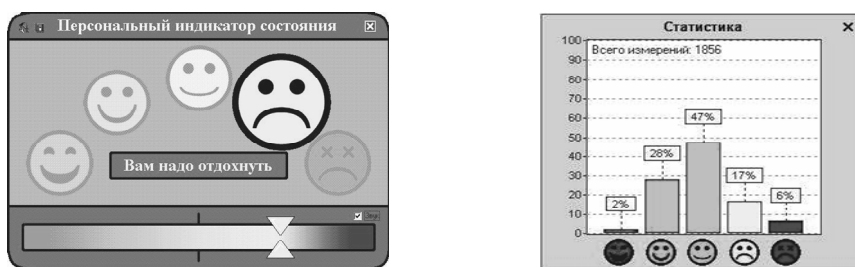


Рис. 8. Персональный индикатор функционального состояния сердца

В заключении заметим, что рассмотренный подход к персонифицированной диагностике, предполагающий *многочисленные* измерения физиологических показателей конкретного человека на достаточно большом промежутке времени и *автоматическую* оценку *персонифицированных* норм, может стать основой создания других персонифицированных средств цифровой медицины для домашнего применения, в частности, «интеллектуальных» тонометров, глюкометров и других приборов.

Выводы

Предложенный подход к персонифицированной диагностике, основанный на оценке *персонифицированной* нормы конкретного пользователя путем самостоятельного накопления данных за достаточно большой промежуток времени, обеспечивает более полную и обоснованную оценку функционального состояния пациента, чем эпизодический контакт с врачом с использованием традиционных клинических средств.

Анализ взаимного расположения в пространстве диагностических признаков областей персонифицированной нормы Ω_i и популяционной нормы Ω_0 позволяет сравнивать *степени* выраженности патологии разных пациентов и оценивать текущее состояние конкретного пациента *не только* по отношению к популяционной норме, но и по отношению к его персонифицированной норме.

Предложенный подход может быть достаточно просто реализован на современных средствах цифровой медицины, что продемонстрировано на примере отечественного диагностического комплекса ФАЗАГРАФ®.

Персонификация средств медицинской диагностики дает возможность пользователю проводить самооценку функционального состояния, оптимизировать свой образ жизни, прием лекарственных препаратов и разумно распределять режим нагрузок и отдыха.

Накопление данных с использованием персонифицированных средств цифровой медицины сокращает время обследований в стационарных

условиях, что уменьшает экономические затраты как для пациента, так и для государственной системы здравоохранения.

1. Литвинов А.В. Норма в медицинской практике: Справочное пособие / А.В. Литвинов. — М.: Медпресс, 2001. — 144 с.
2. Tezak Z., Kondratovich M.V., Mansfield E. US FDA and personalized medicine: in vitro diagnostic regulatory perspective. *Journal of Personalized Medicine*. — 2010. — No. 7(5). — P. 517–530.
3. Wolbring G, Leopatra V. Sensors: Views of Staff of a Disability Service Organization. *Journal of Personalized Medicine*. — 2013. — No. 3. — P. 23–39.
4. *Ambulatory cardiac monitoring: Avoiding maturity through technological advancement*. — Market engineering research. — Frost & Sullivan, Meriland. — 2008. — 9. — P. 325.
5. Гриценко В.И. Информационная технология ФАЗАГРАФ® для интегральной оценки состояния сердечно-сосудистой системы по фазовому портрету электрокардиограммы / В.И. Гриценко, Л.С. Файнзильберг // Врач и информационные технологии. — 2013. — № 3. — С. 52–63.
6. Что означают референтные значения. — <http://fincomvirtual.com/laboratory/3707-2013-09-26-05-14-59.html>
7. Stolarz-Skrzypek K., Thijs L., Richart T. Blood Pressure variability in relation to outcome in the International Database of Ambulatory blood pressure in relation to Cardiovascular Outcome. *Hypertension Research*. — 2010. — No. 33. — P. 757–766.
8. Горбунов В.М. Современные представления о вариабельности артериального давления / В.М. Горбунов // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. — 2012. — № 8(6). — С. 810–818.
9. Malik M., Camm A.J. Components of heart rate variability. What they really mean and what we really measure. *American Journal of Cardiology*. — 1993. — Vol. 72. — P. 821–822.
10. Schijvenaars B.J.A., Van Herpen G., Kors J.A. Intraindividual variability in electrocardiograms. *Journal of Electrocardiology*. — 2008. — Vol. 41. — Issue 3. — P. 190–196.
11. Swenne C.F. Neurocardiological basis for intraindividual ECG variability. *Journal of Cardiology*. — 2002. — No. 35. — P. 239–242.
12. Файнзильберг Л.С. Компьютерная диагностика по фазовому портрету электрокардиограммы. — К.: Освита України, 2013. — 191 с.
13. Файнзильберг Л.С. Имитационные модели порождения искусственных электрокардиограмм в условиях внутренних и внешних возмущений // *Journal of Qafqaz University - Mathematics and Computer Science*. — 2012. — № 34. — С. 92–104.
14. Спосіб перевірки метрологічних характеристик цифрових електрокардіографів: пат. 100330 Україна: МПК G01D 21/00 / Файнзильберг Л.С. Заявлено 10.10.2011; Опубл. 10.12.2012 //Бюл. — 2012. — № 23.
15. Жуковська О.А. Дослідження властивостей модифікованої оцінки дисперсії випадкової величини за вибіркою незалежних спостережень / О.А. Жуковська, Г.А. Глушаускене, Л.С. Файнзильберг // Наукові вісті НТУ України КП. — 2008. — № 4 — С. 139–145.

AN APPROACH TO DIAGNOSTIC PERSONIFICATION DECISIONS ON THE EXAMPLE OF EVALUATION OF CARDIAC ACTIVITY

L.S. Fainzilberg

*International Research and Training Center for Information Technologies and Systems
of National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of
Ukraine*

Introduction: In traditional medicine diagnostic decisions are based on reference ranges of physiological indicators built on the basis of population of a representative group of healthy people. However, clinical experience shows that many people have of the disease goes beyond the accepted standards. Therefore, scientists are actively discussing the concept of personalized medicine, able to improve the quality of treatment. To do this requires special diagnostic tools that can detect the risk of a disease in an individual patient in the early stages, taking into account the individual characteristics of his body.

The purpose of the article is to propose a common scheme to build personalized diagnostic solutions and demonstrate the possibility of the practical using of this scheme in the evaluation of the current functional state of the cardiovascular system taking into account the individual characteristics of a particular patient electrocardiogram.

Methods: To improve the reliability of diagnosis we offer to evaluate personalized norms of a particular user by self-accumulation of data over a sufficiently long period of time. Analysis of the mutual position of the personalized norms areas Ω_i in the space of diagnostic features and population norm Ω_0 allows us to compare the severity of the pathology of different patients and to assess the current status of the individual patient not only in relation to the population norm but in relation to its personalized “norm”.

Results: It is shown that the proposed approach can be simply implemented on modern means of digital medicine. This is demonstrated using the example of a diagnostic facility FASEGRAPH[®], which provides automatic calculation of the original diagnostic feature β_T — the symmetry of the repolarization fragment of the ECG's averaged phase trajectory. The device has the scheme of personalized solutions based on automatic identification of personalized standards and personalized standard deviation of the feature β_T .

Conclusions: Personification of funds for medical diagnostics allows the user to carry out self-assessment of functional status, optimize your lifestyle, medication and reasonably allocate mode loads and rest.

Keywords: personalized medicine, diagnostics, cardiovascular system.

1. Litvinov A.V. *The norm in medical practice: A Reference Guide*. Moscow: MEDpress, 2001, 144 p. (in Russian).
2. Tezak Z., Kondratovich M.V., Mansfield E. US FDA and personalized medicine: in vitro diagnostic regulatory perspective. *Journal of Personalized Medicine*. 2010, no. 7(5), pp. 517–530.

3. Wolbring G , Leopatra. V. Sensors: Views of Staff of a Disability Service Organization. *Journal of Personalized Medicine*. 2013, no. 3, pp. 23–39.
4. Ambulatory cardiac monitoring: Avoiding maturity through technological advancement. *Market engineering research*. 2008 : Frost & Sullivan, Meriland., no 9, p. 325.
5. Gritcenko V.I., Fainzilberg L.S. Information technology FASEGRAPH[®] for integrated assessment of the cardiovascular system on the phase portrait of the electrocardiogram. *The doctor and information technology*. 2013, no. 3, pp. 52-63. (in Russian).
6. What are reference values. <http://fincomvirtual.com/laboratory/3707-2013-09-26-05-14-59.html> (in Russian).
7. Stolarz-Skrzypek K., Thijs L., Richart T. Blood Pressure variability in relation to outcome in the International Database of Ambulatory blood pressure in relation to Cardiovascular Outcome. *Hypertension Research*. 2010, no. 33, pp. 757–766.
8. Gorbunov V.M. Modern understanding of the variability in blood pressure. *Rational Pharmacotherapy in Cardiology*, 2012, no 8 (6), pp. 810-818. (in Russian).
9. Malik M., Camm A.J. Components of heart rate variability. What they really mean and what we really measure. *American Journal of Cardiology*, 1993, vol. 72., pp. 821–822.
10. Schijvenaars B.J.A, Van Herpen G., Kors J.A. Intraindividual variability in electrocardiograms // *Journal of Electrocardiology*. 2008, vol. 41, issue 3, pp. 190–196.
11. Swenne C.F. Neurocardiological basis for intraindividual ECG variability. *Journal of Cardiology*, 2002, no. 35, pp. 239–242.
12. Fainzilberg L.S. *Computer diagnostics of the phase portrait of the electrocardiogram*. Kiev: Ukraine Osvida. 2013. 191 p. (in Russian).
13. Fainzilberg L.S. Simulation models of generating artificial cardiograms in terms of internal and external disturbances. *Journal of Qafqaz University –Mathematics and Computer Science*, 2012, no. 34, pp. 92–104. (in Russian).
14. Fainzilberg L.S. Method validation metrological characteristics of digital electrocardiographs. *UA Patent 100330*, 2012, bul. 23. (in Ukrainian).
15. Zhukovska O.A., Glushauskene G.F., Fainzilberg L.S. Investigation of the properties of the modified Variance estimation based on a sample of independent observations. *Scientific news of the NTUU KPI*. 2008, no. 4, pp. 139–145. (in Ukrainian).

Получено 23.09.2014

КОНЦЕПЦИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ ПРИЗНАКОВ

А.А. Писарчук

Житомирский военный институт имени С.П. Королева Государственного университета телекоммуникаций Министерства обороны Украины

В статье предложена концепция идентификации, базирующаяся на принципах самоорганизации. В основу концепции положена математическая модель идентификации, обладающая свойствами упорядочивания, образования и эволюции структур: объекты идентификации — апостериорные признаки. Модель базируется на взаимосвязи разнородных признаков (фактов, данных и суждений) априорных и апостериорных данных для каждого объекта идентификации. Предложенная концепция обеспечивает оперативное решение задачи идентификации в условиях значительной априорной неопределенности и большой размерности.

Ключевые слова: идентификация, самоорганизация, аттрактор, неопределенность, большая размерность.

У статті запропонована концепція ідентифікації, яка базується на принципах самоорганізації. В основу концепції покладено математичну модель ідентифікації, яка має властивості впорядкування, утворення та еволюції структур: об'єкти ідентифікації — апостеріорні ознаки. Одержана модель базується на взаємозв'язку різнорідних ознак (фактів, даних і суджень) априорних і апостеріорних даних для кожного об'єкту ідентифікації. Запропонована технологія забезпечує оперативне розв'язання задачі ідентифікації в умовах значної априорної невизначеності та великої розмірності.

Ключові слова: ідентифікація, самоорганізація, аттрактор, невизначеність, велика розмірність.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие научно-технического процесса в сфере информационных технологий последних лет привело к усилению роли сложных автоматизированных систем управления, применяемых во многих отраслях деятельности человека: управление государством в целом; экономика; космонавтика; транспорт; военная сфера и т.д. В результате появилась новая сфера деятельности — кибернетическое пространство, объединяющее в себе совокупность подсистем управления различного назначения, социальную и техническую сферы. Следствием этого явилось единое информационное пространство, наполненное избыточной разнородной информацией со своими правилами взаимодействия, трансформации, развития и деградации.

Рассматривая управление как взаимосвязанную цепочку действий по распознаванию, предсказанию, идентификации, принятию решения и непосредственно управления в условиях избыточности внутренней и внешней информации [1], можно выделить особенности такого процесса. Управление реализуется в условиях значительной динамичности, априорной неопределенности, нестандартности изменения внешней обстановки и внутренних процессов. Имеет место значительная избыточность разнородной

(по типу, времени получения, достоверности и полноте) информации (фактов, данных, суждений). Управление осуществляется объектами с критической структурой, что ужесточает требования к принимаемым решениям на реализацию управления. Сохраняются важными функции оператора системы управления. Указанные особенности ужесточают требования к математическому и программно-алгоритмическому обеспечению современных автоматизированных эргатических информационно-управляющих систем.

Поэтому актуальной является задача выработки эффективных подходов к разработке математического обеспечения автоматизированных эргатических информационно-управляющих систем, составляющих кибернетическое пространство.

В статье рассматривается решение задачи идентификации при классификации нештатных (конфликтных) ситуаций в системах управления воздушным движением, навигации космических аппаратов, ведении контроля радиоэлектронной обстановки, идентификации конфликтных ситуаций при функционировании ситуационных центров, выявления компьютерных (кибернетических) атак на системы управления, идентификации источников радиоизлучения различной природы и характера.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ

Традиционно задачи идентификации решаются с использованием методов теории распознавания образов [2, 3]. Известно множество базовых подходов теории распознавания образов [2]. На наш взгляд, основной присущий им недостаток заключается в необходимости наличия статической структуры — образа идентифицируемого объекта [3]. Сопоставление образа распознаваемому объекту с оценкой меры соответствия отражает суть известных методов идентификации. Составление образа из косвенных признаков идентификации является отдельной сложной задачей априорного планирования и выводит задачу идентификации из разряда некорректных. Такой подход является неэффективным в современных условиях, так как неприемлем для задач идентификации в условиях конфликта со значительной априорной неопределенностью, большой размерностью и избыточностью внутренней и внешней информации.

Вместе с тем, практика показывает, что именно в условиях конфликта, априорной неопределенности и большой размерности существуют реальные физические объекты макро- и микромира: атомы и планетарные отношения, взаимодействие биологических структур и организмов, а также протекание многих процессов и явлений неживой природы [4, 5].

В последнее время широкое распространение получили идеи синергетики и методы самоорганизации, в том числе применительно к задачам управления. Тенденции развития и внедрение самоорганизующихся подходов позволяют предположить возможность их успешного применения для решения задач идентификации.

Цель статьи — разработка концепции идентификации контролируемых ситуаций на основе самоорганизации разнородных признаков.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пусть существует множество объектов идентификации (ОИ) разного типа $R = \{R_1, R_2, \dots, R_i\}$, $i = 1 \dots n$. В качестве ОИ рассматриваются: конфликтные ситуации; информационные и кибернетические атаки; компьютерные вирусы; радиотехнические системы (пилотируемые и беспилотные воздушные, космические аппараты, пункты управления различного назначения с радио- и радиолокационными станциями и другим оборудованием, имеющим излучение в акустическом, радио-, видео- и инфракрасном диапазоне волн) и другие, подлежащие идентификации системы, процессы, события. Априорно является неопределенным тип идентифицируемых объектов, их состав, количество и динамика действий (изменение состояния).

Каждый ОИ имеет совокупность разнородных признаков, которые целесообразно разделить на три категории: факты; данные; суждения. *Факты*, описываемые далее множеством $F = \{F_1\{f_{11}, f_{12}, \dots, f_{1j}\}, F_2\{f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2j}\}, \dots, F_i\{f_{ij}\}\}$, $j = 1 \dots m_1, m_2, \dots, m_i$ — представляют собой объективную информацию про ОИ, отражаемую численной величиной, например космический (или от аэродинамического объекта) снимок ОИ, его очертания, состав, динамика изменения формы и т.д. Категория признаков *данные* — $D = \{D_1\{d_{11}, d_{12}, \dots, d_{1l}\}, D_2\{d_{21}, d_{22}, \dots, d_{2l}\}, \dots, D_i\{d_{il}\}\}$, $l = 1 \dots L_1, L_2, \dots, L_i$ — объединяют измерительную информацию про ОИ, например его координаты, параметры траектории движения (в том числе экстраполированные), характеристики излучаемых сигналов, эффективная поверхность рассеивания, радиолокационный портрет и т.д. *Суждения* — $S = \{S_1\{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1k}\}, S_2\{s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2k}\}, \dots, S_i\{s_{ik}\}\}$, $k = 1 \dots K_1, K_2, \dots, K_i$ — объединяют субъективную информацию про ОИ, например его характер действий, содержание радиообмена борт-земля воздушного корабля, состояние ОИ и т.д.

Конкретный ОИ включает в себя уникальную комбинацию принадлежащих ему подмножеств признаков: фактов — $F_i\{f_{ij}\}$; данных — $D_i\{d_{il}\}$; суждений — $S_i\{s_{ik}\}$ из пространства F, D, S . Уникальность ОИ отражается комбинацией и численными характеристиками отдельных признаков.

Тогда, в соответствии с введенными обозначениями, ОИ априорно можно охарактеризовать множеством (R_i):

$$R_i \subset F_i\{f_{ij}\} \cup D_i\{d_{il}\} \cup S_i\{s_{ik}\} = \{F_i\{f_{ij}\}, D_i\{d_{il}\}, S_i\{s_{ik}\}\} = R_i. \quad (1)$$

В процессе наблюдения за объектами с целью их идентификации, для конкретного момента времени в ограниченном пространственном районе формируются *апостериорные множества признаков*: фактов — $\hat{F}_i\{\hat{f}_{ij}\}$; данных — $\hat{D}_i\{\hat{d}_{il}\}$; суждений — $\hat{S}_i\{\hat{s}_{ik}\}$, принадлежащих тому же

пространству F, D, S .

$$W = \left\{ \begin{array}{l} F = \{ \hat{F}_1 \{ \hat{f}_{11}, \hat{f}_{12}, \dots, \hat{f}_{1j} \}, \hat{F}_2 \{ \hat{f}_{21}, \hat{f}_{22}, \dots, \hat{f}_{2j} \}, \dots, \hat{F}_i \{ \hat{f}_{ij} \} \} \\ D = \{ \hat{D}_1 \{ \hat{d}_{11}, \hat{d}_{12}, \dots, \hat{d}_{1l} \}, \hat{D}_2 \{ \hat{d}_{21}, \hat{d}_{22}, \dots, \hat{d}_{2l} \}, \dots, \hat{D}_i \{ \hat{d}_{il} \} \} \\ S = \{ \hat{S}_1 \{ \hat{s}_{11}, \hat{s}_{12}, \dots, \hat{s}_{1k} \}, \hat{S}_2 \{ \hat{s}_{21}, \hat{s}_{22}, \dots, \hat{s}_{2k} \}, \dots, \hat{S}_i \{ \hat{s}_{ik} \} \} \end{array} \right\} = \\ = \{ \hat{F}_i \{ \hat{f}_{ij} \}, \hat{D}_i \{ \hat{d}_{il} \}, \hat{S}_i \{ \hat{s}_{ik} \} \} \quad (2)$$

Суть апостериорных множеств признаков — экспериментальные данные и субъективные оценки с соответствующими видами ошибок. Апостериорно неопределенной является принадлежность полученных фактов, данных и суждений конкретному ОИ.

Задача идентификации заключается в определении типа ОИ путем установления соответствия значений показателей из *апостериорного множества признаков* (2) с содержимым *априорного множества признаков* (1). Далее информация идентификации используется для формирования общей обстановки в контролируемом районе, прогноза динамики последующих действий ОИ и изменения ситуации в целом.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ СИТУАЦИЙ

В качестве ограничивающей аксиоматики можно принять следующее.

Аксиома 1. Из всего поля ОИ и признаков найдется исчерпывающий их перечень, принадлежащий конкретному объекту, который можно описать математически в виде множества, группы, фрактала или кластера.

Аксиома 2. Категории «ОИ — признак» связаны функционально некоторым законом взаимодействия по причине единства первичных физических явлений, характерных для функционирования ОИ и порождающих вторичные явления — признаки.

Аксиома 3. Решение задачи идентификации заключается в выделении множества, группы (фрактала, кластера) «ОИ — признаки» на основании законов их взаимодействия.

Решаемая задача идентификации отличается своей формализацией, а также условиями высокой динамичности и нестандартности изменения внешней обстановки, значительной избыточностью разнородной информации для идентификации. Так для статического варианта традиционный прямой перебор всех возможных сочетаний соответствия образа 10 ОИ с $k = 10$ признаками по выборке из $n = 100$ измерений составит $C_n^k = n! [k!(n-k)!]^{-1} = 17310309 \cdot 10^6$ операций, на обработку которых потребуется около 3 минут работы современной вычислительной техники. Реальные ситуации большей размерности с динамично обновляемой выборкой измерений приведут к катастрофическому увеличению времени на идентификацию. Выход из этой ситуации может быть найден в использовании синергетических подходов самоорганизации сложных систем [1,6–8].

САМООРГАНИЗАЦИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Основным свойством самоорганизующихся систем является их самопроизвольное упорядочивание, образование и эволюция пространственных и временных структур. Самоорганизация возникает в системах и процессах, обладающих свойствами открытости, неравновесности, возникновения и усиления флуктуаций, наличия положительной обратной связи и обладающих достаточным количеством взаимодействующих элементов [1,6–8].

Для анализа формализованной задачи идентификации на наличие в ней признаков, характерных для самоорганизующихся систем и процессов, проведена ее интерпретация с выделением составляющих элементов, информационных процессов их взаимодействия, взаимосвязи с внешней средой в виде структурной схемы рис. 1.

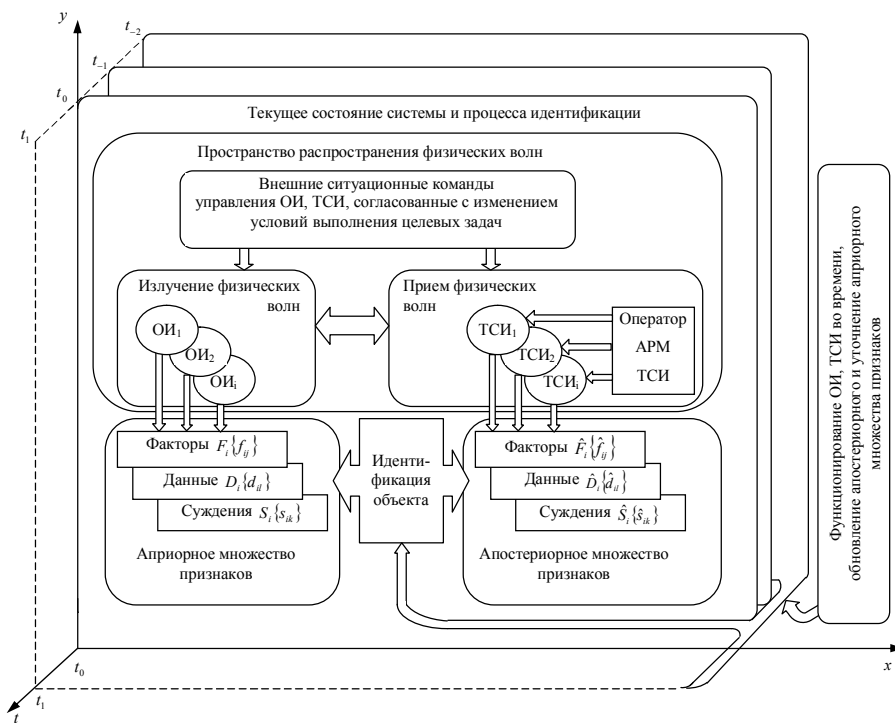


Рис. 1. Система и процессы идентификации

Элементами системы идентификации являются: разнородные ОИ, технические средства измерения (ТСИ) параметров физических волн, излучаемых объектами; работающие на них операторы автоматизированных рабочих мест (АРМ); априорные и апостериорные множества признаков. Принятые условия высокой динамичности и нестандартности изменения внешней обстановки, значительной избыточности разнородной информации для идентификации позволяют утверждать о соответствии системы идентификации и протекающих в ней процессов требованию наличия *критического количества взаимодействующих элементов.*

В системе идентификации *протекают процессы:* внешнего

ситуационного управления ОИ, ТСИ с изменением целевых задач; изменения пространственного положения и состава ОИ, ТСИ с течением времени и внешней обстановки; излучения и приема физических волн; функционирования ОИ, ТСИ, операторов АРМ; получения апостериорного множества фактов, данных, суждений, их обновление с течением времени. Указанные процессы протекают и взаимодействуют в физическом координатно-временном пространстве, а также в виртуальном информационном пространстве. Изменения в указанных категориях под действием внешних факторов приводят к итерационному изменению информационных процессов идентификации, что соответствует свойству *открытых систем (процессов) с наличием положительной обратной связи*.

Флюктуационными процессами, порождающими самоорганизацию системы идентификации, можно считать получение и обновление (уточнение) с течением времени апостериорного множества фактов, данных, суждений.

Свойство *неравновесности* системы идентификации и процессов, в ней протекающих, подтверждается наличием априорного множества признаков — высокоорганизованного прототипа системы, к которому должно стремиться текущее состояние системы, заданное апостериорным множеством признаков.

Таким образом, формализованная задачи идентификации, представленная в виде системы и процессов идентификации, отвечает всем свойствам самоорганизации. Самопроизвольная самоорганизация технических систем возможна на основе разработанных для них математических моделей самоорганизации. Мерой организованности системы служит энтропия, которая уменьшается с увеличением уровня организации системы [6–8]. Следовательно, имеем *исходную систему* большой размерности с высоким уровнем энтропии, характеризуемую апостериорным множеством признаков. Необходимо создать математическую модель ее самоорганизации, приближая к прототипу с меньшей энтропией, определяемым априорным множеством признаков (*конечная система*).

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗАЦИИ

Исходной информацией для идентификации является априорная выборка признаков (1) для момента времени t_0 , представленная в виде табл. 1.

В ней категория «факты» представлена в развернутом виде, аналогично можно расписать и другие подмножества данных и суждений. Предполагается, что тем или иным способом (путем измерения или экспертного оценивания) каждому признаку установлена его численная мера. Табл. 1 можно модифицировать, получив для каждого i -го признака монотонный убывающий или возрастающий ряд. В результате имеем перемешивание индексов ОИ, признаков (см. табл. 2) с ключом первоначальной их принадлежности в виде табл. 1.

Таблица 1

Априорное множество признаков

Категории признаков	Объекты идентификации							
	R_1		R_2		R_i		R_n	
F	F_1	f_{11}	F_2	f_{21}	F_i	f_{i1}	F_n	f_{n1}
		f_{12}		f_{22}		f_{i2}		f_{n2}
		f_{1j}		f_{2j}		f_{ij}		f_{nj}
		f_{1m_1}		f_{2m_2}		f_{im_i}		f_{nm_n}
D	$D_1 \{d_{1L_1}\}$		$D_2 \{d_{2L_2}\}$		$D_i \{d_{iL_i}\}$		$D_n \{d_{nL_n}\}$	
S	$S_1 \{s_{1K_1}\}$		$S_2 \{s_{2K_2}\}$		$S_i \{s_{iK_i}\}$		$S_n \{s_{nK_n}\}$	

Аналогичной операции подвергается апостериорное множество признаков (2), в результате чего получим модифицированную таблицу, например в виде табл. 3.

Для табл. 3 неизвестными являются индексы ОИ — x_n с принадлежностью к ним значений признаков трех категорий, а также их комбинация. Группирование признаков к ОИ является ключевой задачей идентификации на основе самоорганизации.

Таблица 2

Модифицированное априорное множество признаков

Категории признаков	Объекты идентификации							
	R_1		R_2		R_i		R_n	
F	F_1	f_{n1}	F_2	f_{21}	F_i	f_{i1}	F_n	f_{11}
		f_{12}		f_{i2}		f_{22}		f_{n2}
		f_{ij}		f_{nj}		f_{1j}		f_{2j}
		f_{2m_2}		f_{1m_1}		f_{nm_n}		f_{im_i}
D	$D_1 \{d_{1L_1}\}$		$D_2 \{d_{2L_2}\}$		$D_i \{d_{iL_i}\}$		$D_n \{d_{nL_n}\}$	
S	$S_1 \{s_{1K_1}\}$		$S_2 \{s_{2K_2}\}$		$S_i \{s_{iK_i}\}$		$S_n \{s_{nK_n}\}$	

Монотонность модифицированных рядов априорных (табл. 2) и апостериорных (табл. 3) признаков позволяет провести их полиномиальное сглаживание с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [9]. Результатом являются полиномиальные модели изменения значения каждого конкретного i -го признака в группе (факты, данные, суждения) в поле i -х ОИ вида:

для априорных множеств признаков (априорные модели) —

$$\begin{aligned}
 f_j(N) &= f_0 + f_1N + f_2N^2 + \dots, & d_l(N) &= d_0 + d_1N + d_2N^2 + \dots, \\
 s_k(N) &= s_0 + s_1N + s_2N^2 + \dots, & &
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

для апостериорных множеств признаков (апостериорные модели) —

$$\hat{f}_j(N) = \hat{f}_0 + \hat{f}_1 N + \hat{f}_2 N^2 + \dots, \hat{d}_i(N) = \hat{d}_0 + \hat{d}_1 N + \hat{d}_2 N^2 + \dots, \quad (4)$$

$$\hat{s}_k(N) = \hat{s}_0 + \hat{s}_1 N + \hat{s}_2 N^2 + \dots$$

Таблица 3

Модифицированное апостериорное множество признаков

Категории признаков	Объекты идентификации							
	R_{x_1}		R_{x_2}		R_{x_i}		R_{x_n}	
F	\hat{F}_1	\hat{f}_{21}	\hat{F}_2	\hat{f}_{n1}	\hat{F}_i	\hat{f}_{i1}	\hat{F}_n	\hat{f}_{11}
		\hat{f}_{n2}		\hat{f}_{i2}		\hat{f}_{22}		\hat{f}_{12}
		\hat{f}_{nj}		\hat{f}_{ij}		\hat{f}_{1j}		\hat{f}_{2j}
		\hat{f}_{2m_2}		\hat{f}_{nm_n}		\hat{f}_{1m_1}		\hat{f}_{im_i}
D	$\hat{D}_1 \{ \hat{d}_{1L_1} \}$		$\hat{D}_2 \{ \hat{d}_{2L_2} \}$		$\hat{D}_i \{ \hat{d}_{iL_i} \}$		$\hat{D}_n \{ \hat{d}_{nL_n} \}$	
S	$\hat{S}_1 \{ \hat{s}_{1K_1} \}$		$\hat{S}_2 \{ \hat{s}_{2K_2} \}$		$\hat{S}_i \{ \hat{s}_{iK_i} \}$		$\hat{S}_n \{ \hat{s}_{nK_n} \}$	

Аргументом N является процесс, описываемый сеткой измерений — $N = 1, 2, 3, \dots$ и интерпретируемый по своим значениям для каждого реального индекса исходных множеств (1), (2). На этапе сглаживания и получения полиномиальных моделей (3), (4) следует провести синхронизацию сеток измерений для каждого признака априорного и апостериорного множеств. Это реализуется по нескольким контрольным точкам наибольшей близости текущих значений признаков f_{im_i} и \hat{f}_{im_i} (см. рис. 2).

По сути, такая операция уже устанавливает соответствие значений апостериорных признаков в каждой категории априорных с известной принадлежностью вторых к конкретному ОИ. При этом модели (3) и (4) должны полностью совпадать, что для предложенного подхода является признаком идентификации объектов. Однако задача идентификации еще не является решенной, поскольку апостериорная комбинация групп признаков для каждого ОИ не найдена, да и апостериорная выборка признаков должна быть подвержена более тщательному анализу и обработке.

Суть априорного множества признаков (данных табл.3) заключается в экспериментальном их характере — измерения, получаемые объективно с использованием технических средств измерения или субъективно в виде усредненных суждений. Следовательно, для априорного множества признаков характерно появление: случайных ошибок (СО) измерений (к ним отнесем и флуктуации нечетких данных), грубых ошибок измерений (аномальных выбросов (измерений), явных промахов в суждениях, а также оценок и измерений, принадлежащих ОИ, не входящему в перечень априорного множества признаков). Указанные причины приводят к несовпадению моделей (3) и (4). Тогда, избавившись от грубых измерений (ГИ) и уменьшив СО, можно получить апостериорную выборку по каждому

признаку с привязкой к конкретному ОИ. При этом будем наблюдать приближение модели (4) к модели (3), что является приближением состояния системы идентификации, описываемое моделью (4), по уровню своей организации к аттрактору системы с более высоким уровнем организации [8], которая описывается моделью (3). При этом энтропия конечной системы идентификации уменьшается по отношению к исходной.

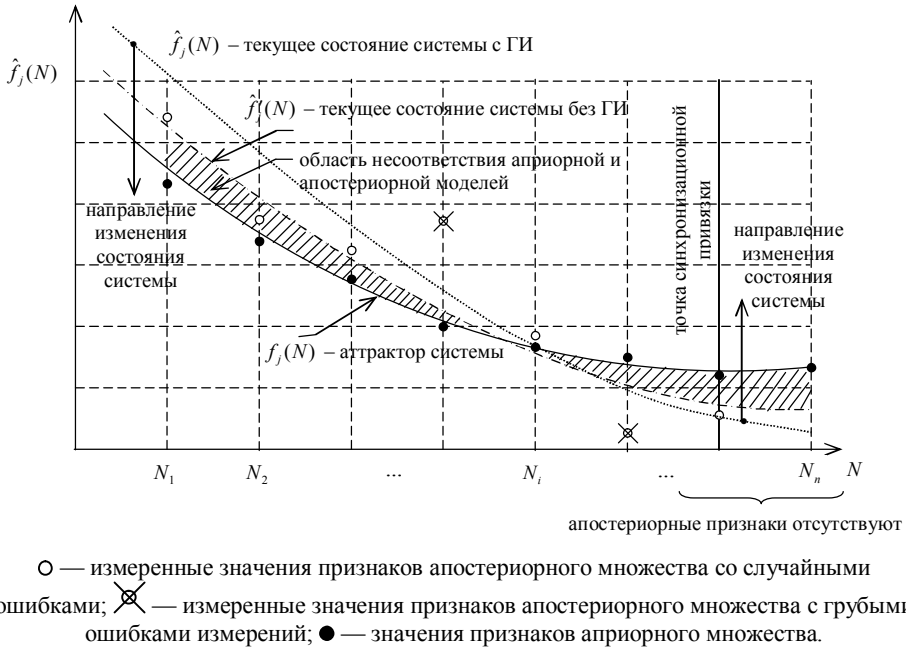


Рис. 2. Схема процесса синхронизации и самоорганизации

Реализовать описанный процесс предлагается следующим образом. Выборка измерений апостериорного множества признаков подвергается предварительной обработке с целью выявления грубых измерений. Для этого будем использовать апробированный рекуррентный алгоритм выявления аномальных измерений, основанный на анализе динамики изменения аппроксимирующей модели [10]. Обнаруженные ГИ удаляются из выборки измерений апостериорных признаков и накапливаются в базе данных новых ОИ. По свободной от ГИ выборке формируются полиномиальные модели вида

$$\hat{f}'_j(N) = \hat{f}'_0 + \hat{f}'_1 N + \hat{f}'_2 N^2 + \dots, \hat{d}'_i(N) = \hat{d}'_0 + \hat{d}'_1 N + \hat{d}'_2 N^2 + \dots, \quad (5)$$

$$\hat{s}'_k(N) = \hat{s}'_0 + \hat{s}'_1 N + \hat{s}'_2 N^2 + \dots$$

В дальнейшем необходимо оценить попарно близость модельных функций: $f_j(N)$ и $\hat{f}_j(N)$, $f'_j(N)$ и $\hat{f}'_j(N)$ на ограниченном интервале признаков с аналогичным повторением этих процедур для категорий данных и суждений. Реализовать оценивание меры схожести моделей, описывающих изменение априорных и апостериорных множеств признаков, предлагается путем расчета и оценивания величины квадрата невязки площадей фигур

(КНПФ), ограниченных кривыми $f_j(N)$, $\hat{f}_j(N)$, $\hat{f}'_j(N)$ (см. рис. 2) по формуле

$$\delta = \left[\int_{N_1}^{N_n} f_j(N) dN - \int_{N_1}^{N_n} \hat{f}_j(N) dN \right]^2, \quad \delta' = \left[\int_{N_1}^{N_n} f_j(N) dN - \int_{N_1}^{N_n} \hat{f}'_j(N) dN \right]^2. \quad (6)$$

Параметр (6) выбран благодаря учету в нем множественного отношения имеющихся априорных и полученных апостериорных признаков идентификации в виде числовой меры разности площадей. Квадратичная форма позволяет учесть положительные и отрицательные знаки в разности площадей плоскостных фигур под рассматриваемыми кривыми.

Признаком достижения необходимого уровня организованности системы идентификации может служить факт выполнения неравенства

$$\max \delta < (\delta' < \delta) < \min \delta. \quad (7)$$

Неравенство $(\delta' < \delta)$ характеризует эволюцию системы и выполняется при правильной селекции ГИ, т.е. принята верная гипотеза о принадлежности значений апостериорного множества признаков идентифицируемому объекту. Выполнение неравенства $\max \delta < (...) < \min \delta$ характеризует достижение требуемого уровня организованности системы идентификации. Значение $\max \delta$ определяется при наличии в экспериментальной выборке СО, а также 50 % и более ГИ. Значение $\min \delta$ определяется только при наличии СО.

Процесс селекции измеренных признаков с контролем условия (7) порождает эволюцию системы идентификации, выражающуюся в приближении функций текущего состояния системы $\hat{f}_j(N)$, $\hat{d}_j(N)$, $\hat{s}_j(N)$ через промежуточные состояния, описываемые моделями $\hat{f}'_j(N)$, $\hat{d}'_j(N)$, $\hat{s}'_j(N)$, к аттракторам в виде конкретных моделей $f_j(N)$, $d_j(N)$, $s_j(N)$ (см. рис. 2). Этот процесс повторяется с изменением внешних условий идентификации — обновления или уточнения значений признаков апостериорного множества с течением времени, дообучения системы идентификации и т.д. Таким образом, самоорганизация системы достигается путем приведения исходного ее состояния к упорядоченному с меньшей энтропией. Свидетельством упорядоченности системы идентификации является узловая привязка по параметру N признаков апостериорного множества к конкретному ОИ — R_i . Сопоставление i -х и x_i -х коэффициентов при ОИ в табл. 2, 3 по сути дает частное решение задачи идентификации отдельно по каждой категории и признаку в ней. Поэтому далее необходимо перейти к комбинаторной идентификации ОИ по совокупности всех его признаков. Для этого используется многокритериальная модель идентификации [13].

Объединение признаков осуществляется последовательно в пределах категорий и по категориям. Для этого применяется технология вложенных

сверток с нелинейной схемой компромиссов [14]. Для дискретного описания признаков свертка имеет вид:

$$Y(y_0) = \sum_{f=1}^b \gamma_{0f} (1 - y_{0f})^{-1} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $f=1..b$ — количество включенных в свертку признаков; γ_{0f} — нормированный весовой коэффициент; y_{0f} — нормированный признак.

По свертке (8) формируются обобщенные признаки для каждого R_i -го ОИ из априорного множества признаков P_{Ei} и предварительно идентифицированных признаков из апостериорного множества P_i

$$P_{Ei} = \sum_{j=1}^{m_i} \gamma_{f0ij} [1 - f_{0ij}]^{-1} + \sum_{l=1}^{L_i} \gamma_{d0il} [1 - d_{0il}]^{-1} + \sum_{k=1}^{K_i} \gamma_{s0ik} [1 - s_{0ik}]^{-1},$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{m_i} \gamma_{f0ij} [1 - \hat{f}_{0ij}]^{-1} + \sum_{l=1}^{L_i} \gamma_{d0il} [1 - \hat{d}_{0il}]^{-1} + \sum_{k=1}^{K_i} \gamma_{s0ik} [1 - \hat{s}_{0ik}]^{-1} \quad (9)$$

Нормировка признаков осуществляется относительно суммы значений по всем ОИ. Числовые значения меры соответствия ОИ его обобщенным данным априорного множества признаков рассчитываются согласно выражениям

$$\Omega_1 = \frac{P_1}{P_{E1}}, \Omega_2 = \frac{P_2}{P_{E2}}, \dots, \Omega_i = \frac{P_i}{P_{Ei}}, \dots, \Omega_n = \frac{P_n}{P_{En}}. \quad (10)$$

Решение про идентификацию объекта принимается при выполнении условия $\Omega_i > 0,5$, что обеспечивает совместный групповой учет признаков.

В результате получаем упорядоченное апостериорное множество признаков с принадлежностью каждого его элемента конкретному объекту ОИ при этом энтропия конечной системы и процесса идентификации уменьшается.

$$W = \{\hat{F}_i \{\hat{f}_{ij}\}, \hat{D}_i \{\hat{d}_{il}\}, \hat{S}_i \{\hat{s}_{ik}\}\} = R_i, \quad (11)$$

Описанные действия повторяются с течением времени при уточнении или обновлении апостериорного множества признаков (2). Последовательное формирование и использование выражений (3)–(5), (7), (19)–(11) представляет собой самоорганизующуюся математическую модель идентификации, обладающую свойствами упорядочивания образования и эволюции структур: объекты идентификации — апостериорные признаки.

Таким образом, концепцию идентификации на основе самоорганизации можно представить последовательностью этапов структурной схемы рис. 3.

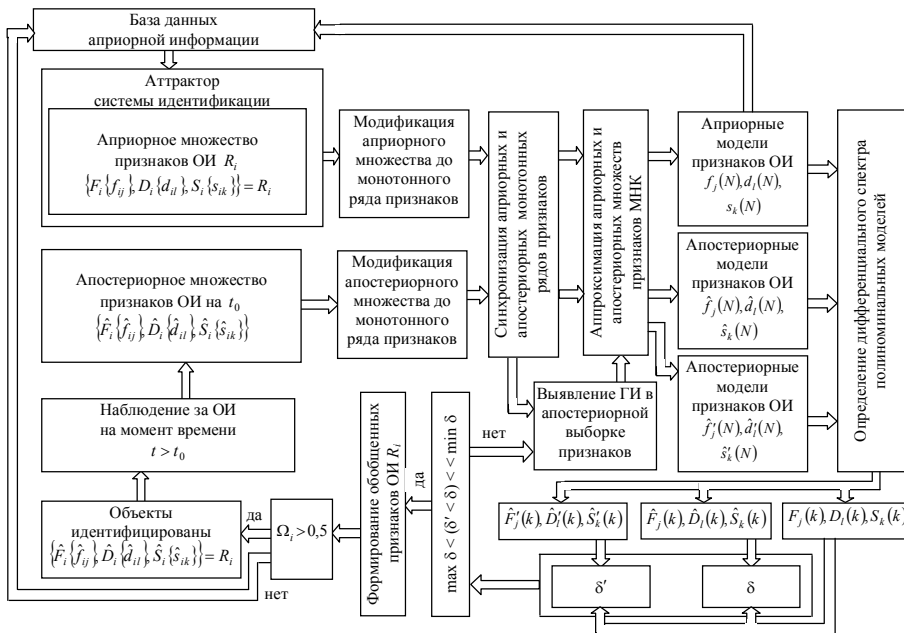


Рис. 3. Этапы концепции идентификации на основе самоорганизации

Процесс идентификации начинается с получения на момент времени t_0 апостериорного множества признаков про ОИ (полагается заполненной база данных априорной информации про возможные ОИ и их признаки — аттрактор системы). Априорные и апостериорные признаки подвергаются модификации до получения монотонных рядов (см. табл. 2, 3) с последующей синхронизацией выборок (см. рис. 1). Далее в апостериорных выборках признаков выявляются ГИ. Полученные синхронизированные и свободные от ГИ выборки аппроксимируются с использованием МНК, чем формируются модели вида (3), (4), (5). После расчета величин КНПФ δ , δ' проверяется условие (7) и реализуется формирование обобщенных признаков для идентификации ОИ по соотношению (9). При выполнении условия $\Omega_i > 0,5$ для конкретного ОИ задача идентификации является решенной. В противном случае принимается решение о выявлении нового объекта с перечнем признаков. Проверка условия $\Omega_i > 0,5$ реализуется для всего множества объектов, возможных для идентификации и для которых получены обобщенные признаки Ω_i . На последующий момент времени $t > t_0$ все описанные этапы повторяются.

Расчетный пример для проверки работоспособности изложенного подхода заключался в следующем. Пусть для некоторого ОИ с известным априорным множеством признаков в виде данных $D_i \{d_{iL_i}\}_1$ получено апостериорное множество $\hat{D}_i \{\hat{d}_{iL_i}\}_4$, модифицированное до возрастающего ряда (табл. 4).

Таблица 4

Модифицированные априорные и апостериорные множества признаков

Признаки		Объекты идентификации									
		R_{x_1}	R_{x_2}	R_{x_3}	R_{x_4}	R_{x_5}	R_{x_6}	R_{x_7}	R_{x_8}	R_{x_9}	$R_{x_{10}}$
1	$D_i \{d_{iL_i}\}_1$	1,20	2,40	4,50	6,00	8,00	10,00	12,00	13,60	17,20	20,60
2	$D_i \{d_{iL_i}\}_{S2}$	1,35	2,65	4,14	5,83	7,72	9,80	12,08	14,56	17,23	20,10
3	$\hat{D}_i \{\hat{d}_{iL_i}\}_3$	1,20	2,40	4,50	6,00	9,20	10,00	12,00	13,60	17,20	20,60
4	$\hat{D}_i \{\hat{d}_{iL_i}\}_4$	1,61	2,72	4,86	5,73	8,73	10,22	11,76	13,85	16,86	20,81
5	$\hat{D}_i \{\hat{d}_{iL_i}\}_{S5}$	1,75	2,98	4,41	6,05	7,88	9,92	12,16	14,60	17,25	20,09
6	$\hat{D}_i \{\hat{d}'_{iL_i}\}_{S6}$	1,81	2,91	4,25	5,83	7,64	9,68	11,96	14,48	17,23	20,21

В примере выборка апостериорных признаков содержит только одно грубое измерение, не принадлежащее ОИ — для R_{x_5} . Рассматриваемый случай с тривиальным решением позволяет оценить работоспособность предложенного подхода к идентификации. В табл. 3 приняты обозначения: $D_i \{d_{iL_i}\}_{S2}$ — оценки априорных данных, полученные при использовании априорных моделей, построенных по выборке $D_i \{d_{iL_i}\}_1$; считаются известными идеальные (без случайных ошибок измерений) элементы апостериорных множеств признаков $\hat{D}_i \{\hat{d}_{iL_i}\}_3$; $\hat{D}_i \{\hat{d}_{iL_i}\}_4$ — зашумленные ошибками измерений с нормальным законом распределения, нулевым средним и с дисперсией, равной 0,2 ед., элементы апостериорного множества признаков; $\hat{D}_i \{\hat{d}_{iL_i}\}_{S5}$ — оценки элементов апостериорного множества признаков, полученные при использовании апостериорных моделей с полной выборкой измерений; $\hat{D}_i \{\hat{d}'_{iL_i}\}_{S6}$ — оценки элементов апостериорного множества признаков, полученные при использовании апостериорных моделей по свободной от ГИ выборке.

По выборке $D_i \{d_{iL_i}\}_1$ с использованием МНК получены априорные модели вида

$$d(N) = 0,2517 + 1,00039N + 0,0981N^2. \tag{12}$$

Аналогичным образом по полной выборке $\hat{D}_i \{\hat{d}_{iL_i}\}_4$ получена апостериорная модель

$$\hat{d}_i(N) = 0,7297 + 0,9257N + 0,1011N^2, \tag{13}$$

а по выборке без ГИ модель вида

$$d'(N) = 0,9471 + 0,7512N + 0,1176N^2. \tag{14}$$

Сравнение модели (12) с (13) и (14) позволяет оценить величины КНПФ, ограниченных ими: $\delta = 2,0451$; $\delta' = 0,0592$. Полученные значения свидетельствуют о выполнении внутреннего неравенства (7). Следовательно, для рассматриваемого примера элементы апостериорного множества $\hat{D}_i \{ \hat{d}_{iL_i} \}_3$ можно принять принадлежащими ОИ кроме R_{x_5} . Таким образом, можно утверждать об уменьшении энтропии исходного состояния системы (взаимосвязи ОИ — признак), характеризуемой апостериорным множеством признаков $\hat{D}_i \{ \hat{d}_{iL_i} \}_4$. Расчет вычислительной сложности предложенного подхода реализован для исходных данных оценивания сложности методов прямого перебора. Результаты расчетов для стократного повторения этапа получения априорных моделей составили 48888400 вычислительных операций с обработкой их за 10^{-5} с. машинного времени, что значительно меньше в сравнении с традиционным подходом.

Выводы

В статье предложена концепция идентификации на основе самоорганизации, базирующаяся на последовательном формировании и использовании самоорганизующейся математической модели идентификации, которая обладает свойствами упорядочивания образования и эволюции структур: объекты идентификации — апостериорные признаки. Модельное описание априорных и апостериорных множеств признаков позволяет избежать необходимости комбинаторного перебора сравниваемых признаков образа с ОИ и обеспечивает снижение размерности решаемой задачи.

1. Кузнецова В.Л. Самоорганизация в технических системах / В.Л. Кузнецова, М. А. Раков. — К. : Наук. думка, 1987. — 200 с.
2. Потапов А. С. Распознавание образов и машинное восприятие: Общий подход на основе принципа минимальной длины описания / А. С. Потапов. — СПб. : Политехника, 2007. — 548 с.
3. Вопросы статистической теории распознавания / Под ред. В.В. Варского. — М. : Сов. радио, 1967. — 399 с.
4. Павлов В.В. Конфликт в технических системах. Управление, целостность / В.В. Павлов. — К. : Вища школа. Головное изд-во, 1982. — 184 с.
5. Павлова С.В. Виртуальные Эйнштейновские силовые поля в синергии навигационного пространства сложных эргатических систем / С.В. Павлова, В.В. Павлов, В.И. Чепиженко // Вісник НАУ. — 2012 — №3 — С. 15–27.
6. Хакен Г. Синергетика / Пер. с англ. под ред. Ю.Л. Климантовича, С.М. Осовца. — М. : Мир, 1980. — 404 с.
7. Ивахненко А.Г. Принятие решений на основе самоорганизации / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Зайченко, В.Д. Дмитриев. — М. : Сов. радио, 1979. — 280 с.
8. Никитенков Н.Н. Синергетика для инженеров: учебное пособие / Н.Н. Никитенков, Н.А. Никитенкова. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. — 168 с.
9. Ковбасюк С.В. Метод найменших квадратів та його практичне застосування: Монографія / С.В. Ковбасюк, О.О. Писарчук, М.Ю. Ракушев. — Житомир: ЖВІ НАУ, 2008. — 228 с.

10. Ковбасюк С.В. Алгоритм виявлення аномальних радіолокаційних вимірів / С.В. Ковбасюк, О.О. Писарчук, Є.Ю. Пономарьов // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. — 2003. — № 3 (27). — С. 79–83.
11. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов / Г.Е. Пухов. — Киев: Наук. Думка, 1986. — 159 с.
12. Пухов Г.Е. Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных Т — преобразований / Г.Е. Пухов. — К.: Наук. Думка, 1988. — 216 с.
13. Писарчук О.О. Методика багатокритеріальної ідентифікації технічних засобів та контрольованих ситуацій за сукупністю ознак / О.О. Писарчук // зб. наук. пр. ВІКНУ. — 2010. — №26. — С. 90–96.
14. Воронин А.Н. Многокритериальные решения: модели и методы: монография / А.Н. Воронин, Ю.К. Зиатдинов, М.В. Ку克林ский. — К.: НАУ, 2011. — 348 с.

UDC: 519.711.3

CONCEPTION OF IDENTIFICATION OF THE CONTROLLED SITUATIONS ON BASIS OF SELF-ORGANISATION OF HETEROGENEOUS SIGNS

A.A. Pisarchuk

Zhitomir Military Institute n.a. S.P. Korolev of State University of telecommunications of the Ministry of Defense of Ukraine

Introduction: Considering management as the interdependent closed-loop chain of actions oriented on recognition, prediction, identification, decision-making and directly management in conditions of redundancy of internal and external information, task of making an effective approaches to development of automated ergatic information-management systems mathematical support on self-organization principles is actual.

Purpose: Development of conception of identification on basis of self-organization.

Results: Conception of identification, which is based on principles of self-organization, is offered in the article. The basis of conception is self-organizing mathematical model of identification, which is characterized of properties of arrangement of generating and evolution of structures: the identification objects are posteriori features. Developed model is based on interdependence of heterogeneous features (facts, information and judgments) of priori and posteriori information for each identification object. It provides the operative solution of identification problem in the conditions of considerable priori uncertainty and high dimensionality.

Conclusion: Simultaneous application of self-organization principles and model description of priori and posteriori sets of features allows to avoid the necessity of traditional combinatoric exhaustion of variants of coincidence of identification object and pattern and provides the decline of dimension of the current task. The results of calculations confirm the receipt of positive effect from suggested approach application.

Keywords: authentication, self-organization, attractor, uncertainty, high dimensionality.

1. Kuznecova V.L., Rakov M.A. *Samoorganizacija v tehniceskikh sistemah*. Kyiv: Nauk. Dumka, 1987. 200 p. (in Russian).
2. Potapov A.S. *Raspoznavanie obrazov i mashinnoe vosprijatie: Obshhij pohod na osnove principa minimal'noj dliny opisaniya*. SPb: Politehnika, 2007. 548 p. (in Russian).
3. Varskij V.V. *Voprosy statisticheskoy teorii raspoznavaniya*. Moskva: Sov. Radio, 1967. 399 p. (in Russian).
4. Pavlov V.V. *Konflikt v tehniceskikh sistemah. Upravlenie, celostnost'*. Kyiv: Vishha shkola. Golovnoe izd-vo, 1982. 184 p. (in Russian).
5. Chepizhenko V.I., Pavlova S.V., Pavlov V.V. Virtual'nye Jejnshtejnovskie silovye polja v sinergii navigacionnogo prostranstva slozhnyh jergaticeskikh sistem. *Visnik NAU*, 2012, no. 3, pp. 15–27. (in Russian).
6. Haken G. *Sinergetika*: per. s angl. pod red. Ju.L. Klimantovicha, S.M. Osovca. Moskva: Mir, 1980. 404 p. (in Russian).
7. Ivahnenko A.G., Zajchenko Ju.P., Dmitriev V.D. *Prinjatje reshenij na osnove samoorganizacii*. Moskva: Sov. radio, 1979. 280 p. (in Russian).
8. Nikitenkov N.N., Nikitenkova N.A. *Sinergetika dlja inzhenerov: uchebnoe posobie*. Tomsk : Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2009. 168 p. (in Russian).
9. Kovbasjuk S.V., Pysarchuk O.O., Rakushev M.Ju. *Metod najmenshyh kvadrativ ta jogo praktychne zastosuvannja*: Monografija. Zhytomyr: ZhVI NAU, 2008. 228 p. (in Ukrainian).
10. Kovbasjuk S.V., Pysarchuk O.O., Ponomar'ov Je.Ju. Algoritm vyjavlennja anomal'nyh radiolokacijnyh vymiriv. *Visnyk ZhDTU. Tehnichni nauky*, 2003, no. 3 (27), pp. 79–83. (in Ukrainian).
11. Puhov G.E. *Differencial'nye preobrazovaniya i matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh processov*. Kiev: Nauk. dumka, 1986. 159 p. (in Russian).
12. Puhov G.E. *Priblizhennyye metody matematicheskogo modelirovanija, osnovannyye na primenenii differencial'nyh T — preobrazovanij*. Kiev: Nauk. Dumka, 1988. 216 p. (in Russian).
13. Pysarchuk O.O. Metodyka bagatokryterial'noi' identyfikacii' tehnicznyh zasobiv ta kontrol'ovanyh situacij za sukupnistju oznak. *Zb. nauk. pr. VIKNU*, 2010. no. 26. pp. 90–96. (in Ukrainian).
14. Voronin A.N., Ziatdinov Ju.K., Kuklinskij M.V. *Mnogokriterial'nye reshenija: modeli i metody: monografija*. Kyiv: NAU, 2011. 348 p. (in Ukrainian).

Получено 20.06.2014

Медицинская и биологическая кибернетика

UDK 621.3

SPECTRAL ANALYSIS OF AIRFLOW RATE DURING FORCED EXPIRATORY PROCESS

V.A. Lopata¹, A.A. Popov², I.S. Myasnyi³

¹*Bogomolets Institute of Physiology, National Academy of Science of Ukraine*

²*National technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*

³*Center of pulmonology, allergology and clinical immunology, Clinical Hospital "Feofaniya"*

С использованием модели процесса форсированного выдоха и преобразования Фурье определен частотный спектр его объемной скорости воздуха. Показано, что погрешность измерений показателей процесса спирометром, динамические характеристики которого нормированы в диапазоне 0–15 Гц, может достигать 7,5%. Диапазон нормирования должен быть расширен до 80 Гц. В этом случае погрешность измерений ограничивается в пределах 2%.

Ключевые слова: спирометр, динамические характеристики, скорость потока воздуха, моделирование процесса форсированного дыхания.

В роботі з використанням моделі процесу форсованого видиху і перетворення Фур'є визначений частотний спектр швидкостей повітря в процесі. З отриманих даних впливає, що похибка вимірювань спірометра з амплітудно-частотною характеристикою, нормованою стандартом в частотному діапазоні 0–15 Гц, може сягати 7,5%, що неприпустимо. Діапазон частот, у якому мають бути стандартизовані динамічні характеристики спірометрів, сягає 80 Гц. У цьому випадку похибка вимірювання швидкостей повітря форсованого видиху лімітується в межах 2 %.

Ключові слова: спірометр, динамічні характеристики, швидкість потоку повітря, моделювання процесу форсованого дихання.

INTRODUCTION

Dynamic response is an important characteristic of spirometers for testing of lung ventilation function (LVF) by measuring airflow rate during breathing. Since first standard issued by American Thoracic Society (ATS) in 1979 [1], this characteristic is standardized in all subsequent standards of ATS, European Respiratory Society (ERS) and spirometry methodological recommendations of Russian Federation (RF) [2–7] (Table I).

Table 1.*Requirements for the frequency response nonlinearity in various standards*

ATS [1,2,3]			ERS [4,5]		RF [6]	ATS / ERS [7]
1979	1987	1994	1983	1993	2001	2005
± 10 % in range 0 – 4 Hz			± 5 % in range 0 – 20 Hz		± 5 % in range 0 – 20 Hz	± 5 % in range 0 – 15 Hz

Dynamic response is standardized in terms of the requirements for the frequency response nonlinearity of the device in predefined frequency range. In Table I the requirements are summarized, and it can be seen that by now there are differences in frequency ranges and values of acceptable nonlinearity.

PROBLEM STATEMENT

Since spirometry technique implies the forced expiratory maneuver when maximal airflow rate is achieved [8], standardization of frequency response nonlinearity should take into consideration dynamics of forced expiratory parameters, which is significant for the sake of diagnostics. This requirement is emphasized in papers [9, 10] when discussing the characteristics of the spirometric equipment, especially designed for LVF studies in children [11]. The literature provides information about the frequency spectrum of the forced expiratory airflow rate, which is considered as an objective criterion of the process dynamics.

In paper [12] it is determined that this frequency spectrum with amplitudes of harmonics up to 5 % of the maximum were located in range $6,49 \pm 1,8$ Hz. Authors of [8] have found that the amplitude of harmonics is reduced exponentially with increasing frequency, and in the range up to 10 Hz the values are 3–5 % of maximum amplitude. In [13] the bandwidth is defined in range from 0 up to 10.3 Hz. Thus all data about the frequency spectrum are rather contradictory and must be clarified.

The **purpose** of this paper is to define by studying the model of forced expiratory process the frequency range in which frequency response must be standardized. The airflow process during breathing is simulated using the electrical circuit analogy, and an explicit mathematical expression of airflow rate spectral density is obtained. From this expression we define the frequency range in which the dynamic characteristics of spirometers should be standardized.

THE CIRCUIT MODEL OF FORCED EXPIRATORY PROCESS

The analogy between the electric current flow and airflow can be used in the respiration process modeling. Table 2 shows the correspondence between parameters of airflow and electric circuit [14].

The considered model was used in [15, 16] for calculation of the measurement errors, optimization and control of spirometer's dynamic characteristics, generation of test signals and spirometer metrology. It formalizes breathing in terms of electric current flow, and gives clear analogy of volumetric and velocity parameters of

forced expiratory, giving the possibility to model various states of LVF by varying values of R_{AW} , C , L and I .

Table 2.

Correspondence between airflow and electric current flow

Airflow system	Electric circuit
R_{AW} – airways resistance, Pa·sec / Liter	R – resistance of the resistor, Ohm
C_L – lung compliance, Liter/Pa	C – capacitance of the capacitor, F
I – inertance, Pa·sec ² / Liter	L – inductance of the inductor, H
V – air volume, Liter	q – charge of capacitor, C
p – pressure, Pa	U – voltage, V
Q – airflow rate, Liter / sec	i – current, A

Forced expiratory can be modeled by transition process of aperiodic capacitor discharge on the serial connection of resistor and inductance [15]. From the circuit theory considerations, this process can be described using the equation:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot i = 0. \quad (1)$$

The circuit model of forced expiratory process is given in Fig. 1.

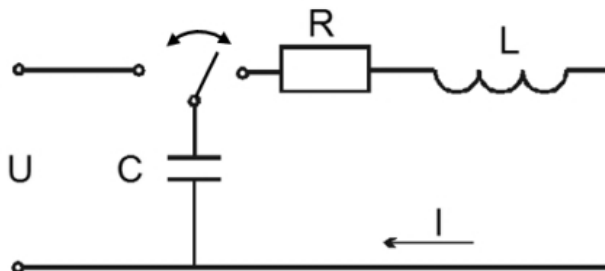


Fig. 1. Circuit model of respiratory process

Solving (1) for the capacitor charge q and current i , the equations for the respiration parameters of interest can be obtained:

$$V_i = V_0 \left(1 - \frac{\alpha \cdot e^{\beta t} - \beta \cdot e^{\alpha t}}{\alpha - \beta} \right), \quad (2)$$

$$Q_i = V_0 \frac{\alpha \cdot \beta}{\alpha - \beta} (e^{\alpha t} - e^{\beta t}), \quad (3)$$

where V_0 is forced vital capacity (FVC);

$$\alpha, \beta = -\frac{R_{AW}}{2I} \pm \sqrt{\frac{R_{AW}^2}{4I^2} - \frac{1}{I \cdot C_L}}. \quad (4)$$

In normal LVF conditions parameters α and β take the following values: $R_{AW} = 110 - 350$ Pa·sec/Liter, $C_L = 0,0015 - 0,003$ Liter/Pa, $I = 1 - 17$ Pa·sec²/Liter [17]. It is shown in [15] that for any possible combination of R_{AW} , C_L , I in normal and pathologic conditions, the values of α and β are strictly real and negative since the following condition always holds true:

$$R_{AW} \geq 2\sqrt{\frac{I}{C_L}}. \quad (5)$$

FREQUENCY CHARACTERISTICS OF AIRFLOW RATE

To study the frequency characteristics of airflow, the Fourier spectrum of airflow rate should be defined. It is known from [15] that the time when airflow rate reaches its maximum during forced expiratory process (peak flow rate, PFR) can be defined by:

$$T_{PFR} = \frac{\ln \frac{\beta}{\alpha}}{\alpha - \beta}. \quad (6)$$

Fourier transform $F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$ can be applied to (3) to obtain spectra of airflow rate. To facilitate this, rewrite (3) in the form

$$Q_t = Q_{\max} (e^{\alpha t} - e^{\beta t}) = Q_{\max} e^{\alpha t} - Q_{\max} e^{\beta t}, \quad (7)$$

which is the difference of two exponential functions, and denote

$$x(t) = e^{\alpha t} \text{ for } |\alpha| > 0, t \geq 0, \quad (8)$$

$$y(t) = e^{\beta t} \text{ for } |\beta| > 0, t \geq 0. \quad (9)$$

Spectral density can be written as

$$G_Q(j\omega) = G_x(j\omega) - G_y(j\omega), \quad (10)$$

where $G_x(j\omega)$ and $G_y(j\omega)$ are spectral densities of exponential functions (8) and (9) respectively. It is known that Fourier transform of function

$z(t) = e^{-ct}$, $c > 0$, $t \geq 0$ given by $G(j\omega) = \int_0^{+\infty} e^{-ct} e^{-j\omega t} dt$ equals:

$$G_x(j\omega) = \frac{1}{c + j\omega} = \frac{c - j\omega}{c^2 + \omega^2} = \frac{c}{c^2 + \omega^2} - j \frac{\omega}{c^2 + \omega^2}$$

Thus making all needed transforms and substitutions using (2) and (5) we obtain finally the complex Fourier spectrum:

$$G_Q(j\omega) = \frac{Q_{\max}}{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)} \times \left\{ \left[\alpha(\beta^2 + \omega^2) - \beta(\alpha^2 + \omega^2) \right] - j\omega(\alpha^2 - \beta^2) \right\} \quad (11)$$

and spectral density:

$$P_Q(\omega) = \frac{Q_{\max}^2}{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)} \times \sqrt{\left[\alpha(\beta^2 + \omega^2) - \beta(\alpha^2 + \omega^2) \right]^2 + \omega^2(\alpha^2 - \beta^2)^2}, \quad (12)$$

where Q_{\max} is PFR at a time instant T_{PFR} .

Having the expression of spectral density, it is possible to calculate it explicitly for any combination of respiration system parameters.

RESULTS

It is proposed to select the spectral range in which dynamic characteristics should be standardized, for the case when the spectral range of airflow rate is widest. For this case the range with harmonic components with high magnitudes should be defined at certain level of magnitudes.

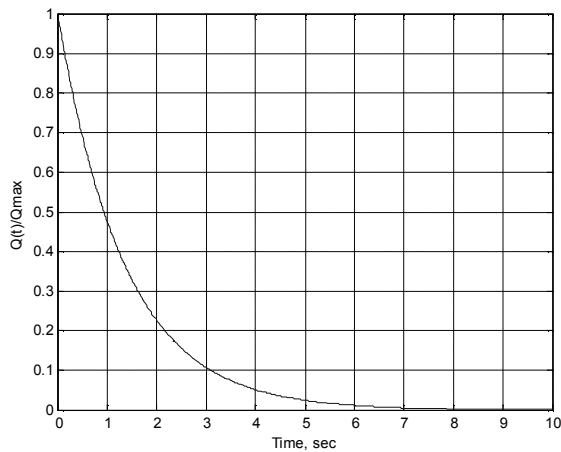


Fig. 2. Time dependence of airflow rate, normalized

To define the frequency range in which the harmonics with significant magnitudes are located, the values of α and β should be substituted in (12). To obtain the widest frequency range of airflow rate, which corresponds to the situation with minimal T_{PFR} , expression (4) should be considered. It can be seen that minimal T_{PFR} is reached when C_L and I are minimal and R_{AW} is maximal.

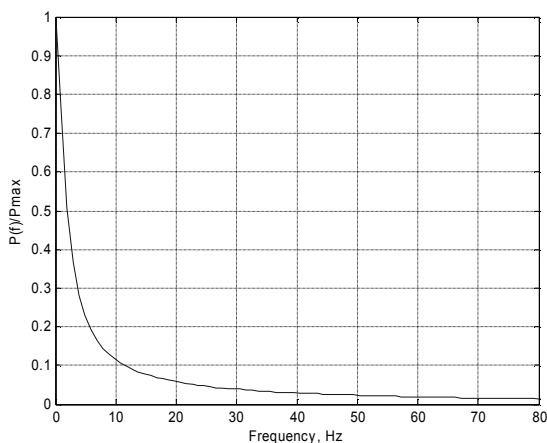


Fig. 3. Spectral density of airflow rate, normalized

This case corresponds to the condition of severe LVF dysfunction, when:

$$R_{AW} = 900 \text{ Pa}\cdot\text{sec} / \text{Liter},$$

$$C_L = 0,0015 \text{ Liter} / \text{Pa},$$

$$I = 1 \text{ Pa}\cdot\text{sec}^2 / \text{Liter}.$$

In this case $\alpha = -0,74 \text{ sec}^{-1}$ and $\beta = -899,26 \text{ sec}^{-1}$.

Figure 2 shows time dependence of airflow rate as the result of simulation the respiration process using the model from Fig. 1 with formula (3) and parameters for severe LVF dysfunction. In Fig. 3 its spectral density is shown.

Using the graph from Fig. 3 it can be seen that harmonics with magnitudes larger than 2% of PFR are located in the frequency range from 0 to 70 Hz.

DISCUSSION

The results of defining the spectral range in which harmonics with high magnitudes are located shows, that this range obtained in our study is significantly wider than the frequency ranges reported in [8, 12]. Our result is close to the range of airflow rates frequency spectrum during cough shock (5–70 Hz [18]), which is similar to the forced expiratory process.

From our data it follows that the spirometer with frequency response normalized following the standard [7] in the frequency range of 0–15 Hz, in the considered case can measure the data with an accuracy of less than 7.5 %, which might be considered as rather high error. We can recommend from our results that if the error of forced expiratory airflow rates measurement is bounded by $\pm 2 \%$, the frequency range for standardization should be extended up to 80 Hz.

CONCLUSIONS

Our findings demand to normalize the dynamic characteristics of spirometers, adequate to frequency spectrum of forced expiratory airflow rates. Using an explicit mathematical expression of airflow rate spectral density, the frequency range in

which the dynamic characteristics of spirometers should be standardized is defined as 0–80 Hz. A further area of research should be focused on simulation of forced expiratory process for various combinations of R_{AW} , C_L and I in the normal LVF state and its possible violations.

1. ATS Statement — Snowbird workshop on standardization of spirometry. *Amer. Rev. Resp. Dis.*, 1979, vol. 119, pp. 831–838.
2. Standardization of spirometry — 1987 update. *Amer. J. Resp. Dis.*, 1987, vol. 136, pp. 1285–1298.
3. Standardization of spirometry -1994 update. *Amer. J. Respir. Crit. Care Med.*, 1995, vol. 152, pp. 1107–1136.
4. Quanjer Ph.H. Standardized lung function testing. Report Working Party Standardization of Lung Function Tests, European Community for Coal and Steel. *Bull. Eur. Physiopathol. Respir.*, 1983, vol. 19, pp. 1–95.
5. Quanjer Ph.H., Tammeling G.J., Cotes J.E. Lung volumes and forced ventilatory flows: report of working party, standardization of lung function tests. European Community for Coal and Steel — official statement of the European Respiratory Society. *Eur. Respir. J.*, 1993, vol. 6, pp. 5–40.
6. Kuznetsova V.K., Aganezova E.S., Yakovleva N.G. *Methods of conduction and unificated evaluation of results of functional investigation of mechanical parameters of ventilation system using spirometry*. Saint Petersburg, 2001 (in Russian).
7. Miller M.R., Hankinson J., Brusasco V. Standardisation of spirometry. *Eur. Respir. J.*, 2005, vol. 26, pp. 319–338.
8. Peslin R., Jardin P., Bohadana A., Hannhart B. Contenu harmonique de signal de debit pendant l'expiration forcee chez l'homme normal. *Bull. Eur. Physiopath. Resp.*, June 1982, vol. 18, pp. 491–500.
9. Lopata V.A. Criteria and estimates of functional characteristics of spirometers. *Medichne obladnanna ta vytratni materialy*, December 2010 –January 2011. pp. 34–36 (in Ukrainian).
10. Salas T., Rubies C., Gallego C., Munoz P., Burgos F., Escarrabill J. Technical requirements of spirometers in the strategy for guaranteeing the access to quality spirometry. *Arch. Bronconeumol.* 2011, vol. 47, pp. 466–469.
11. Lesnick B. L., Davis S.D. Infant pulmonary function testing overview of technology and practical considerations — new current procedural terminology codes effective. *Chest*, 2011, vol. 139 № 5, pp. 1197–1202.
12. Lemen R.J., Gerdess C.B., Wegmann M.J., Perrin K.J. Frequency spectra of flow and volume events of forced vital capacity. *J. Appl. Physiol.*, 1982, vol. 53 № 4, pp. 977–984.
13. McCall C.B., Hyatt R.E., Noble F.W., Fry D.L. Harmonic content of certain respiratory flow phenomena of normal individuals. *J. Appl. Physiol.*, 1957, vol. 10, iss. 2, pp. 215–218.
14. International system of units for measurement of lung functions. *Ekspres-Informatsia: seria Promyshlennost meditsinskoj tekhniki*, 1976, № 24. pp. 2–16 (in Russian).
15. Lopata V.A. Research and regulation of the dynamic characteristics of pneumotachometers for improving informativeness of pneumotachometry. PhD thesis, Moscow, 1983, 22 p. (in Russian).
16. Lopata V. Modeling of forced expiration process for the purposes of spirometry. *Physiology*, 2004, vol. 14, № 82, Suppl. “Trends in clinical and experimental Physiology”, p. 80.
17. Tikhonov M.A. External respiration. *Mechanics of Respiration. Fiziologia cheloveka I zhivotnykh*, Moscow, 1972, pp. 72–131 (in Russian).
18. Svatosh Y. Biosignals from the engineering point of view. *Ukrainskii zhurnal meditsinskoj tekhniki i tekhnologii*, 1998, № 1–2, pp. 93–97 (in Russian).

SPECTRAL ANALYSIS OF AIRFLOW RATE DURING FORCED EXPIRATORY PROCESS

V.A. Lopata¹, A.A. Popov², I.S. Myasnyi³

¹*Bogomolets Institute of Physiology, National Academy of Science of Ukraine*

²*National technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*

³*Center of pulmonology, allergology and clinical immunology, Clinical Hospital "Feofaniya"*

Introduction: The dynamics of airflow rate using the circuit model of respiration system is considered with respect to standardization of requirements for the frequency response nonlinearity of spirometers. Dynamic response is an important characteristic of spirometers for investigation of lung ventilation function by measuring airflow rate of air during breathing. Since spirometry technique implies the forced expiratory maneuver when maximal airflow rate is achieved, standardization of frequency response nonlinearity should take into consideration dynamics of forced expiratory parameters, which is meaningful for the sake of diagnostics.

Purpose: To study the dynamic characteristics of spirometers, and development of method for analysis of airflow rate spectral density.

Methods: The analogy between the electric current flow and airflow is used to model the respiration process. It formalizes breathing in terms of electric current flow, and gives clear analogy of volumetric and velocity parameters of forced expiratory, giving the possibility to model various states of lung ventilation function. Frequency characteristics of the volumetric airflow rate are obtained using Fourier analysis of respiration parameters.

Results: An explicit mathematical expression of airflow rate spectral density is obtained and studied, and the frequency range in which the dynamic characteristics of spirometers should be standardized is defined as 0 – 80 Hz.

Conclusions: Our findings demand to normalize the dynamic characteristics of spirometers, adequate to frequency spectrum of forced expiratory airflow rates. Using an explicit mathematical expression of airflow rate spectral density, the frequency range in which the dynamic characteristics of spirometers should be standardized is defined as 0 – 80 Hz. A further area of research should be focused on simulation of forced expiratory process for various combinations of respiration parameters.

Keywords: spirometer; dynamic response; airflow rates; forced expiratory process modeling.

1. ATS Statement — Snowbird workshop on standardization of spirometry. *Amer. Rev. Resp. Dis.*, 1979, vol. 119, pp. 831–838.
2. Standardization of spirometry — 1987 update. *Amer. J. Resp. Dis.*, 1987, vol. 136, pp. 1285–1298.
3. Standardization of spirometry -1994 update. *Amer. J. Respir. Crit. Care Med.*, 1995, vol. 152, pp. 1107–1136.
4. Quanjer Ph.H. Standardized lung function testing. Report Working Party Standardization of Lung Function Tests, European Community for Coal and Steel. *Bull. Eur. Physiopathol. Respir.*, 1983, vol. 19, pp. 1–95.

5. Quanjer Ph.H., Tammeling G.J., Cotes J.E. Lung volumes and forced ventilatory flows: report of working party, standardization of lung function tests. European Community for Coal and Steel — official statement of the European Respiratory Society. *Eur. Respir. J.*, 1993, vol. 6, pp. 5–40.
6. Kuznetsova V.K., Aganezova E.S., Yakovleva N.G. *Methods of conduction and unificated evaluation of results of functional investigation of mechanical parameters of ventilation system using spirometry*. Saint Petersburg, 2001 (in Russian).
7. Miller M.R., Hankinson J., Brusasco V. Standardisation of spirometry. *Eur. Respir. J.*, 2005, vol. 26, pp. 319–338.
8. Peslin R., Jardin P., Bohadana A., Hannhart B. Contenu harmonique de signal de debit pendant l'expiration forcee chez l'homme normal. *Bull. Eur. Physiopath. Resp.*, June 1982, vol. 18, pp. 491–500.
9. Lopata V.A. Criteria and estimates of functional characteristics of spirometers. *Medichne obladnanna ta vytratni materialy*, December 2010 –January 2011. pp. 34–36 (in Ukrainian).
10. Salas T., Rubies C., Gallego C., Munoz P., Burgos F., Escarrabill J. Technical requirements of spirometers in the strategy for guaranteeing the access to quality spirometry. *Arch. Bronconeumol.* 2011, vol. 47, pp. 466–469.
11. Lesnick B. L., Davis S.D. Infant pulmonary function testing overview of technology and practical considerations — new current procedural terminology codes effective. *Chest*, 2011, vol. 139 № 5, pp. 1197–1202.
12. Lemen R.J., Gerdess C.B., Wegmann M.J., Perrin K.J. Frequency spectra of flow and volume events of forced vital capacity. *J. Appl. Physiol.*, 1982, vol. 53 № 4. pp. 977–984.
13. McCall C.B., Hyatt R.E., Noble F.W., Fry D.L. Harmonic content of certain respiratory flow phenomena of normal individuals. *J. Appl. Physiol.*, 1957, vol. 10, iss. 2, pp. 215–218.
14. International system of units for measurement of lung functions. *Ekspres-Informatsia: seria Promyshlennost meditsinskoj tekhniki*, 1976, № 24. pp. 2–16 (in Russian).
15. Lopata V.A. Research and regulation of the dynamic characteristics of pneumotachometers for improving informativeness of pneumotachometry. PhD thesis, Moscow, 1983, 22 p. (in Russian).
16. Lopata V. Modeling of forced expiration process for the purposes of spirometry. *Physiology*, 2004, vol. 14, № 82, Suppl. “Trends in clinical and experimental Physiology”, p. 80.
17. Tikhonov M.A. External respiration. *Mechanics of Respiration. Fiziologia cheloveka I zhivotnykh*, Moscow, 1972, pp. 72–131 (in Russian).
18. Svatosh Y. Biosignals from the engineering point of view. *Ukrainskii zhurnal meditsinskoj tekhniki i tekhnologii*, 1998, № 1–2, pp. 93–97 (in Russian).

Получено 11.06.2014

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

В.В. Кузьмук¹, Б.Н. Еремеев¹, Е.А. Тараненко^{2,3}

¹*Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова
НАН Украины*

²*Международная Ассоциация Интегративной медицины*

³*ООО «Алтимед»*

В статье раскрывается опыт практического применения сетей Петри для моделирования работы сердца. Представлен анализ и моделирование параллельных процессов взаимодействия гемодинамики и электрической активности сердца на основе комбинированной модели функционирования сердца. Представлена структура комбинированной модели сердца, описаны её основные элементы.

Ключевые слова: управляющие сети Петри, параллельные процессы, гемодинамика, электрическая активность сердца, комбинированная модель сердца.

У статті розкривається практичний досвід застосування мереж Петрі для моделювання роботи серця. Представлений аналіз взаємодії гемодинаміки та електричної активності серця на основі комбінованої моделі. Зображена структура комбінованої моделі серця та описано її основні елементи.

Ключові слова: управляючі мережі Петрі, паралельні процеси, гемодинаміка, електрична активність серця, комбінована динамічна модель серця.

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы своевременного определения и коррекции развития патологических отклонений в работе сердца связано с поиском количественных закономерностей изменения гемодинамических и электрических параметров. Значительную роль в этом направлении играет математическое моделирование с использованием методов и подходов имитационного моделирования. При этом параметры модели сердца выбираются в зависимости от задач исследования. Такой выбор также связан со сложностью исследуемого объекта и трудоемкостью вычислений [1].

Поскольку функционирование сердца представляет собой совокупность взаимодействующих параллельных асинхронных частично зависимых процессов, для исследования необходимо применять методы статического и динамического моделирования, к которым относятся графовые методы на основе сетей Петри в комбинации с методами математического моделирования. Это позволит провести исследование электрофизиологических и механических процессов сердца с учетом их взаимодействия, а также отобразить динамику изменения объекта исследования.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные методы исследования работы сердца и сердечнососудистой системы включают биохимические, биофизические и физиологические

процессы. При этом исследования охватывают уровни клеток, тканей и органов. Учитывая сложную организацию исследуемого объекта, было предложено сочетать вычислительную часть в виде математической модели и графоаналитическую, представленную в виде дискретной модели на основе сетей Петри (PN). Такой подход позволил снизить вычислительную нагрузку за счет модульного построения комбинированной модели. Использование данного подхода направлено на построение динамических моделей для исследования процессов функционирования сердца, связанных с нарушениями тока крови и влияниями на него различных факторов. Решение этих задач включает в себя моделирование механизмов адаптации и регуляции артериального давления, обеспечения кровоснабжения органов и систем организма человека, а также формирование и распределение потенциала действия. Особенность моделирования гемодинамики сердечнососудистой системы заключается в учете многочисленных физиологических факторов, влияющих на ток крови, и их дальнейшей имитации в элементах комбинированной модели, которая построена с учётом иерархической модульной концепции моделирования, а также имитационного моделирования динамических систем.

В качестве характеристик электрической активности сердца были выбраны параметры возникновения и распространения потенциала действия на уровне органа, представленные в виде совокупности действий. Они отображены в модели множеством вершин перехода $T = \{t_i\}$, срабатывание которых определяется выполнением набора условий, которые представлены наличием соответственно меток во входных вершинах мест $P = \{p_\epsilon\}$. При этом, вершина перехода может находиться в одном из таких состояний: ожидание, запуск и срабатывание (рис. 1).

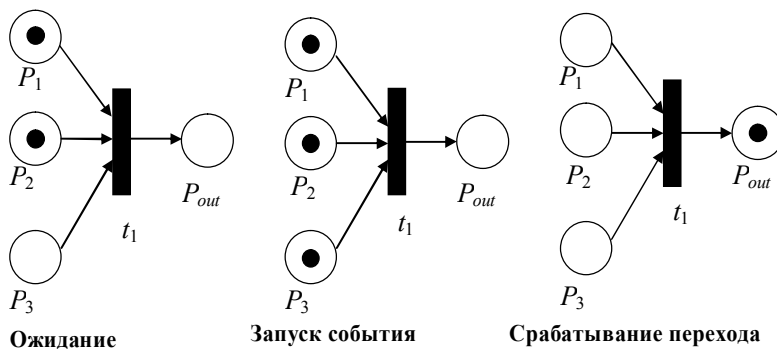


Рис. 1. Стадии изменения состояния вершины перехода

Стадия запуска события связана с проверкой условия срабатывания, а при его выполнении — с извлечением меток из входных вершин мест и запуском на выполнение перехода, моделирующего определённую функцию (действие). Об окончании выполнения операции свидетельствует переход метки в соответствующую выходную вершину.

Таким образом, использование аппарата PN позволяет отобразить логику функционирования сердца (условие — действие — условие и т.д.),

влияющую на процессы гемодинамики, возникновения и распространения возбуждения на участках сердца. А множество локальных математических моделей направлены на описания законов изменения параметров исследуемого объекта, учитывая его пространственно-временные характеристики, которые зависят от электрофизиологических и эластических свойств сердца.

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ СЕРДЦА

Комбинированная модель сердца представляет собой многоуровневую структуру, которая включает в себя математический уровень, уровень данных и графоаналитический уровень. При этом межуровневое взаимодействие осуществляется с помощью логических и информационных связей.

Такая организация модели позволила распределить вычислительную и функциональную части модели, что обеспечило гибкость исследования и упрощение реализации. Управление процессом вычисления основных параметров гемодинамики (давление, объем, поток крови) осуществляется путем формирования запросов на вычисления и возврат значений обратно на графоаналитический уровень. При этом уровень данных служит буфером, работа которого направлена на получение и отправку информации, а также на проверку межуровневых связей.

Для реализации представленной структуры необходимо обеспечить принцип модульности, который позволяет корректировать параметры математической модели по мере получения новых знаний, а также в зависимости от поставленных задач исследования, не нарушая при этом логику работы и структуру физиологического уровня. Такой подход позволяет комбинировать элементы математической модели с сосредоточенными и распределенными параметрами в зависимости от уровня допустимых значений точности при заданных ограничениях на время вычисления. Этот подход особенно важен в системах реального времени. Для решения данной проблемы предлагается использовать коэффициент масштабирования. Таким образом, длительность выполнения сердечного цикла будет равна сумме длительностей систолы и диастолы, умноженной на коэффициент масштабирования. Такой подход позволяет уменьшить длительность вычислений и, вместе с тем, повысить точность получаемых результатов, используя компоненты модели с распределенными параметрами.

При построении модели сердца был применён комбинированный графоаналитический подход, который позволил сформировать динамическую имитационную модель взаимодействия электрофизиологической и механической функции миокарда. Она включает в себя работу пяти параллельных процессов, связанных с формированием и распространением электрического потенциала и с отображением механических процессов, представленных в виде сердечного цикла, а также процесса работы клапанов. Для моделирования подобных систем можно применять безопасные сети Петри (SPN) [2] с элементами стековой структуры, что обеспечит описание накопления и переноса информации. Эти элементы можно отнести к модификации числовых (EN) и макрочисловых сетей (MEN). Для

отображения в модели управляющих воздействий применяется модификация безопасных сетей Петри — управляющая сеть Петри (SN) со стохастическими временными элементами. На основе этих модификаций сетей Петри была построена динамическая модель сердца функционального уровня (рис. 2).

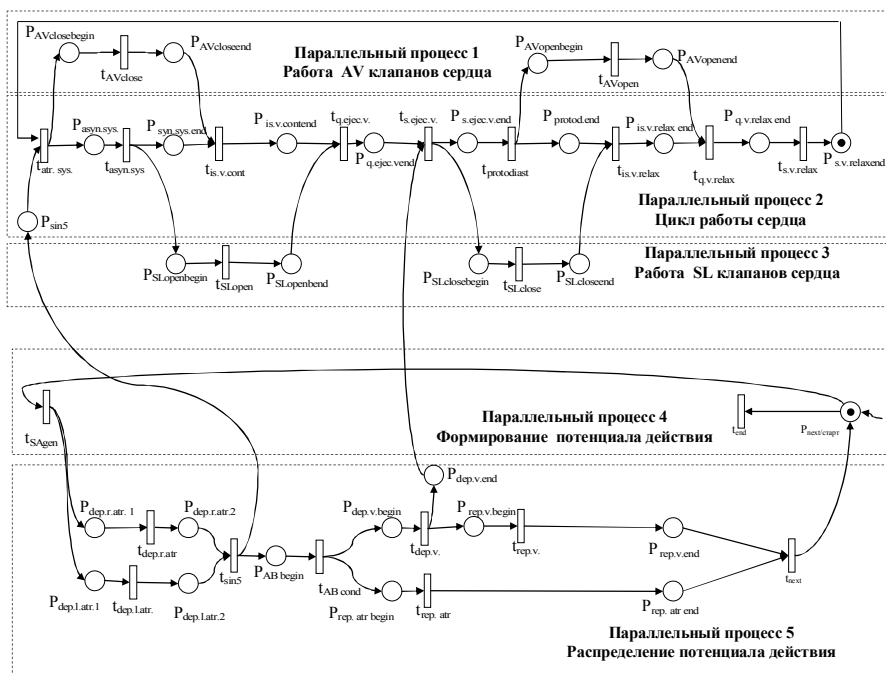


Рис. 2. Динамическая модель сердца функционального уровня

В модели процесс возбуждения сердца начинает свою работу с формирования потенциала действия в синоатриальном узле (SA) с последующим распространением по правому и левому предсердию, что соответствует переходу метки из вершины перехода t_{SAgen} (параллельный процесс 4 на рис. 2) в вершины мест $P_{dep.l.atr.1}$ и $P_{dep.r.atr.1}$ (параллельный процесс 5 на рис. 2), которые отражают условие отсутствия блокировки распространения трансмембранного потенциала (ТМП) по тканям предсердий.

Выполнение процесса деполяризации левого и правого предсердия характеризуется временем Δt_i от запуска до срабатывания переходов $t_{dep.l.atr}$ и $t_{dep.r.atr}$ соответственно, и равняется длительности восходящей и нисходящей кривой зубца P (рис. 4).

Расчет значения Δt_i осуществляется с помощью блока вычислительного модуля, который можно описать сетью Петри, представленной на рис. 3. В качестве входных параметров вычислительного модуля выступают амплитудные и временные характеристики интервалов и зубцов электрокардиограммы (рис. 4). На вход управляемого перехода t_{sel} из функциональной модели поступает запрос в виде входного вектора. При этом управляющий вектор \bar{x} определяет функцию расчета длительности $t = \{t_{ij}\}$ с последующим формированием результата в переходе t_{res} , и его возвратом на

графоаналитический уровень.

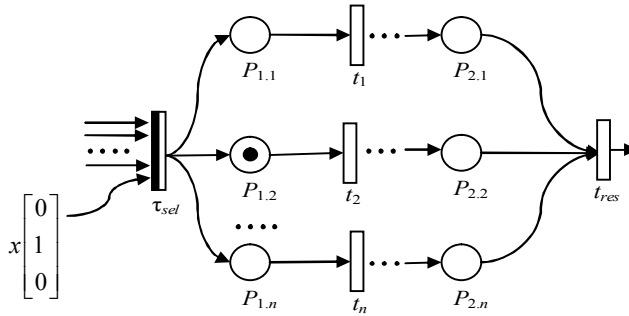


Рис. 3. Расчет времени выполнения операции Δt_i

После возбуждения правого и левого предсердия метка переходит в вершины $P_{dep.l.atr2}$ и $P_{dep.r.atr2}$. Признаком полной деполяризации предсердий является срабатывание перехода t_{sin5} с последующим переходом метки в вершину P_{sin5} , которая отвечает за выполнение синхронизации процесса деполяризации обоих предсердий. Сокращение предсердий (переход $t_{atr\ sys}$) приводит к увеличению давления в предсердиях, желудочках, венах, а также к наполнению желудочков. Влияние сокращения предсердий при нормальном сердечном ритме незначительно и дает лишь малый объем крови в желудочках. Однако его значимость может расти при определенных классах патологий, например, при тахикардии предсердие берет на себя ведущую роль по быстрому наполнению желудочков кровью.

Во время сокращения предсердий параллельно продолжается распространение электрического потенциала по атриовентрикулярному (AV) узлу, признаком окончания этого процесса служит передача метки из вершины перехода $t_{AV\ condit}$ в вершины мест $P_{dep.v.begin}$ и $P_{rep. atrbegin}$, которые являются условием начала деполяризации желудочков ($t_{dep.v.}$), а также реполяризации предсердия ($t_{rep.art.}$). По окончании сокращения предсердий метка переходит в вершину $P_{AVclosebegin}$, которая является условием для закрытия атриовентрикулярных клапанов (трехстворчатого и митрального) в результате достижения соответствующего уровня разности давлений в предсердиях и желудочках.

Следующим этапом сердечного цикла является фаза асинхронного сокращения, продолжительность которой определяется временем закрытия AV-клапанов, а также характеризуется началом процесса деполяризации желудочков ($t_{dep.v.}$) и реполяризации предсердий (соответствует участку QR электрокардиограммы).

Начало сокращения желудочков сердца ($t_{is.v.cont.begin}$), которое еще называют фазой изоволюметрического сокращения, совпадает с пиком зубца R. Ее длительность определяется временем между началом сокращения желудочков и открытием полулунных клапанов (SL) ($P_{SLopenend}$). Эта стадия отмечается резким ростом давления при постоянном объеме крови в желудочках. Условием срабатывания $t_{is.v.cont.begin}$ является закрытие атриовентрикулярных клапанов (наличие метки в $P_{AVcloseend}$), и начало открытия полумесечных клапанов ($P_{SLopenbegin}$).

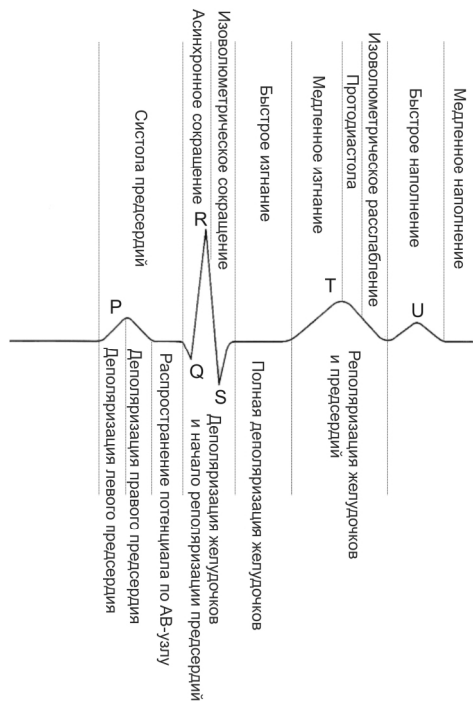


Рис. 4. Длительность и взаимодействие стадий цикла сердца и электрических процессов [4]

Следующей стадией сердечного цикла являются фаза быстрого изгнания ($t_{q.ejec.v.}$) крови из желудочков, для которой характерно:

- 1) быстрый рост желудочкового и артериального давления, который завершается после достижения максимального значения этих параметров;
- 2) стремительное уменьшение объема крови желудочков;
- 3) большой поток крови в аорте;
- 4) полная деполяризация желудочков (переход метки к вершине места $P_{dep.v.end}$).

Во время фазы медленного изгнания крови ($t_{s.ejec.v.}$) наблюдается снижение артериального давления, что обусловлено увеличением потока крови из аорты к периферии. Эта фаза соответствует восходящей кривой зубца Р (рис. 4) и началу реполяризации желудочков.

Во время систолы желудочков кровь наполняет предсердия из вен, увеличивая при этом внутреннее давление. Признаком завершения сокращения желудочков является появление соответствующего признака изменения кривой артериального давления (наличие выемки), что соответствует переходу метки из $t_{s.ejec.v.}$ в $P_{SLOpenbegin}$. Это и является условием закрытия полулунных клапанов, что свидетельствует о достижении соответствующего уровня разности давлений в желудочках и артериях.

Следующей стадией сердечного цикла является протодиастола. Она соответствует выполнению перехода $t_{protodiast}$, условием запуска которого является признак окончания фазы медленного изгнания крови ($t_{s.ejec.v.}$) и закрытия аортального клапана (срабатывание перехода $t_{SLclose}$). По завершении протодиастолы формируется условие для начала открытия

AV-клапанов (наличие метки на вершине места $P_{AVclosebegin}$), что свидетельствует о достижении достаточной разницы давлений между предсердиями и желудочками.

Началом диастолы желудочков считается фаза изоволюметрического расслабления ($t_{is.v.relax}$) — период, когда полулунные клапаны уже закрыты, а атриовентрикулярные клапаны (AV) (между предсердием и желудочком) еще не открылись, и характеризуется уменьшением давления желудочков без изменения объема крови.

Открытие AV-клапана (срабатывание перехода t_{AVopen} и передачи метки в вершину места $P_{AVclosebegin}$) является одним из условий начала фазы быстрого наполнения ($t_{q.v.relax}$) и отвечает зубцу U. Она связана с существенным уменьшением разницы давления между предсердием и желудочком, при этом за счет наполнения желудочков кровью из предсердий происходит снижение давления и резкий рост объема крови. Вслед за ней наступает фаза медленного наполнения ($t_{s.v.relax}$), во время которой увеличивается объем крови в желудочках за счет возврата крови из периферии сердечнососудистой системы. Совместно с завершением диастолы происходит полная реполяризация желудочков ($P_{rep.atr.end}$) и предсердий ($P_{rep.v.end}$), после чего формируются запрос на выполнение следующего цикла работы сердца. В результате, при срабатывании перехода t_{next} метка передается в управляющую вершину места $P_{rep.atr.end}$. Управляющий вектор ($x1$) определяет направление передачи метки на завершение работы, что соответствует $x1(0)$, или на формирование потенциала действия в синоатриальном узле.

Выводы

Представлена комбинированная динамическая модель работы сердца, которая позволяет отображать процесс взаимосвязи электрической активности сердца и гемодинамики.

Разработанная модель является симбиозом классических математических методов моделирования биологических объектов и средств статического и динамического моделирования для представления параллельных асинхронных процессов в органах и системах организма.

Применение комбинированной динамической модели сердца позволяет расширить возможности исследования функциональных систем организма с целью получения новых знаний, а также улучшения качества диагностики заболеваний на ранних стадиях их развития. Перспективным развитием данной модели будет введение в описание эндогенных и экзогенных факторов, а также процессов формирования и развития патологических отклонений. При этом в модели можно применять макропереходы для более детального представления процессов с применением иерархического подхода к формированию структуры, что обеспечит расширение числа исследовательских задач.

1. Амосов Н.М. Теоретическое исследование физиологических систем. Математическое моделирование. / Н.М. Амосов, Б.Л. Палец, Б.Т. Агапов [и др.] — К. : Наукова думка, 1977. — 246 с.

2. Кузьмук В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем / Кузьмук В.В., Васильев В.В. — К. : Наукова думка, 1990. — 216 с.
3. Кузьмук В.В. Модифицированные сети Петри и устройства моделирования параллельных процессов. Монография. / Кузьмук В.В., Супруненко О.О. — К. : Маклауг, 2010. — 260 с.
4. Фундаментальная и клиническая физиология / Под ред. А.Г. Камкина и А.А. Каменского. — М. : Издательский центр “Академия”, 2004. — 1072 с.
5. Petri C.A. Kommunikatoin mit Automaten. — Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, 1962. — 89 p.

UDC 612.13 + 004.942 + 519.179.2

HEART MODELING ON THE BASIS OF PETRI NETS

V.V. Kuzmuk¹, B.N. Yermeev¹, E.A. Taranenko^{2,3}

¹*G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine*

²*International Association of Integrative Medicine*

³*LTD «Altimed»*

Introduction: The object of research pattern, biochemical and biophysical and physiological processes dynamics and their interaction should be considered while investigating cardiac performance with the functional model.

Problem Statement: Cardiac performance research is conducted with the combined dynamic model. It includes graph-analytic heart model, serving for description of asynchronous concurrent processes and pattern of interaction between them, and also element empirical models. Certain graphic primitives in combined model are described with local empirical models, which serve for displaying of investigating object elements parametrization. Spatio-temporal performances of investigating object are considered while constructing the local models and depend on electrophysiological and elastic features of heart.

Purpose: To identify the structure and the basic rules of work of combined functional heart model elements. While investigating to present analysis of haemodynamics and electrical activity of heart, applying interpretation properties and modifications of Petri nets.

Results: Application of static and dynamic modeling methods, which include graphic methods on the basis of Petri nets along with mathematical model approach allowed to make an analysis of electrophysiological and mechanical processes of heart, subjected to their interaction, and also to display the time history of object of research. As the result the model of heart represents the multilevel structure, which includes mathematical level, data level and graph-analytic level. Such organization of model allowed to distribute the computing and functional parts of model, and this provided the possibility of mathematical model parametrization depending on the research direction, without disrupting the work logic and physiological level structure.

Conclusion: Application of combined dynamic model of heart allows to expand the possibilities of organism functional system research in order to receive new knowledge and also quality improvement of diagnosis of diseases at early stage of development.

Keywords: control Petri nets, parallel processes, hemodynamics, the electrical activity of the heart, combined dynamic heart model.

1. Amosov N.M., Palets B.L., Agapov B.T. *Theoretical study of physiological systems. Mathematical modeling.* Kiev, Nauchnaya dumka, 1977, 246 p. (In Russian).
2. Kuzmuk V.V. Vasylyev V.V. *Petri nets, parallel algorithms and models of multiprocessor systems.* Kiev, Nauchnaya dumka, 1990, 216 p. (In Russian).
3. Kuzmuk V.V., Suprunenko O.O. *Modificated Petri nets and parallel process modelers.* Kiev, Mclaut, 2010, 260 p. (In Russian).
4. Kamkina A.G., Kamenskiy A.A. *Fundamental and clinical physiology.* Moskow, «Academy» publishing center, 2004, 1072 p. (In Russian).
5. Petri C.A. *Kommunikatoin mit Automaten.* Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, 1962, 89 p.

Получено 21.07.2014

Поправка:

В выпуске 173 (2013 год) журнала «Кибернетика и вычислительная техника» в статье Гриценко В.И., Рачковский Д.А., Гольцев А.Д., Лукович В.В., Мисуно И.С., Ревунова Е.Г., Слипченко С.В., Соколов А.М. «Нейросетевые распределенные представления для интеллектуальных информационных технологий и моделирования мышления» следует читать:

Гриценко В.И., Рачковский Д.А., Гольцев А.Д., Лукович В.В., Мисуно И.С., Ревунова Е.Г., Слипченко С.В., Соколов А.М., Талаев С.А. «Нейросетевые распределенные представления для интеллектуальных информационных технологий и моделирования мышления».

(Основание: ходатайство авторов статьи и обоснование необходимости включения С.А. Талаева в список авторов статьи)

АВТОРЫ НОМЕРА

Бобрякова Ирина Леонидовна,

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела моделирования информационно-функциональных систем, Института кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, г. Киев, 03680, пр-т Глушкова, 40,
email: bobriakova@gmail.com

Волков Александр Евгеньевич,

младший научный сотрудник отдела интеллектуального управления Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, г. Киев, 03680 ГСП, пр. Академика Глушкова, 40,
email: alexvolk@ukr.net

Волошенко Дмитрий Александрович,

младший научный сотрудник отдела интеллектуального управления Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, г. Киев, 03680 ГСП, пр. Академика Глушкова, 40,
email: P-h-o-e-n-i-x@ukr.net

Гладун Анатолий Ясонович,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела комплексных исследований информационных технологий Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, г. Киев, 03680 ГСП, пр. Академика Глушкова, 40,
email: glanat@yahoo.com.

Гриченко Владимир Ильич,

профессор, директор Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, г. Киев, 03680 ГСП, пр. Академика Глушкова, 40.

Еремеев Богдан Васильевич,

магистр, аспирант отделения гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике Института проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, г. Киев, 03164, ул. Генерала Наумова, 15, 164,
e-mail: bmailb@ Rambler.ru

Кузьмук Валерий Валентинович,

доктор технических наук, профессор, до 2014 заведующий отделением Института проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины.

Лопата Виктор Александрович,

кандидат технических наук, ведущий инженер отдела по изучению гипоксических состояний Института физиологии им. А.А. Богомольца НАН Украины, г. Киев, 01601, ул. Богомольца, 4,
e-mail: v.lopata@meta.ua

Мясный Иван Семенович,

кандидат медицинских наук, руководитель Центра пульмонологии, аллергологии и клинической иммунологии Клинической больницы «Феофания», г. Киев, 03680, пр. Заболотного, 21,
e-mail: IvanLanzerx@gmail.com

Павлов Вадим Владимирович,

доктор технических наук, профессор, заведующий отделом интеллектуального управления Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, г. Киев, 03680 ГСП, пр. Академика Глушкова, 40,
e-mail: dep185@irtc.org.ua

Писарчук Алексей Александрович,

доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник кафедры радиоэлектронной борьбы и защиты информации Житомирского военного института имени С.П. Королева Государственного университета телекоммуникаций, г. Житомир, 03680, пр-т Мира, e-mail: PlatinumPA@meta.ua

Попов Антон Александрович,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физической и биомедицинской электроники Национального технического университета Украины «Киевский Политехнический Институт», г. Киев, 03056, ул. Политехническая, 16, e-mail: popov.kpi@gmail.com

Розушина Юлия Витальевна,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института программных систем НАН Украины, г. Киев, 03680 ГСП, пр. Академика Глушкова, 40, email: ladanandraka2010@gmail.com

Тараненко Елена Анатольевна,

президент Международной Ассоциации Интегративной медицины, директор ООО «Алтимед», академик Международной академии информатизации (МАИ), г. Киев, 02068, ул. Анны Ахматовой, 13Д, e-mail: info@altimed.net

Файнзильберг Леонид Соломонович,

доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела автоматизированных систем обработки данных Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, г. Киев, 03680 ГСП, пр. Академика Глушкова, 40, e-mail: fainzilberg@voliacable.com