

## **Редакционная коллегия**

И.В. СЕРГИЕНКО, акад. НАН Украины (главный редактор)

В.И. ГРИЦЕНКО, чл.-кор. НАН Украины (главный редактор)

Л.М. КОЗАК, д-р. биол. наук. (заместитель главного редактора)

### *Технические науки*

Ф.Г. Гаращенко (Киев), В.Ф. Губарев (Киев), Hänßgen Klaus (Leipzig, Germany)

В.М. Кунцевич (Киев), Н.К. Тимофеева (Киев), Л.С. Файнзильберг (Киев)

### *Физико-математические науки*

А.В. Анисимов (Киев), Н.Н. Глибовец (Киев), А.М. Гупал (Киев)

Б.Ш. Модрухович (Detroit, USA), А.Г. Ченцов (Екатеринбург, Россия)

А.А. Чикрий (Киев), М.И. Шлезингер (Киев)

### *Медицинские науки*

В.М. Белов (Киев), В.В. Бычков (Киев), Yu. Ganushchak, (Maastricht, Netherlands)

Л.С. Годлевский (Одесса), М.В. Голубчиков, (Киев), А.С. Коваленко (Киев)

О.Ю. Майоров (Харьков)

### *Биологические науки*

М.Ю. Антомонов (Киев), В.В. Кальниш (Киев), С.И. Кифоренко (Киев)

В.Г. Книгавко (Харьков), А.Б. Котова (Киев), Е.Г. Лябах (Киев)

M. Navakatikyan (Australia)

**Журнал «Кибернетика и вычислительная техника» включен в перечень профильных изданий МОН Украины по техническим и физико-математическим наукам (приказ МОН Украины № 1528, 29.10.2014), биологическим и медицинским наукам (приказ МОН Украины № 261, 06.03.2015)**

**Журнал включен в eLIBRARY.RU**

**(Российский индекс научного цитирования — РИНЦ).**

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

Утверждено к печати ученым советом Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины (протокол № 2 от 23.02.2017)

## **Адрес редколлегии:**

03680 Киев ГСП, просп. Академика Глушкова, 40

Международный научно-учебный центр

информационных технологий и систем НАН Украины

и МОН Украины

Тел: 503 95 62. E-mail: [kvt.journal@kvt-journal.org.ua](mailto:kvt.journal@kvt-journal.org.ua) Сайт: [kvt-journal.org.ua](http://kvt-journal.org.ua)

Редактор *Н.А. Чарчиян.*

Компьютерная верстка *А.В. Тупальский*

Підп. до друку 05.12.2016. Формат 70×108/16. Гарн. Times New Roman.

Ум. друк. арк. 10,33. Обл. вид. арк. 9,84. Тираж 100. Зам. № 3211

---

Видавничий дім “Академперіодика” НАН України

01004, Київ 4, вул. Терещенківська, 4.

Свідцтво про внесення до Державного реєстру суб’єкта видавничої справи Серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

# Кибернетика 1 (187)/2017 и вычислительная техника

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ■ ОСНОВАН В 1965 г. ■ ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД ■ КИЕВ

## СОДЕРЖАНИЕ

ГРИЦЕНКО В.І. 20 років діяльності Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем (ГРИЦЕНКО В.І. 20 лет деятельности Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем) ..... 5

### Информатика и информационные технологии

ФАЙНЗИЛЬБЕРГ Л.С. Интерактивный синтез информационных технологий обработки сигналов с локализованной информацией ..... 11

### Интеллектуальное управление и системы

ПАВЛОВ В.В., ШЕПЕТУХА Ю.М., МЕЛЬНИКОВ С.В., ВОЛКОВ А.Е. Интеллектуальное управление: подходы, результаты и перспективы развития ..... 30

ВОВК М.І. Биотехнические системы управления двигательными функциями человека ..... 49

### Медицинская и биологическая кибернетика

КОВАЛЕНКО А.С., КОЗАК Л.М., РОМАНЮК О.А. Информационные технологии цифровой медицины ..... 67

КИФОРЕНКО С.І. Ієрархічне моделювання — основа технології доклінічних випробувань алгоритмів керування рівнем глікемії (КИФОРЕНКО С.І. Иерархическое моделирование — основа технологии доклинических исследований алгоритмов управления уровнем гликемии) ..... 80

Вниманию авторов ..... 96

---

# Cybernetics and Computer Engineering

## 1 (187)/2017

---

SCIENTIFIC JOURNAL ▪ FOUNDED IN 1965 ▪ PUBLISHED 4 TIMES PER YEAR ▪ KYIV

---

### TABLE OF CONTENTS

GRYTSENKO V.I. 20 Years of the International Research and Training Center for Information Technologies and Systems .....	5
Informatics and Information Technologies	
FAINZILBERG L.S. Interactive Synthesis of Information Technology Signalprocessing with Localized Information .....	11
Intelligent Control and Systems	
PAVLOV V.V., SHEPETUKHA YU.M., MELNIKOV S.V., VOLKOV A.YE. Intelligent Control: Approaches, Results and Prospects of Development .....	30
VOVK M.I. Bioengineering Systems for Human Motor Functions Control .....	49
Medical and Biological Cybernetics	
KOVALENKO A.S., KOZAK L.M., ROMANYUK O.A. Information Technology of Digital Medicine .....	67
KIFORENKO S.I. Hierarchical Modeling as the Basis of Technology of Preclinical Testing Blood Glucose Level Control Algorithms .....	80
Attention of Authors .....	96

# Кібернетика 1 (187)/2017 та обчислювальна техніка

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ ■ ЗАСНОВАНИЙ У 1965 р. ■ ВИХОДИТЬ 4 РАЗИ НА РІК ■ КИЇВ

## ЗМІСТ

ГРИЦЕНКО В.І. 20 років діяльності Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем .....	5
<b>Інформатика та інформаційні технології</b>	
ФАЙНЗІЛЬБЕРГ Л.С. Інтерактивний синтез інформаційних технологій оброблення сигналів з локалізованою інформацією .....	11
<b>Інтелектуальне керування та системи</b>	
ПАВЛОВ В.В., ШЕПЕТУХА Ю.М., МЕЛЬНИКОВ С.В., ВОЛКОВ О.Є. Інтелектуальне керування: підходи, результати і перспективи розвитку .....	30
ВОВК М.І. Біотехнічні системи керування руховими функціями людини .....	49
<b>Медична та біологічна кібернетика</b>	
КОВАЛЕНКО О.С., КОЗАК Л.М., РОМАНІЮК О.О. Інформаційні технології цифрової медицини .....	67
КІФОРЕНКО С.І. Ієрархічне моделювання — основа технології доклінічних випробувань алгоритмів керування рівнем глікемії.....	80
<b>До уваги авторів</b> .....	96



---

**В.І. ГРИЦЕНКО**, член-кореспондент НАН України,  
директор Міжнародного науково-навчального центру  
інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України  
e-mail: vig@irtc.org.ua

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН  
України та МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03680 МПС, Україна

## **20 РОКІВ ДІЯЛЬНОСТІ МІЖНАРОДНОГО НАУКОВО-НАВЧАЛЬНОГО ЦЕНТРУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ**

---

П'ятого травня 2017 року Міжнародному Центру виповнюється 20 років. Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України створено відповідно до рішення Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України з метою проведення наукових досліджень у галузі інформатики та інформаційних технологій і використання одержаних результатів для задоволення соціальних, економічних та інших потреб інноваційного розвитку країни.

Базовими напрямками фундаментальних та прикладних наукових досліджень в Міжнародному Центрі є: створення інтелектуальних інформаційних технологій на базі методів і засобів образного мислення, комплексні дослідження проблем інтелектуального керування, інтелектуальної робототехніки, цифрової медицини, електронного навчання, розроблення архітектури інформаційних просторів та технологій розвитку безпечного інформаційного суспільства.

За головними напрямками діяльності Міжнародного Центру сформовано наукові школи в галузях інформаційних технологій та систем, технічної кібернетики, біологічної та медичної кібернетики, математичного аналізу складних економічних систем. Важливий внесок у розвиток цих наукових шкіл зроблено видатними українськими вченими — академіками В.І. Скурихіним, О.Г. Івахненком, М.М. Амосовим та О.О. Бакаєвим. Їх учні та послідовники успішно розвивають ці наукові напрями в нашій країні та за кордоном.

Міжнародний Центр — ініціатор досліджень та розроблення концепції нового класу інформаційних технологій — *інтелектуальних інформаційних технологій*. Це особливі, наукоємні інформаційні технології, які відрізняються від відомих ІТ використанням в процесах перероблення інфор-

мації поряд з технологіями програмних обчислень технологій нової якості — оперування образами інформаційних об'єктів. При цьому різними конфігураціями інтелектуальних ІТ досягаються розуміння людської мови, розпізнавання реальних і штучно створених об'єктів, активна взаємодія з навколишнім середовищем, виявлення суті явища, оперування знаннями та можливість вибору стратегії та тактики дій для досягнення поставленої мети. Функціональні можливості та особливості інтелектуальних інформаційних технологій відкривають нові шляхи розв'язання складних завдань у машинобудуванні, робототехніці, космічній галузі, обробленні геофізичних та інших електронних мап, завдань макро- і мікроекономіки, безпеки та обороноспроможності країни.

У Міжнародному Центрі одержано фундаментальні результати в цій галузі. Успішно розвивається загальна теорія інтелектуальних інформаційних технологій та здійснюється її застосування в перспективних системах оброблення інформації, у створенні інформаційно-телекомунікаційних середовищ та комп'ютерних мереж нового покоління. Одержали світове визнання створені високоефективні неklasичні структурні методи і моделі розпізнавання, фундаментальні результати теорії образного мислення, оброблення сигналів складної фізичної природи, інтелектуального управління, оброблення текстової інформації, що обумовило можливість прискореного створення реальних інтелектуальних інформаційних технологій.

Ряд високотехнологічних виробів підготовлено до серійного виробництва і випускається на підприємствах України, серед них «Відеосек'юриті», «Вокофон», Аналізатор ІХП, вироби медичного призначення «Фазаграф», «Тренар», «Діабет» та інші. Розроблені засоби, технології та вироби за своїми функціональними можливостями, сукупністю техніко-економічних характеристик знаходяться на рівні кращих зарубіжних аналогів, а для деяких з них аналоги відсутні.

Розвиваючи комплексні дослідження інформаційних технологій, Міжнародний Центр вніс важливий внесок у вирішення проблем розвитку інформаційного суспільства та його послідовного переходу до суспільства знань, у визначення ролі та місця інтелектуальних інформаційних технологій у перспективних моделях інформаційного суспільства при формуванні високодинамічного інформаційного простору як цілісного об'єкту. Підкреслено залежність процесів розвитку інформаційного суспільства, темпів інформатизації від функціональної повноти інформаційного простору і рівня інформаційної та технологічної взаємодії його об'єктів.

Розроблено теоретичні основи інноваційного розвитку комплексу системних інформаційних технологій. Створено комплексну інформаційно-аналітичну систему інтелектуальної підтримки оперативних рішень з керування соціально-економічними процесами. Систему призначено для використання в аналітичних підрозділах органів державного керування і відпрацьовано на прикладі інтегрального оцінювання стану економічної безпеки України. Розроблено нові стохастичні моделі для розв'язання широкого класу задач аналізу та оптимізації процесів оброблення інформації у багатоканальних керованих системах масового обслуговування зі змінною організацією структури засобів оброблення та зберігання. Одержані теоретичні результати

було використано під час розроблення інформаційної моделі процесів законотворчої діяльності у Верховній Раді України.

У Міжнародному Центрі запропоновано перспективну концепцію створення систем альтернативного електронного навчання, орієнтовану на суспільство знань. Одержала впровадження високоефективна гнучка дистанційна технологія навчання в реальному масштабі часу з характеристиками на рівні кращих світових досягнень. Розроблено оригінальні моделі та методи створення технологій безперервного навчання, багатоцільових навчально-технологічних середовищ на базі образних інформаційних технологій. Сформовано узагальнену електронну модель масової безперервної трансграничної освіти на базі інтелектуалізованих технологічних рішень підтримки процесів навчання. Досягнуто важливі результати в рамках робіт Українського сегменту Міжурядової програми ЮНЕСКО «Інформація для всіх». Розроблено і представлено в ЮНЕСКО пропозиції щодо удосконалення механізмів розвитку поточних і перспективних Крупних програм ЮНЕСКО.

З використанням методів медичної кібернетики створено ІТ цифрової медицини для діагностики, профілактики і лікування найбільш розповсюджених тяжких захворювань (серцево-судинні, інсульт, діабет). На базі Київської міської клінічної лікарні № 3 створено центр цифрової медицини. Інтелектуальні інформаційні технології лікування тяжких захворювань, відпрацьовані у цьому центрі, ефективно використовуються в багатьох медичних установах України. В клінічних умовах Науково-практичного центру профілактики та клінічної медицини Державного управління справами проведено комплексні дослідження перспективних технологій цифрової медицини в режимах поточного професійного огляду і диспансерного лікування. Результати досліджень підтвердили належну точність діагностування та обстеження як прихованих, так і виражених серцево-судинних та неврологічних захворювань.

Важливий внесок у формування національної системи стандартів вносить Технічний комітет зі стандартизації інформаційних технологій. Чинна Національна система стандартів постійно розвивається і наразі налічує більш ніж 3000 пріоритетних стандартів з інформаційних технологій, що безумовно сприяє пришвидшеному розвитку в Україні інноваційних процесів в частині використання інформаційних технологій.

В Міжнародному Центрі видаються наукові журнали «Керуючі системи і машини» і «Кібернетика і обчислювальна техніка», міждисциплінарний характер яких сприяє підвищенню доступності обміну накопиченими знаннями та професійним досвідом між дослідниками різних наукових напрямів.

Міжнародний Центр як науково-дослідна та освітня установа сформувався в досить складний період становлення нашого суспільства, розвитку України як держави і науки як важливої її складової. Подолавши численні труднощі, Міжнародний Центр став провідною організацією у вирішенні пріоритетних проблем інформатики та інформаційних технологій.

Перспективи діяльності Міжнародного Центру визначено концепцією його розвитку на 2016–2023 роки. Як показав всебічний аналіз, концепція повною мірою відповідає світовим тенденціям, об'єднаним ємким терміном «цифрова трансформація», який охоплює пріоритети досліджень в галузі



інформаційних технологій на період 5–10 років.

Сьогодні особливо важливо розвивати фундаментальні дослідження теорії образного мислення і загальної теорії інтелектуальних інформаційних технологій. Це дозволить створювати класи нових перспективних інтелектуальних інформаційних технологій, орієнтованих на широке використання в багатьох сферах діяльності людини та суспільства. Це відкриває нові можливості у вирішенні проблем «розумного»: «розумний прилад», «розумне підприємство», «розумне обладнання», «розумний транспорт», «розумна економіка» тощо.

У комплексних дослідженнях інтелектуальних інформаційних технологій та систем важливо розвинути теорію синергетики інформаційного простору, теорію інформаційної взаємодії. Необхідно розширити дослідження системної моделі інформаційного суспільства і технологій його розвитку з урахуванням сучасних вимог до стійкості функціонування, досягнення соціально-економічного розвитку та інформаційної безпеки.

Вимагає прискореного розвитку теорія інтелектуального управління та теорія системних інформаційних технологій. Нові технології інтелектуального управління вкрай важливі для вирішення проблем сучасної робототехніки, створення бортових і наземних систем керування пілотованими і безпілотними літальними засобами тощо.

Вкрай важливо розвивати науково-дослідні роботи, започатковані за Державною науково-технічною програмою «Образний комп'ютер», розробками якої затверджено авторитет України в постановці та вирішенні нових, досить складних проблем computer science.

Необхідно розширити програму досліджень в галузі комп'ютерних технологій навчання в таких напрямках, як технології прискореного освоєння знань, цифрова дидактика для дітей дошкільного віку, учнів, студентів, фахівців і дорослого населення. Співпраця з ЮНЕСКО обумовлює прискорене створення інформаційних технологій навчання в умовах багатомовності кіберпростору і збереження мов.

В галузі інтелектуальних ІТ в біології та медицині особливого значення набувають мобільні технології та пристрої. Важливе місце у розвитку таких технологій займає реалізація актуальних завдань моніторингу і відновлення персонального здоров'я людини на основі мобільних додатків, які забезпечують віртуальний зв'язок пацієнта з лікарем засобами Інтернет.

В Міжнародному Центрі сформовано програму робіт у найближчі роки і визначено механізми її реалізації в умовах стрімкого розвитку процесів інтелектуалізації ІТ в усіх сферах діяльності суспільства. Звісно, ми розуміємо проблеми і труднощі, які стоять перед нами, але ми маємо достатній досвід і потенціал для належної організації наукових досліджень за основними напрямками діяльності Міжнародного Центру.

*В.И. Гриценко*, член-корреспондент НАН України,  
директор Міжнародного науково-учебного центру інформаційних  
технологій і систем НАН України і МОН України  
e-mail: vig@irtc.org.ua

Міжнародний науково-учебний центр інформаційних технологій і систем НАН  
України і МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40, г. Київ, 03680 ГСП, Україна

## 20 ЛЕТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-УЧЕБНОГО ЦЕНТРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

Пятого мая 1997 года Приказом Президента Национальной академии наук Украины создан Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины. Базовыми направлениями фундаментальных и прикладных научных исследований в Международном Центре являются: создание интеллектуальных информационных технологий на основе методов и средств образного мышления, комплексные исследования проблем интеллектуального управления, интеллектуальной робототехники, цифровой медицины, электронного обучения, разработка архитектуры информационных пространств и технологий развития безопасного информационного общества.

По главным направлениям деятельности Международного Центра сформированы научные школы в области информационных технологий и систем, технической кибернетики, биологической и медицинской кибернетики, математического анализа сложных экономических систем. Важный вклад в развитие этих научных школ внесли выдающиеся украинские ученые — академики В.И. Скурихин, А.Г. Ивахненко, Н.М. Амосов и А.А. Бакаев. Их ученики и последователи успешно развивают эти научные направления в нашей стране и за рубежом.

Международный Центр — инициатор исследований и разработки концепции нового класса информационных технологий — интеллектуальных информационных технологий. Это особые, наукоемкие информационные технологии, отличающиеся от известных ИТ использованием в процессах переработки информации качественно нового подхода — оперирование образами информационных объектов. При этом в разных конфигурациях интеллектуальных ИТ достигается понимание человеческой речи, распознавание реальных и искусственно созданных объектов, активное взаимодействие с окружающей средой, выявление сути явления, оперирование знаниями и возможностями выбора стратегии и тактики действий для достижения поставленной цели.

В Международном Центре сформирована стратегия деятельности на ближайшие годы и определены механизмы ее реализации в условиях стремительного развития процессов интеллектуализации информационных технологий во всех сферах деятельности общества. Как показал всесторонний анализ, стратегия в полной мере соответствует мировым тенденциям, объединенным емким термином «цифровая трансформация».

**Ключевые слова:** интеллектуальная информационная технология, образное мышление, интеллектуальное управление, цифровая медицина, электронное обучение, робототехника, информационное общество

*V.I. Grytsenko*, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Director of 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  
e-mail: [vig@irtc.org.ua](mailto:vig@irtc.org.ua)

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

## 20 YEARS OF THE INTERNATIONAL RESEARCH AND TRAINING CENTER FOR INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

May 5, 1997 the International Research and Training Center for Information Technologies and Systems NAS and MES of Ukraine was established by National Academy of Sciences of Ukraine.

During 20 years new scientific direction — Intelligent Information Technology (IIT), was formed. This methodology, the software and hardware became the basis for the development of IIT of imaginative thinking, neural network technology, IIT for digital medicine, the E-education and intelligent control technologies.

The basic directions of fundamental and applied scientific research in the International Center are: creation of intelligent information technologies based on methods and means of imaginative thinking, comprehensive research of problems of intelligent management, intelligent robotics, digital medicine, e-learning, digital information space and technologies for the development of a secure information society.

By the main directions of the International Center, scientific schools in the field of information technologies and systems, technical cybernetics, biological and medical cybernetics, and mathematical analysis of comprehensive economic systems have been formed. An important contribution to the development of these scientific schools was made by outstanding Ukrainian scientists — academicians V.I. Skurikhin, A.G. Ivakhnenko, N.M. Amosov and A.A. Bakaev. Their students and followers successfully develop these scientific directions in our country and abroad.

The International Center is the initiator of research and development of the concept of a new class of information technologies — intelligent information technologies. These are special, knowledge-intensive information technologies that differ from the known IT in the new quality — operating images of information objects. At the same time, an understanding of human speech, recognition of real and artificially created objects, active interaction with the environment, revealing the essence of the phenomenon, operating knowledge and the choice of strategy and tactics for achieving the set goal are achieved through the contours of intellectual IT.

Technical Committee for Standardization of information technologies, scientific journals "Control Systems and Computers" and "Cibernatics and Computer Engineering", presentations of our scientists at prestigious international conferences, symposia and exhibitions make an important contribution for increasing the authority of the International Center.

The International Center has formed a program of work for the nearest years and defined the mechanisms for its implementation in the context of the rapid development of intellectualization of information technologies in all spheres of our society. As the comprehensive analysis showed, this program fully corresponds to global trends that the term "digital transformation" characterizes and covers the research priorities in information technology for a period of 5–10 years.

**Keywords:** *intelligent information technology, imaginative thinking, intelligent management, digital medicine, e-learning, robotics, information society.*

# Информатика и информационные технологии

---

УДК 681.32

**Л.С. ФАЙНЗИЛЬБЕРГ**, д-р техн. наук, главный науч. сотр.

отд. автоматизированных систем обработки данных

e-mail: fainzilberg@voliacable.com

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем

НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40,

г. Киев, 03680 ГСП, Украина

## **ИНТЕРАКТИВНЫЙ СИНТЕЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ**

---

*Разработана обобщенная модель интеллектуальной информационной технологии анализа и интерпретации сигналов сложной формы. Предложена архитектура инструментальной системы, обеспечивающей интерактивный синтез таких технологий. Ядро системы построено на двух абстрактных классах — обобщенной модели носителя данных (МНД) и обобщенной модели обработки данных (МОД), на базе наследников которых создан широкий набор интеллектуальных средств извлечения диагностической информации из сигналов, наблюдаемых в условиях внутренних и внешних возмущений.*

*Представлена методология выполнения доказательных экспериментов, обеспечивающих тестирование и оценку эффективности оригинальных алгоритмов обработки сигналов. Приведены примеры успешного синтеза ряда прикладных информационных технологий обработки сигналов с локализованной информацией, созданные с использованием разработанной инструментальной системы.*

**Ключевые слова:** информационная технология, сигналы сложной формы, инструментальная система.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При решении многих прикладных задач (техническая и медицинская диагностика, сейсмология, радиолокация и др.) возникает необходимость извлечения информации из скалярного или векторного сигнала  $z(t)$ , порождаемого объектом в условиях действия возмущений [1]. Сложности решения таких задач существенно возрастают, когда нужная информация локализована на относительно небольших интервалах (фрагментах)  $\Delta t_f \ll T_0$ ,  $\forall f = 1, 2, \dots$ , области определения  $T_0 = [t_1, t_2]$  наблюдаемого сигнала, а возмущения носят неаддитивный характер [2]. Поэтому разработка интеллектуальных информационных технологий (ИТ), обеспечивающих извлечения информации из

© Л.С. ФАЙНЗИЛЬБЕРГ, 2017

ISSN 2519-2205 (Online), ISSN 0454-9910 (Print). Киб. и выч. техн. 2017. № 1 (187)

таких сигналов, — важная задача как в научном, так и в прикладном планах.

Разумеется, каждый объект конкретной предметной области порождает уникальный сигнал, что налагает специфические условия на компьютерную технологию извлечения скрытой информации из  $z(t)$ . Но если следовать *только* такой логике, то разработку *новой* ИТ нужно начинать практически с нуля.

С другой стороны, согласно [3], задача технологии как *науки* состоит в выявлении *общих* закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных и экономных производственных процессов. В нашем случае такими процессами являются интеллектуальные вычислительные процедуры, обеспечивающие эффективный переход от «сырья» технологии  $z(t)$  к информационному продукту, ориентированному на конкретного пользователя [4].

**Цель статьи** — обобщить опыт, накопленный Международным научно-учебным центром информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины при разработке прикладных систем анализа и интерпретации сигналов с локально сосредоточенной информацией, при создании которых использована открытая для расширения инструментальная система интерактивного синтеза таких технологий.

## ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрим с общих позиций задачу *косвенной оценки* состояния  $s$  объекта по наблюдаемому сигналу  $z(t)$ . Такая задача возникает в тех случаях, когда отсутствуют датчики или индикаторы, обеспечивающие непосредственное определение  $s$ . Например, высокая температура и агрессивность среды препятствуют непосредственному определению химического состава расплава в сталеплавильной ванне. Невозможно при *массовых* профилактических обследованиях использовать инвазивный метод коронарографии для выявления лиц с высоким риском сердечно-сосудистых патологий: метод достаточно дорогой, а самое главное — небезопасный для пациента. Список подобных примеров можно было бы продолжить.

Будем полагать, что исследуемый объект при фиксированном состоянии  $s \in S$  порождает физическое поле, которое под действием закономерных процессов, происходящих внутри объекта, изменяется во времени.

Представим это поле в виде

$$z_0 = \Psi_s(u, t), \quad (1)$$

где  $t$  — время,  $u$  — точка пространства вокруг объекта, а  $\Psi_s$  — некоторая в общем случае неизвестная функция, зависящая от состояния  $s$ .

Тогда, если зафиксировать точку пространства  $u = u_0$  и измерять величину поля в этой точке, то функция  $\Psi_s(u, t)$  вырождается в скалярную функцию времени

$$z_0 = \Psi_s(u_0, t) \equiv z_0(t), \quad (2)$$

а при измерении поля (1) в нескольких фиксированных точках  $u_1, u_2, \dots, u_p$  пространства — в векторную функцию  $z_0(t) = (z_1(t), \dots, z_p(t))$ .

Отсюда следует, что с формальной точки зрения ИТ обработки сигнала должна обеспечивать решение обратной задачи: требуется косвенно оценить неизвестное значение  $s$  по результатам измерения  $z_0(t)$  на отрезке наблюдения  $T_0 = [t_1, t_2]$  (рис 1).

В подавляющем большинстве практически важных задач функция  $\Psi_s(\cdot)$  неизвестна. И хотя есть все основания полагать, что закономерность (1) существует, построить адекватную модель для ее описания только на основе *физических* представлений затруднительно, а иногда и просто невозможно. Поэтому будем рассматривать (1) лишь как рабочую гипотезу, позволяющую обосновать принципиальную возможность построения ИТ для оценки состояния объекта  $s$  по наблюдаемому сигналу  $z_0(t)$ .

Поскольку при отсутствии аналитического описания функции  $\Psi_s(\cdot)$  проблема построения ИТ не может быть сведена лишь к *математической* задаче, будем рассматривать эту проблему с более общих позиций как *методологию* решения практических задач на основе *формальных* и *неформальных* приемов выбора и настройки базового набора вычислительных процедур.

Рассмотрим принципы построения инструментальной системы, обеспечивающей реализацию такого подхода применительно к задаче обработки сигналов с локально-сосредоточенными признаками, обобщенную модель которых можно представить в виде

$$z(t) = \Phi[z_0(t), \xi(t)] + h(t), \quad (3)$$

где  $z_0(t)$  — ненаблюдаемый полезный сигнал, искаженный внутренними  $\xi(t)$  и внешними  $h(t)$  возмущениями, а  $\Phi[\cdot]$  — некоторая в общем случае неизвестная функция.

В свою очередь полезный сигнал  $z_0(t)$  представляет собой последовательность фрагментов  $z_0^{(f)}(t)$ ,  $f = 1, \dots, F$ , заданных на интервалах  $\Delta t_f \ll T_0$ :

$$z_0(t) = \begin{cases} z_0^{(1)}(t), & 0 \leq t < t_0^{(1)}, \\ \dots \\ z_0^{(F)}(t), & t_0^{(F-1)} \leq t \leq t_0^{(F)} = T_0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $T_0$  — область определения  $z_0(t)$ , причем только некоторые из этих фрагментов несут диагностическую ценность [5].

Для иллюстрации, на рис. 2 показаны примеры двух сигналов с локализованной информацией, порожденные объектами *разной физической природы*: электрокардиограмма (ЭКГ), представляющая собой запись в координатах «разность потенциалов  $E$  — время  $t$ » сигнала, несущего информацию об электрической активности сердца (рис. 2, а), и термограмма охлаждения железоуглеродистого расплава, отображаемая в координатах «температура  $T$  — время  $t$ » (рис. 2, б).

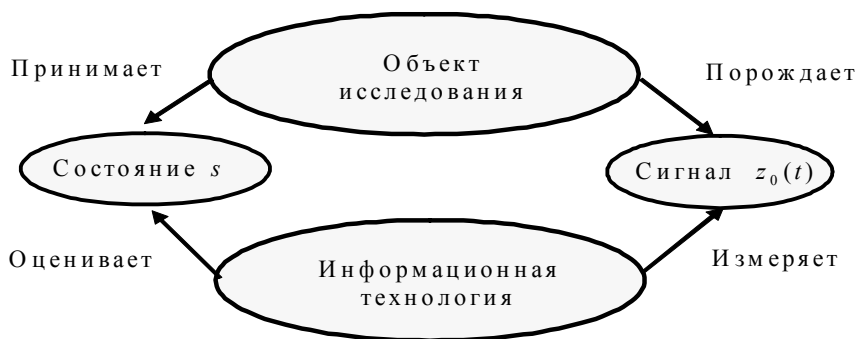


Рис. 1. Абстрактная модель ИТ обработки сигнала

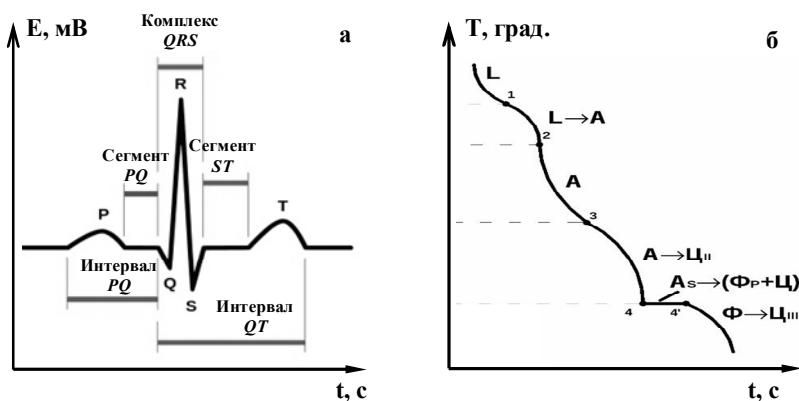


Рис. 2. Примеры сигналов с локально-сосредоточенной информацией

Несмотря на различие физической природы объектов, порождающих такие сигналы, они имеют общую особенность: оба сигнала содержат характерные фрагменты, по которым *косвенно* можно оценить состояние объекта: параметры конечной части желудочкового комплекса ЭКГ (участка  $ST - T$ ) несут информацию о начальных признаках ишемических изменений миокарда, а параметры фрагментов термограммы, вызванные термическими эффектами фазовых превращений, несут информацию о химическом составе расплава.

Таким образом *обобщенная задача* прикладной ИТ обработки сигналов с локально сосредоточенными признаками должна обеспечить (рис. 3):

- восстановление полезного сигнала  $z_0(t)$  по наблюдению  $z(t)$  в условиях действия внутренних  $\xi(t)$  и внешних  $h(t)$  возмущений;
- распознавание информативных фрагментов  $z_0^{(1)}(t), \dots, z_0^{(F)}(t)$  восстановленного сигнала  $z_0(t)$ ;
- анализ амплитудно-временных параметров (диагностических признаков)  $x_1, \dots, x_N$ , сосредоточенных на распознанных фрагментах  $z_0^{(1)}(t), \dots, z_0^{(F)}(t)$ ;
- реализацию диагностического правила  $s = s(x_1, \dots, x_N)$ , обеспечивающего оценку состояния объекта  $s$  по признакам  $x_1, \dots, x_N$ .

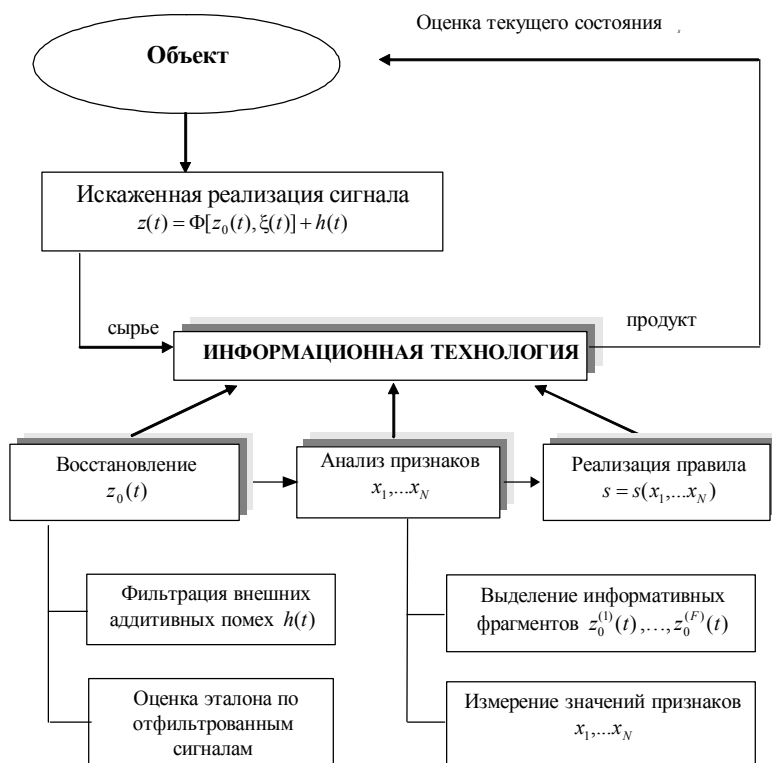


Рис. 3. Обобщенная модель формирования информационного продукта

Рассмотрим архитектуру инструментальной системы, которая позволяет провести необходимые экспериментальные исследования, направленные на ускорение разработки и повышение эффективности новых ИТ обработки сигналов с локально-сосредоточенными диагностическими признаками.

## АРХИТЕКТУРА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Основная идея, которая положена в основу инструментальной системы, состоит в том, что с ее помощью конструктор прикладной ИТ имеет возможность [6]:

- проводить необходимые эксперименты для выбора и оптимальной настройки вычислительных процедур, реализующих отдельные стадии обработки сигнала;
- реализовывать технологическую цепочку алгоритмов обработки, используя готовые вычислительные компоненты самой инструментальной среды;
- расширять при необходимости состав компонентов инструментальной системы (рис. 4).

Разумеется, при реализации инструментальной системы, мы опирались на имеющийся огромный научный потенциал в области цифровой обработки сигналов, методов распознавания образов и моделирования сложных



систем по экспериментальным данным. В то же время оказалось, что при реализации конкретных прикладных систем обработки сигналов с локализованной информацией возникла необходимость повысить «интеллект» целого ряда известных алгоритмов.

Поэтому в библиотеку вычислительных процедур включен широкий набор как традиционных, так и оригинальных алгоритмов, в том числе вычислительных процедур, обеспечивающих

- генерацию детерминированных и случайных последовательностей;
- модификацию данных (интерполяцию, передискретизацию, формирование смесей, цепочек и т.п.);
- фильтрацию, в том числе адаптивную частотно-избирательную и ранговую;
- адаптивное сглаживание данных и их аппроксимацию различными функциями;
- статистический и спектральный анализ;
- анализ хаотичности параметров наблюдаемых сигналов на основе различных энтропийных оценок;
- переход от сигнала  $z(t)$  к его отображению в нормированных фазовых координатах  $z(t)$ ,  $\dot{z}(t)$  или  $z(t)$ ,  $z(t - \tau)$ , где  $\tau$  — задержка во времени;
- обнаружение характерных точек, распознавание фрагментов и сегментацию одномерных и двумерных последовательностей.

Следует иметь в виду, что интеллектуальные ИТ, в отличие от традиционных, основанных лишь на вычислительных процедурах обработки данных, оперируют обобщенными понятиями (образами), которые предоставляют более полную информацию о внешней среде, а анализ таких образов порождает целостную картину изучаемых явлений. Важный инструмент образного представления задачи — когнитивная компьютерная графика, которая позволяет либо сразу увидеть решение задачи, либо получить подсказку для его нахождения [7].

Такие возможности когнитивной графики обусловлены тем, что человеческий мозг гораздо легче воспринимает и интерпретирует графический образ, чем породившие его числовые данные. Поэтому, если удачно представить данные задачи в виде когнитивного графического образа, то при его анализе решение может быть найдено без сложных вычислений.

Принимая во внимание этот факт, графический интерфейс инструментальной системы реализует широкий набор процедур отображения и манипуляции с графическими образами.

Для придания системе определенной гибкости и возможности последующего расширения, ее ядро построено на двух программных классах — обобщенной модели носителя данных (**МНД**) и обобщенной модели обработки данных (**МОД**).

Обобщенная модель носителя данных представляет собой *абстрактный* класс, на базе которого создаются объекты (наследники), обеспечивающие:

- хранение цифровых данных, необходимых для организации элементарных вычислительных процедур на различных стадиях обработки сигнала;
- отображение результатов обработки отдельных стадий в виде экранных графических образов и текстовой информации;

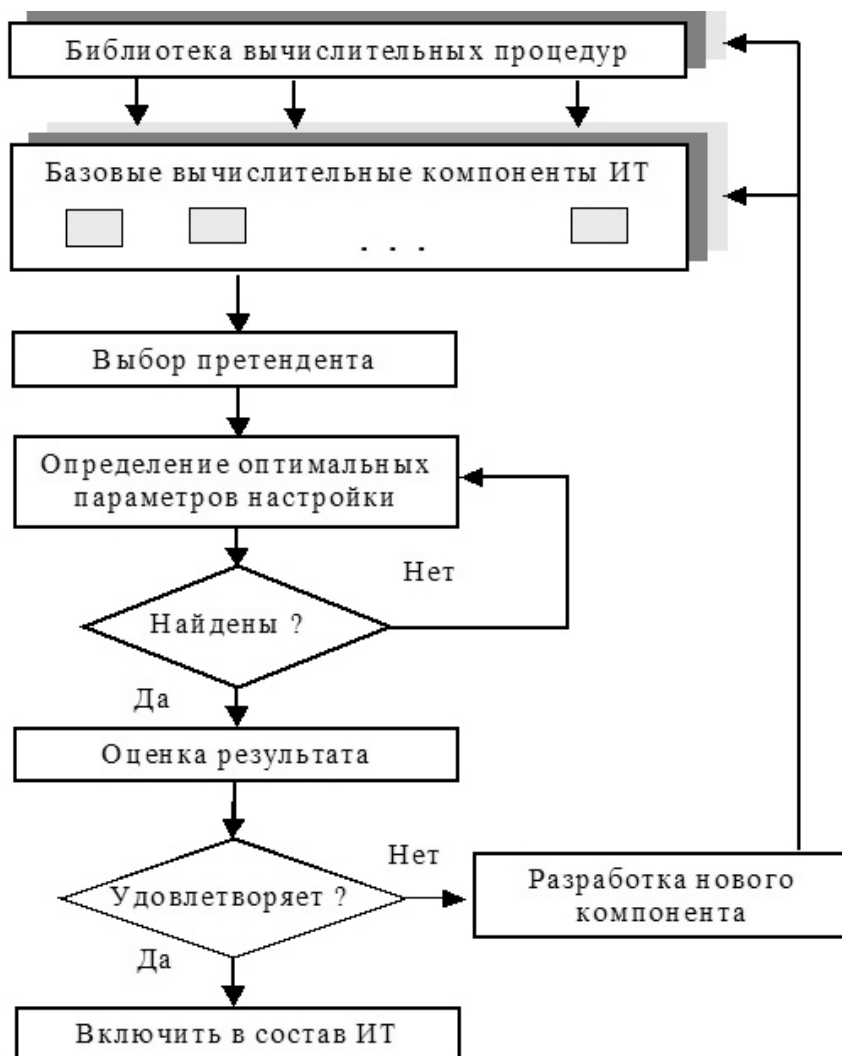


Рис. 4. Концептуальная идея инструментальной системы

- доступ к данным через их графические образы;
  - модификацию графических образов (рис. 5).
- С этой целью класс МНД выполнен в виде тройки

$$\text{МНД} = \langle D_c, D_g, G \rangle, \quad (5)$$

где  $D_c$  — поля содержательных данных,  $D_g$  — поля графических данных,  $G$  — методы отображения и модификации графических образов.

*Объединение* в одном объекте данных и методов их визуализации открывает возможность получать доступ к данным через их экранные графические образы и обеспечить необходимую привязку графического образа, визуализирующего результат обработки, к графическому образу исходных данных. Такие возможности являются весьма полезными, а порой и просто необходимыми при синтезе прикладных ИТ обработки сигналов.

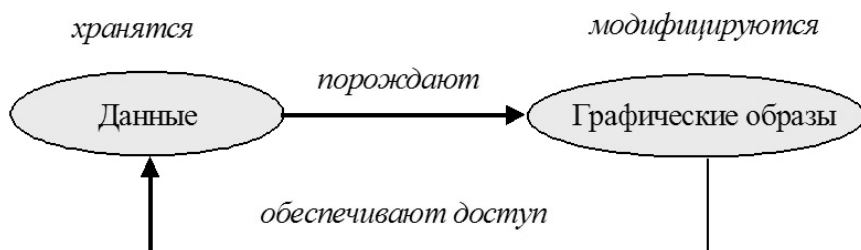


Рис. 5. Концептуальная идея построения класса МНД

Обобщенная модель обработки данных (**МОД**) также представляет собой абстрактный класс с универсальными полями, свойствами и методами, *инвариантными* относительно конкретной процедуры обработки, причем **МОД** содержит виртуальный метод «пустой» обработки, который доопределяется в наследниках этого класса.

Тем самым абстрактный класс **МОД** позволяет унифицировать понятие элементарной обработки данных, упорядочить процесс создания программных компонент, реализующих отдельные стадии обработки, и организовать удобный интерфейс взаимодействия между активными экземплярами (объектами) класса **МНД** и конкретной процедурой обработки (рис. 6).

Класс **МОД** поддерживает унифицированный интерфейс вызова любой библиотечной вычислительной процедуры:

$$\langle \text{Имя} \rangle (I_1, \dots, I_{N_1}; L_1^{(I)}, \dots, L_{N_1}^{(I)}; O_1, \dots, O_{N_1}; L_1^{(O)}, \dots, L_{N_2}^{(O)}; \alpha_1, \dots, \alpha_Q; \text{Mess}), \quad (6)$$

где:  $I_1, \dots, I_{N_1}$ ;  $O_1, \dots, O_{N_1}$  — указатели на массивы входных (Input) и выходных (Output) данных;  $L_1^{(I)}, \dots, L_{N_1}^{(I)}$ ;  $L_1^{(O)}, \dots, L_{N_2}^{(O)}$  — число элементов в соответствующих массивах;  $\alpha_1, \dots, \alpha_Q$  — настроечные параметры процедуры обработки; *Mess* — строка сообщения об исключительной (аварийной) ситуации.

Такой интерфейс позволил *распараллелить* работу программистов, участвующих в создании инструментальной системы: прикладные программисты имеют возможность сосредоточиться на их главной задаче — реализации эффективных вычислительных процедур обработки данных, не заботясь об организации диалога с пользователем и методах графического представления результатов, а системные программисты — рассматривать процедуру обработки как некий «черный ящик».

Интерактивный синтез прикладной ИТ сводится к выбору и оптимальной настройке базовых вычислительных компонент инструментальной системы (рис. 7).

Для удобства настройки параметров  $\alpha_1, \dots, \alpha_Q$  вычислительных процедур в инструментальной системе организована «виртуальная» связь органа управления и графического образа, отображающего результат обработки. Одновременно с перемещением ползунка настройки происходит изменение графического образа и конструктор может *визуально* определить «оптимальные» значения параметров настройки  $\alpha_1, \dots, \alpha_Q$  в тех случаях, когда отсутствуют формальные методы оптимизации выбора параметров (рис. 8).

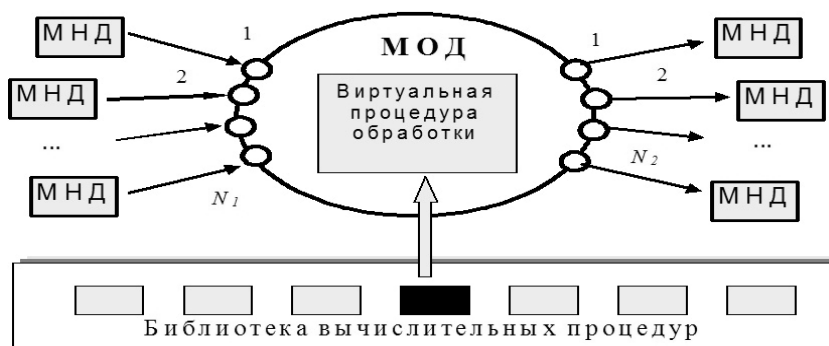


Рис. 6. Схема взаимодействия классов МНД и МОД в инструментальной системе

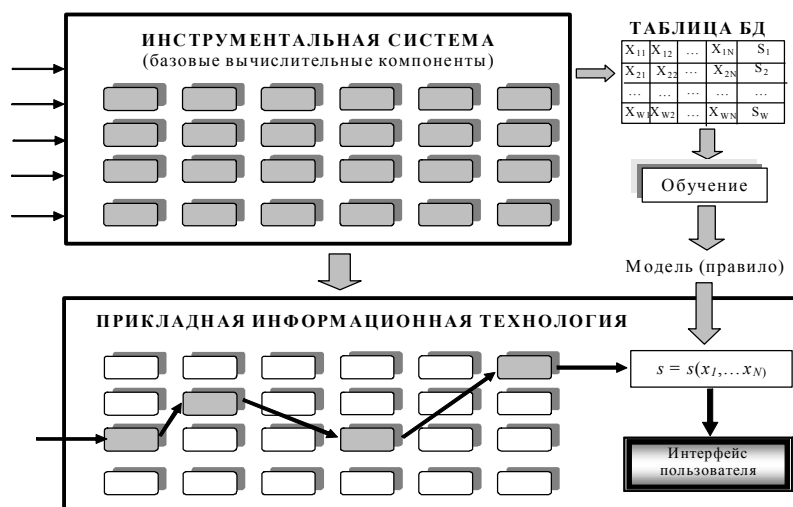


Рис. 7. Организация цепочки вычислительных процедур в прикладной ИТ

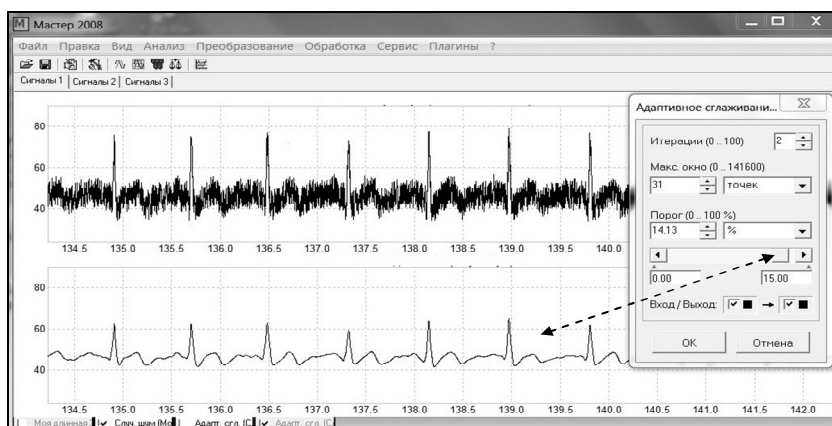


Рис. 8. Рабочее окно инструментальной системы в режиме интерактивной настройки параметров

Поскольку базовые вычислительные компоненты, помимо традиционных, включали оригинальные алгоритмы, то для оценки их эффективности требуется проведение доказательных экспериментов. Рассмотрим общую идею, положенную в основу методологии проведения таких экспериментов.

### **МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ДОКАЗАТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ИНТЕРАКТИВНОМ СИНТЕЗЕ ПРИКЛАДНЫХ ИТ**

Напомним, что науке известно два метода доказательств — *дедуктивный* (от общего к частному) и *индуктивный* (от частного к общему). Дедукция составляет методологическую основу доказательств в математике и логике, хотя в последнее время дедуктивный подход получил развитие и при построении многих нематематических дисциплин — биологии, лингвистики, социологии и др. Поэтому при разработке инструментальной система была поставлена задача организации доказательных экспериментов с *элементами дедуктивного подхода*.

Продemonстрируем возможность такого подхода на примере разработки алгоритма вычисления нового диагностического показателя ЭКГ, который ранее не применялся в кардиологической практике.

Анализ литературных данных и собственные эксперименты позволили выдвинуть предварительную *гипотезу* о диагностической ценности показателя  $\beta_T$ , характеризующего симметрию зубца  $T$  ЭКГ. Для оценки этого показателя предложены оригинальные вычислительные процедуры обработки ЭКГ на фазовой плоскости  $z(t), \dot{z}(t)$  [8], предусматривающие подавление помех на основе адаптивных алгоритмов частотно-избирательной фильтрации [9] и сглаживания данных [10], усреднение фазовых траекторий с использованием хаусдорфовой метрики [11] и определение  $\beta_T$  по распознанному участку реполяризации усредненной фазовой траектории.

Разумеется, с точки зрения современных представлений о доказательной медицине [12], прежде, чем рекомендовать новый диагностический показатель  $\beta_T$  для медицинской практики, нами проводились предварительные клинические испытания алгоритма компьютерной оценки  $\beta_T$  по реальным ЭКГ репрезентативных выборок наблюдений. При этом в группу *верифицированных* больных были включены пациенты, у которых ЭКГ-анализ по традиционным показателям в 12 отведениях *не выявил* каких либо отклонений от нормы, хотя у всех больных был предварительно установлен диагноз ишемической болезни сердца (ИБС) по данным коронарографии.

Тем не менее, обработка полученных результатов по  $t$ -критерию Стьюдента показала [13], что средние значения предложенного показателя  $\beta_T$  статистически значимо ( $p < 0,001$ ) различались в группах больных ИБС ( $n = 441$ ) и здоровых добровольцев ( $n = 387$ ) и составили соответственно  $0,956 \pm 0,43$  у.е. и  $0,665 \pm 0,12$  у.е.

Описанный эксперимент — классический пример *индуктивного* метода доказательства диагностической ценности  $\beta_T$ , когда результаты, полученные на *конечной* выборке наблюдений, с определенной степенью статистической достоверности *обобщаются* на генеральную совокупность.

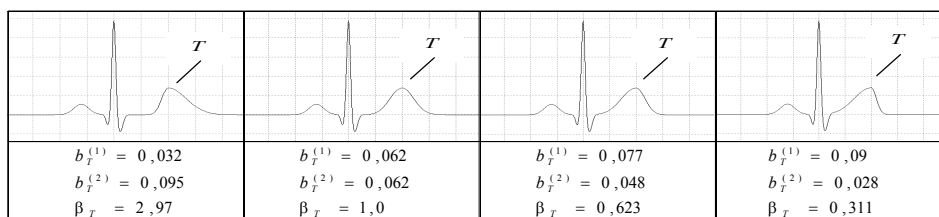


Рис. 9. Эталонные циклы ЭКГ с разной степенью симметрии зубца Т

Однако такими экспериментами не ограничилось исследование диагностической ценности  $\beta_T$ . Многочисленные наблюдения показали, что даже у одного испытуемого на протяжении *короткого* интервала времени показатель  $\beta_T$  может претерпевать достаточно большие изменения. Поэтому потребовалось построить *доказательный* эксперимент, который бы подтвердил, что динамика изменений  $\beta_T$  у конкретных испытуемых свидетельствует о высокой чувствительности  $\beta_T$  к интраиндивидуальным изменениям ЭКГ [14], вызванных функциональными изменениями миокарда, а не связана со случайными факторами, сопутствующими регистрации ЭКГ в реальных условиях.

Для постановки и выполнения такого эксперимента в состав инструментальной системы был включен дополнительный программный модуль, реализующий генеративную модель порождения искусственной ЭКГ реалистической формы [15], *упрощенный* вариант которой имеет вид

$$z_m(t) = \sum_{i \in \{P, Q, R, S, ST, T\}} A_i \exp \left[ -\frac{(t - \mu_i)^2}{2\tilde{b}_{im}^2} \right] + h(t), \quad m = 1, \dots, M, \quad (7)$$

где

$$\tilde{b}_{im} = \begin{cases} b_i, & \text{если } i \neq T, \\ b_T^{(1)}(1 + \varepsilon_{Tm}^{(1)}) \quad \forall t \leq \mu_T, & \text{если } i = T, \\ b_T^{(2)}(1 + \varepsilon_{Tm}^{(2)}) \quad \forall t > \mu_T, & \text{если } i = T, \end{cases} \quad (8)$$

$A_i$ ,  $\mu_i$ ,  $b_i$ ,  $i \neq T$  — параметры, характеризующие форму зубцов  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ ,  $S$  и сегмента  $ST$ , а параметры  $A_T$ ,  $\mu_T$ ,  $b_T^{(1)}$ ,  $b_T^{(2)}$  — форму зубца  $T$ , причем соотношение параметров  $b_T^{(1)}$  и  $b_T^{(2)}$  определяет степень симметрии зубца  $T$  *полезного сигнала* — «эталонного» цикла (рис 9).

Последовательности независимых случайных величин

$$\varepsilon_{Tm}^{(1)} \in [-\varepsilon_T^0, \varepsilon_T^0], \quad \varepsilon_{Tm}^{(2)} \in [-\varepsilon_T^0, \varepsilon_T^0], \quad m = 1, \dots, M, \quad (9)$$

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

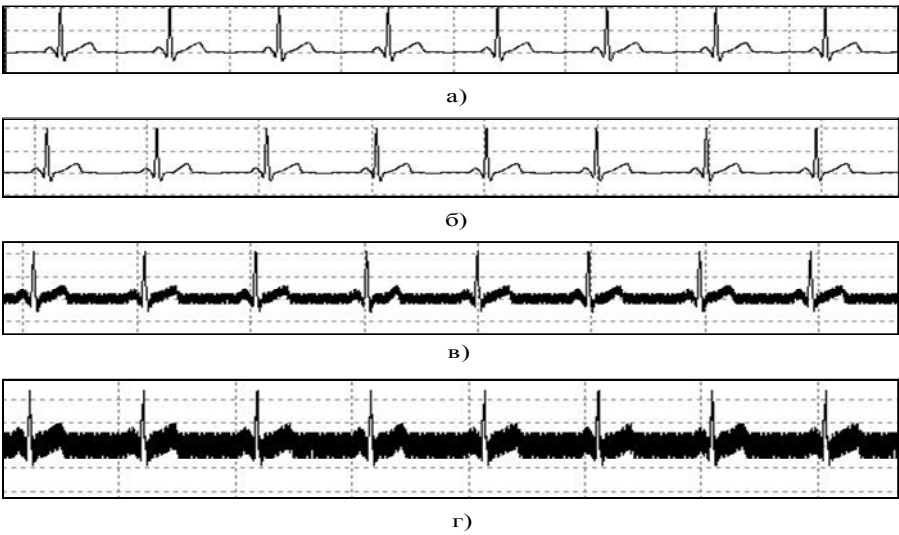


Рис. 10. Примеры тестовых сигналов

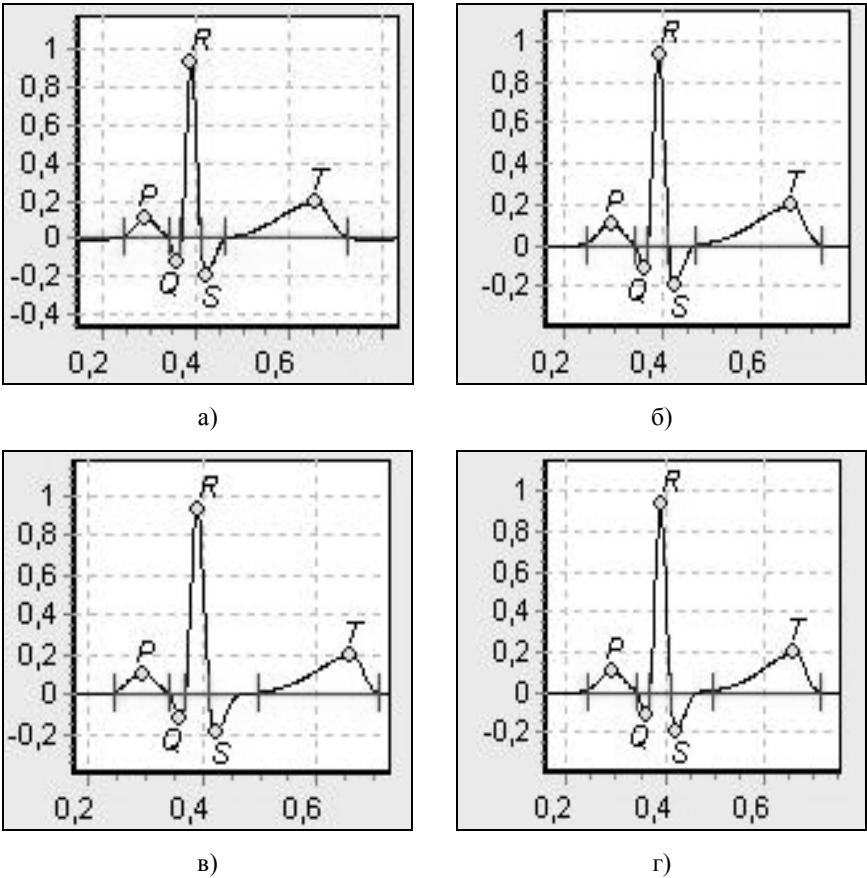


Рис. 11. Оценки эталонного цикла по тестовым сигналам

На основе модели (7) может быть порождено *сколь угодно много* искусственных ЭКГ, искаженных возмущениями  $\varepsilon_{Tm}^{(1)}$ ,  $\varepsilon_{Tm}^{(2)}$  и  $h(t)$ , для которых, в отличие от реальных ЭКГ, *известно* истинное значение показателя  $\beta_T$  *ненаблюдаемого* полезного сигнала.

Это позволило построить схему *доказательного* эксперимента с элементами *дедуктивного* подхода в том смысле, что от *общей* посылки (в данном случае — генеративной модели) осуществляется переход к *частному* результату, подтвердившему высокую воспроизводимость алгоритма вычисления  $\beta_T$ .

Идея таких экспериментов [16] состояла в сравнении истинных значений  $\beta_T$  *ненаблюдаемого* полезного сигнала и оценок  $\hat{\beta}_T$ , полученных на основе компьютерной обработки тестовых сигналов, порождаемых моделью (7) при *различных* значениях внутренних и внешних возмущений.

Эксперименты показали, что если истинные значения  $\beta_T$  лежат в диапазоне 0,3–3,0 у.е., случайные возмущения  $\varepsilon_{Tm}^{(1)}$ ,  $\varepsilon_{Tm}^{(2)}$  на последовательности циклов не превышают 50 %, а сетевая помеха  $h(t)$  не превышает 50 % диапазона изменения тестового сигнала, то при обработке не менее 50-ти циклов обеспечивается высокая точность и воспроизводимость оценки показателя  $\beta_T$ : стандартная ошибка составила всего лишь 0,021 у.е., а средняя относительная ошибка не превышала 2,64 %.

Для иллюстрации, на рис. 10 приведены искусственные ЭКГ, порожденные моделью (7), по одному и тому же эталону  $z_0(t)$  с заданным показателем симметрии  $\beta_T = 0,311$  без искажений (рис. 10, а), при  $\varepsilon_T^0 = 50$  % и  $h(t) \equiv 0$  (рис. 10, б), при  $\varepsilon_T^0 = 50$  % и 20 % сетевой помехе  $h(t)$  (рис. 10, в) и при  $\varepsilon_T^0 = 50$  и 50 % сетевой помехе  $h(t)$  (рис. 10, г), которые использовались в качестве тестовых сигналов в одном из многочисленных экспериментов.

Несмотря на существенный уровень искажений после обработки тестовых сигналов, были получены практически неразличимые оценки  $z_0(t)$  (рис. 11).

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СИНТЕЗА ПРИКЛАДНЫХ ИТ

Инструментальная система позволила провести необходимые эксперименты и тем самым расширить функциональные возможности отечественного диагностического комплекса **ФАЗАГРАФ®**, реализующего инновационный в кардиологии метод фазографии [17, 18]. Метод предусматривает анализ и интерпретацию ЭКГ-сигнала  $z(t)$  на фазовой плоскости  $z(t)$ ,  $\dot{z}(t)$ , где  $\dot{z}(t)$  — скорость изменения электрической активности сердца.

Диагностическая ценность фазографии состоит в использовании дополнительной информации, содержащейся в скоростных характеристиках исследуемого процесса. Поскольку дифференцирование зашумленных функций относится к числу некорректно поставленных математических задач, то для практической реализации фазографии разработаны специаль-



ные вычислительные процедуры фильтрации и регуляризации, обеспечившие надежную оценку  $\dot{z}(t)$ .

Интеллектуальные компоненты инструментальной системы использованы при синтезе **ИТ MAGWIN**, которая разрабатывалась по заказу фирмы SQUID AG (Германия) [19]. Технология обеспечивает компьютерную обработку магнитокардиограмм (МКГ) в реальных клинических условиях. Сложности решения этой задачи обусловлены тем, что измерение сигнала проводится в реальных клинических условиях (без использования дорогостоящего экранированного помещения). Поэтому сигнал существенно искажен различного рода возмущениями, для подавления которых привлекались оригинальные процедуры фильтрации.

Инструментальная система позволила также ускорить разработку и повысить эффективность необходимых исследований при разработке **ИТ ТЕРМОГРАФ** [20]. Сырьем этой технологии является сигнал, несущий информацию о процессе кристаллизации пробы серого чугуна, а продуктом технологии — процентное содержание углерода C, кремния Si, хрома Cr, марганца Mn, меди Cu, фосфора P, а также углеродный эквивалент CE, коэффициент эвтектического насыщения SC, прочность на растяжение Rb, твердость Hb и другие технологические показатели литейного процесса.

Компоненты инструментальной системы использовались при интерактивном синтезе информационной технологии **САЛЮКС** [1], которая реализует нетрадиционный метод диагностики. Метод основан на эффекте биохемилюминесценции — свечении организмов и биосубстратов за счет энергии экзотермических химических реакций, протекающих в тканях. Сырье технологии САЛЮКС — сигнал, несущий информацию о процессе свечения образца биологической жидкости пациента с добавками специфического антигена, а продукт технологии — результаты дифференциальной диагностики заболеваний органов пищеварения (печень, желчевыводящие пути, поджелудочная железа, толстый и тонкий кишечник), бактериального или грибкового инфицирования и других патологий.

Инструментальная система позволила реализовать экспериментальный образец **ИТ АНТИСТРЕСС** [21], которая на основе принципа биологической обратной связи обучает пользователя навыкам правильного дыхания. С этой целью в реальном масштабе времени определяются показатели вариабельности сердечного ритма, которые порождают характерные когнитивные графические образы на экране монитора в виде динамических ритмограмм, скаттерограмм и гистограмм сердечного ритма. Методика обучения основана на управлении параметрами дыхания с учетом индивидуальных свойств сердечного ритма конкретного пользователя.

Интеллектуальные вычислительные компоненты инструментальной системы и оригинальные методы графической визуализации данных позволили обнаружить интересные свойства фазовых портретов одноканальной ЭКГ. Оказалось, что фазовые портреты ЭКГ, подобно отпечаткам пальцев, имеют уникальные характеристики, присущие конкретным лицам, причем эти характеристики остаются неизменными на протяжении длительного периода наблюдений (более 10 лет) [22]. Обнаруженные свойства положили основу нового научного направления, результатом которого могут стать новые средства биометрической идентификации личности.

Мы привели лишь несколько успешных примеров использования инструментальной системы при создании новых информационных технологий обработки сигналов с локализованной информацией. Несомненно, интеллектуальные возможности системы будут активно использованы при выполнении экспериментальных исследований, направленных на обработку других аналогичных сигналов, примеры которых приведены в работе [4].

## ВЫВОДЫ

Разработанная инструментальная система позволяет конструктору прикладных ИТ в интерактивном режиме реализовать технологическую цепочку процедур обработки сигнала с локально сосредоточенными признаками, используя открытый для расширения набор базовых вычислительных компонент и средства когнитивной компьютерной графики.

Ядро инструментальной системы построено на основе двух программных классов, реализующих обобщенную модель носителя данных (МНД) и обобщенную модель виртуальной обработки данных (МОД). На базе наследников класса МОД создан широкий набор готовых к практическому применению вычислительных компонент, реализующих традиционные и оригинальные алгоритмы обработки сигналов с локально сосредоточенными признаками. Подтверждение эффективности новых вычислительных алгоритмов проводилось на основе доказательных экспериментов, методология которых продемонстрирована на примере оценки оригинального показателя ЭКГ, ранее не используемого в кардиологической практике.

Приведенные примеры успешного синтеза прикладных информационных технологий обработки сигналов с локализованной информацией использования демонстрируют эффективность разработанной инструментальной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Файнзильберг Л.С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика. Киев: Наук. Думка, 2008. 333 с.
2. Гриценко В.И., Файнзильберг Л.С. Компьютерная диагностика по сигналам сложной формы в условиях внутренних и внешних возмущений. *Доповіди НАН України*. 2013. № 12. С. 36–44.
3. *Технология. Советский энциклопедический словарь*. М.: Советская энциклопедия, 1988. С. 1330.
4. Файнзильберг Л.С. Интеллектуальные возможности и перспективы развития фазографии — информационной технологии обработки сигналов сложной формы. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып. 186. С. 56–77.
5. Файнзильберг Л.С. Компьютерная диагностика по фазовому портрету электрокардиограммы. Киев: Освита України, 2013. 191 с.
6. Файнзильберг Л.С. Инструментальная система для экспериментальной оценки эффективности алгоритмов предварительной обработки сигналов сложной формы. *Управляющие системы и машины*. 2008. № 2. С. 3–12, 53.
7. Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика. М.: Наука, 1991. 192 с.
8. Fainzilberg L.S. Nowa metoda interpretacji zapisu EKG w balaniach skriningowych oraz w opiece domowej. *Zdrowie publiczne (Public Health)*. 2005. Vol. 115. № 4. P. 458–464.

9. Fainzilberg L.S., Glushauskene G.A. Narrow-band Rejection Filter for Suppression of Harmonic Concentrated Interference on the Basis of Discrete Fourier Transform. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2009. Vol. 41. Iss. 8. P. 55–70.
10. Файнзильберг Л.С. Адаптивное сглаживание шумов в информационных технологиях обработки физиологических сигналов. Математичні машини і системи. 2002. № 3. С. 96–104.
11. Файнзильберг Л.С. Восстановление эталона циклических сигналов на основе использования хаусдорфовой метрики в фазовом пространстве. *Кибернетика и системный анализ*. 2003. № 3. С. 20–28.
12. Минцер О.П. Теория и практика доказательной медицины. *Лікування та діагностика*. 2004. № 3. С. 7–15.
13. Файнзильберг Л.С. ФАЗАГРАФ® — эффективная информационная технология обработки ЭКГ в задаче скрининга ишемической болезни сердца. *Клиническая информатика и телемедицина*. 2010. Т. 6. Вып. 7. С. 22–30.
14. Schijvenaars B.J.A., Van Herpen G., Kors J.A. Intraindividual variability in electrocardiograms. *Journal of Electrocardiology*. 2008. Vol. 41. Iss. 3. P. 190–196.
15. 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.
16. Спосіб перевірки метрологічних характеристик цифрових електрокардіографів: пат. 100330 Україна: МПК G01 D 21/00. № а 2011 11909; заявл. 10.10.11; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23. 6с.
17. Гриценко В.І., Файнзильберг Л.С. Персоніфіковані засоби цифрової медицини — крок до здоров'я. Вісн. НАН України. 2012. № 8. С. 62–70.
18. Гриценко В.І., Файнзильберг Л.С. Информационная технология ФАЗАГРАФ® для интегральной оценки состояния сердечно-сосудистой системы по фазовому портрету электрокардиограммы. *Врач и информационные технологии*. 2013. № 3. С. 52–63.
19. Васецкий Ю.М., Файнзильберг Л.С. Чайковский И.А. Методы анализа структуры распределения тока в проводящей среде применительно к магнитокардиографии. *Электронное моделирование*. 2004. № 3. С. 95–115.
20. Файнзильберг Л.С. Диагностика состояния объектов по фазовым траекториям наблюдаемых сигналов с локально сосредоточенными признаками. *Проблемы управления и информатики*. 2004. № 2. С. 56–67.
21. Файнзильберг Л.С., Кондратюк Т.В., Семергей Н.А. АНТИСТРЕСС — новая информационная технология управления регуляторными системами организма человека на основе биологической обратной связи. *Управляющие системы и машины*. 2011. № 3. С. 62–72.
22. Файнзильберг Л.С., Корчинська З.А., Семергей М.О. Програмно-технічний комплекс для дослідження нового методу біометричної ідентифікації особистості за фазовим портретом ЕКГ. *Криміналістичний вісник*. 2015. № 1(23). С. 63–71.

Получено 22.12.2016

## REFERENCE

1. Fainzilberg L.S. Information technology for signal processing of complex shape. Theory and practice. Kiev: Nauk. Dumka, 2008. 333 p (in Russian).
2. Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. Computer diagnostics using complex-form signals under conditions of internal and external disturbances. *Reports of the NAS of Ukraine*. 2013. № 12. P. 36–44 (in Russian).
3. Technology. *Soviet Encyclopedic Dictionary*. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1988. P. 1330 (in Russian).
4. Fainzilberg L.S. Intelligent features and development prospects of fazagraphy — information technology processing complex shape signals. *Kibernetika i vychislitelnaâ tehnika*. 2016. Iss. 186. P. 56–77 (in Russian).
5. Fainzilberg L.S. Computer diagnostics by phase portrait of electrocardiogram. Kiev: Os- vita Ukrainy, 2013. 191 p. (in Russian).

6. Fainzilberg L.S. Tool system for experimental evaluation of the effectiveness of processing algorithms for signals of complex shape. *Control systems and machines*. 2008. Vol. 2. P. 3–12, 53 (in Russian).
7. Zenkin A.A. Cognitive Computer Graphics. Moscow: Nauka, 1991. 192 p. (in Russian).
8. Fainzilberg L.S. Nowa metoda interpretacji zapisu EKG w balaniach skriningowych oraz w opiece domowej. *Zdrowie publiczne (Public Health)*. 2005. Vol. 115. № 4. P. 458–464.
9. Fainzilberg L.S., Glushauskene G.A. Narrow-band Rejection Filter for Suppression of Harmonic Concentrated Interference on the Basis of Discrete Fourier Transform. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2009. Vol. 41. Iss. 8. P. 55–70.
10. Fainzilberg L.S. Adaptive smoothing of noise in information technology processing of physiological signals. *Mathematical Machines and Systems*. 2002. № 3. P. 96–104. (in Russian).
11. Fainzilberg L.S. Restoration of a standard sample of cyclic waveforms with the use of the Hausdorff metric in a phase space. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2003. № 3. P. 20–28 (in Russian).
12. Minzer O.P. Theory and practice of evidence-based medicine. *Diagnosis and treatment*. 2004. № 3. P. 7–15 (in Russian).
13. Fainzilberg L.S. FASEGRAPH® — efficient information technology of ECG processing in the problem of ischemic cardiac disease screening. *Clinical Informatics and Telemedicine*. 2010. Vol. 6. Iss. 7. P. 22–30 (in Russian).
14. Schijvenaars B.J.A., Van Herpen G., Kors J.A. Intraindividual variability in electrocardiograms. *Journal of Electrocardiology*. 2008. Vol. 41. Iss. 3. P. 190–196.
15. 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. № 34. P. 92–104 (in Russian).
16. Method for verification of metrological characteristics of digital electrocardiographs: UA Patent 100330:MIK G01 D21/00. № a 2011 11909, Bul. № 23. P. 6. 2012 (in Ukrainian).
17. Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. Personified digital medicine tools — step to health. *Herald of the NAS of Ukraine*. 2012. № 8. P. 62–70 (in Ukrainian).
18. Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. FASEGRAPH® — information technology for the integrated assessment of the cardiovascular system state of the electrocardiogram phase portrait. *Information technologies for the Physician*. 2013. № 3. P. 52–63 (in Russian).
19. Vasetsky Y.M., Fainzilberg L.S., Chaikovsky I.A. Methods of structure analysis of current distribution in conducting medium for magnetocardiography. *Electronic modeling*. 2004. № 3. P. 95–115 (in Russian).
20. Fainzilberg L.S. Diagnostics of object state by phase trajectories of observed signals with locally concentrated features. *Problems of Control and Informatics*. 2004. № 2. P. 56–67 (in Russian).
21. Fainzilberg L.S., Kondratyuk T.V., Semerhey N.A. ANTISTRESS — A New Information Technology for the Management of Regulatory Systems of a Human Body Based on the Biofeedback. *Control systems and machines*. 2011. № 3. P. 62–72 (in Russian).
22. Fainzilberg L.S., Korchynska Z.A., Semerhey M.O. Program-technical complex for study of a new method for biometric identification by phase portrait of electrocardiogram. *Forensic Herald*. 2015. № 1(23). P. 63–71 (in Ukrainian).

Recieved 22.12.2016

Л.С. Файнзильберг, д-р техн. наук, доцент, головний наук. співроб.

від. автоматизованих систем обробки даних

e-mail: fainzilberg@voliacable.com

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій

і систем НАН України та МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40,

м. Київ, 03680 ГСП, Україна

## ІНТЕРАКТИВНИЙ СИНТЕЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ З ЛОКАЛІЗОВАНОЮ ІНФОРМАЦІЄЮ

Розроблено узагальнену модель інтелектуальної інформаційної технології аналізу та інтерпретації сигналів складної форми. Запропоновано архітектуру інструментальної системи, що забезпечує інтерактивний синтез таких технологій. Ядро системи побудовано на двох абстрактних класах — узагальненій моделі носія даних (МНД) і узагальненій моделі оброблення даних (МОД), на базі спадкоємців яких створено широкий набір інтелектуальних засобів одержання діагностичної інформації з сигналів, які спостерігаються в умовах внутрішніх і зовнішніх збурень.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, сигнали складної форми, інструментальна система

L.S. Fainzilberg, Doctor of Engineering, Associate Professor (Docent),

Chief Researcher of Data Processing Department

e-mail: fainzilberg@voliacable.com

International Research and Training Center for Information Technologies and Systems

of the NAS of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine,

av. Acad. Glushkova, 40, Kiev, 03680, Ukraine

## INTERACTIVE SYNTHESIS OF INFORMATION TECHNOLOGY SIGNALPROCESSING WITH LOCALIZED INFORMATION

*Introduction.* Current task that inevitably arises before the designer of information technology (IT) signal processing with localized information — selection and setup of intelligent computational procedures to ensure an effective transition from the signal distorted by internal and external perturbations to the information products targeted at specific user.

The purpose of the article is to summarize the experience in the development of IT applications for the analysis and interpretation of the signals with localized information using an open tool for the expansion of the instrumental system.

*Methods.* On the basis of the object-oriented approach and IT tasks analysis, focused on the extraction of diagnostic information from the distorted signal with a locally-focused features, held decomposition of the general problem of applied IT synthesis in different applications.

*Results.* Generalized model of IT analysis and signals of complex shape interpretation has been developed. The development system architecture is proposed, the core of which is based on two abstract classes — a data carrier generalized model (DCM) and the generalized data processing model (DPM).

On the basis of the heirs of these classes set up a set of basic computational component, ensuring the recovery of the useful signal monitoring in terms of internal and external disturbances, detection of informative reconstructed signal fragments, analysis of amplitude-time parameters (diagnostic indicators), focusing on the detected fragments and implementation of diagnostic rules, provides an assessment of the state of the object by the calculated characteristics.

Methodology of the experiments *evidence* with elements of the deductive approach, which is demonstrated by the example of the original evaluation index electrocardiogram is proposed.

*Conclusions.* The developed instrumental system allows to accelerate the development of the new IT processing of complex shape signals and to improve its effectiveness.

Examples of the successful synthesis of applied information technologies for processing signals with localized information created using the developed instrumental system are given.

**Keywords:** *information technology, complex shape signals, instrumental system.*

# Интеллектуальное управление и системы

---

УДК 681.513

**В.В. ПАВЛОВ**, д-р техн. наук, проф.

**Ю.М. ШЕПЕТУХА**, канд. техн. наук, старш. науч. сотр,  
старш. науч. сотр. отд. интеллектуального управления  
e-mail: yshep@meta.ua

**С.В. МЕЛЬНИКОВ**, канд. техн. наук, старш. науч. сотр.,  
и.о. зав. отд. интеллектуального управления  
e-mail: dep185@irtc.org.ua

**А.Е. ВОЛКОВ**, науч. сотр. отд. интеллектуального управления  
e-mail: alexvolk@ukr.net

Международный научно-учебный центр информационных  
технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,  
пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, Украина

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ: ПОДХОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

---

*Рассмотрены текущее состояние и перспективы будущего развития нового научного направления — интеллектуального управления. Среди основных теоретических и прикладных результатов в данной предметной области можно указать разработку технологий и алгоритмов управления скоростными динамическими процессами в распределённой компьютерной среде, структуризацию моделей формирования хаотического поведения системы, создание методов улучшения качества обмена данными между компонентами сетецентрической системы.*

**Ключевые слова:** интеллектуальное управление, эргатическая система, теория конфликтов, нелинейность, неопределенность, сетецентричность.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сфера использования информационных технологий непрерывно расширяется. Системы интеллектуального управления представляют собой новый класс компьютеризованных систем, которые имеют целью моделирование и анализ интеллектуальных задач, а также поддержку деятельности человека по их решению. Повышенная сложность систем интеллектуального управления определяется во-первых, сложностью анализа поведения существенно нелинейных объектов управления и, во-вторых, сложностью синтеза алгоритмов управления такими объектами. Дополнительным фактором сложности является взаимодействие человека с компьюте-

В.В. ПАВЛОВ, Ю.М. ШЕПЕТУХА, С.В. МЕЛЬНИКОВ, А.Е. ВОЛКОВ, 2017

ризованными средствами управления. Поэтому исследование концептуальных и прикладных аспектов создания подобных систем, а также факторов, определяющих их эффективное и надежное функционирование, представляет собой важную и актуальную научно-техническую проблему.

Основной целью интеллектуализации является обеспечение возможности управления адаптируемыми системами в динамически изменяющейся среде при обеспечении необходимых показателей качества, быстродействия и устойчивости. Для достижения этой цели необходимо усовершенствование существующих и создание новых подходов, концепций, технологий, методов и моделей интеллектуального управления сложными объектами и процессами в различных предметных областях.

**Цель статьи** — рассмотрение текущего состояния и перспектив будущего развития нового научного направления — интеллектуального управления. Указываются основные теоретические и прикладные результаты в данной предметной области, а именно: разработка технологий и алгоритмов управления скоростными динамическими процессами в распределённой компьютерной среде, структуризация моделей формирования хаотического поведения системы, создание методов улучшения качества обмена данными между компонентами сетецентрической системы.

## **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЮ**

На основе анализа концептуальных подходов к определению исследовательской области, охватываемой интеллектуальным управлением, и, соответственно, формулировок данного термина, можно выделить две основные научные школы. Первая рассматривает интеллектуальное управление как одно из направлений развития теории искусственного интеллекта. По мнению сторонников данного подхода [1], составляющими интеллектуального управления являются такие научные области, как нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы и эволюционное программирование. В работе [2] приводится определение интеллектуального управления как применение методов искусственного интеллекта для управления объектами различной физической природы.

Вторая научная школа рассматривает интеллектуальное управление как естественное развитие традиционной теории управления. Так, Комитетом по интеллектуальному управлению Института инженеров электротехники и электроники (Нью-Йорк, США) — IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) была создана специальная рабочая группа с задачей сформулировать наиболее подходящее определение термина «интеллектуальное управление». Наибольший интерес представляют следующие предложенные ею концептуальные положения интеллектуального управления [3]. Прежде всего, была констатирована невозможность на данном этапе развития науки точного и полного определения терминов «интеллект» и «интеллектуальность». В качестве альтернативы предлагается рассмотреть некоторые характеристики, присущие интеллекту и интеллектуальным системам, которые могут оказаться полезными при анализе сложных процессов управления. При этом под традиционными или обычными система-



ми управления понимают системы, поведение которых описывается набором дифференциальных или разностных уравнений. Для интеллектуального управления, в отличие от традиционного, не существует четкой границы между объектом управления и управляющим устройством. Поэтому законы управления могут взаимодействовать с объектом управления и даже модифицировать его.

Интеллектуальное управление в большинстве случаев должно осуществляться в условиях не точно определенной или не полностью сформулированной задачи — т.е. предполагается возможность уточнения формулировки непосредственно во время функционирования системы. Механизмы адаптации к широкому разнообразию внешних условий являются необходимым фактором для успешного функционирования систем интеллектуального управления. Термин «управление» при интеллектуальном управлении имеет более общее значение, чем при традиционном управлении, т.е. включает процессы диагностики ситуации, планирования действий, принятия решений и т.д.

Участниками рабочей группы были отмечены еще несколько представляющих интерес положений. Интеллектуальные системы должны обладать способностью эффективно функционировать в условиях неопределенности. Для этого они должны имитировать осмысленное поведение человека — понимать особенности внешней среды, планировать действия, принимать решения, осуществлять их и контролировать полученные результаты [4]. Важной характеристикой интеллектуальных систем управления является их способность к автономному формулированию своих целей и автономным действиям по их достижению [5]. При интеллектуальном управлении, в отличие от традиционного, первостепенное значение имеет решение проблемы вычислительной сложности используемых алгоритмов. Для того, чтобы успешно справляться с проблемой сложности, интеллектуальные системы управления должны иметь соответствующую иерархическую функциональную структуру, позволяющую осуществлять эффективный анализ и оценивание используемых стратегий управления [6].

Отсутствие общепринятого определения для термина «интеллект» отмечалось также Американской ассоциацией по искусственному интеллекту [7]. При этом подчеркивалась важность такого атрибута искусственного интеллекта, как автономно функционирующий «интеллектуальный агент». В работе [8] приводится определение интеллектуального агента как системы, использующей либо методологию логического вывода, либо сложную вычислительную методологию для решения набора задач, представляющих интерес для пользователя. Одним из наиболее интересных направлений будущих исследований был назван анализ и синтез взаимосвязей между целедостигающими действиями интеллектуального агента и процессами его адаптации к изменениям во внешней среде.

Следует отметить, что до настоящего времени не сформировано общее мнение относительно того, каким образом наиболее целесообразно создавать интеллектуальные системы — «снизу вверх» или «сверху вниз». Поэтому, наряду с разработкой теоретических и прикладных вопросов создания различных типов интеллектуальных агентов [9], предпринимаются

также попытки выработки концептуальных основ построения целостной интеллектуальной инфраструктуры в различных предметных областях. Высказывается мнение, что интеллектуальная инфраструктура XXI столетия должна удовлетворять таким основным требованиям, как возможность ее расширения при увеличении числа пользователей, способность успешно функционировать при использовании различных технологий и протоколов, адаптируемость к новым тенденциям в предметной области, доступность и безопасность [10]. Независимо от используемого подхода к построению интеллектуальных систем, большинство исследователей отмечают тенденцию к все более широкому их использованию. Подчеркивается такая особенность интеллектуального управления, как существенное увеличение числа решаемых в его рамках проблем — за счет использования процедур распознавания образов, планирования действий, а также других интеллектуальных функций [11].

В области разработки интеллектуальных систем достаточно активно развиваются следующие научные направления:

- управление с использованием элементов искусственного интеллекта;
- управление на основе нечеткой логики;
- генетические и эволюционные алгоритмы управления;
- интеллектуальные агенты и мультиагентские системы;
- экспертные и основанные на знаниях системы;
- машинные алгоритмы обучения;
- управление на основе нейронных сетей;
- планирующие системы [12].

Таким образом, прослеживается тенденция к интеграции исследований представителей двух вышеуказанных научных школ.

Представляет интерес следующее определение интеллектуального управления: «разумная деятельность человека, связанная с решением задач познания, понимания, рассуждения и осуществления необходимого взаимодействия с объектом» [13, с.10]. В данном определении, на наш взгляд, нашли отражение три существенных аспекта, характеризующих процесс интеллектуального управления и соответствующих современным тенденциям исследований в данной области. Во-первых, подчеркивается роль человека как основного интегрирующего и системообразующего элемента процесса управления. Во-вторых, делается акцент именно на том типе деятельности, который направлен на решение задач и проблемных ситуаций. И, в-третьих, четко артикулируется принципиальная важность процессов познания, понимания, рассуждения, т.е. механизмов формирования знаний как о состоянии окружающей среды, так и о свойствах объекта управления. Современные аналитики, развивая данное положение, указывают, что для формулирования, структурирования и решения проблемы необходимо понимание объема и структуры знаний, приобретенных человеком в процессе его деятельности [14]. Таким образом, в настоящее время именно процессы формирования знаний и их использования для принятия решений в сложных динамических средах рассматриваются как основа создания эффективных систем управления.

## **СОЗДАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Процесс интеллектуальной деятельности человека будем рассматривать как последовательность решения задач, направленных на обеспечение целедостигающего поведения системы даже в условиях неопределенности и конфликта. Отметим, что именно набор целей системы в значительной степени определяет ее структурную организацию, которая должна давать возможность достижения поставленных целей при обеспечении стабильности функциональных поведений в сложной и зачастую конфликтной внешней среде.

Организмическая концепция построения целедостигающих эргатических систем требует, чтобы взаимодействие пользователя с системой строилось на тех же принципах, что и общение между людьми [15, 16]. В соответствии с данной концепцией, принципиальные свойства таких систем определяются совокупностью основных организмических принципов, а именно принципов функционального гомеостаза, активности, стационарности, наименьшего взаимодействия, автономности. Их реализация обеспечивает гибкую структуру самоуравновешивания всего набора целей и средств их достижения по основному критерию функциональной целостности. Подобное целостное рассмотрение задач управления может служить основой как для их начального структурирования, так и для последующего моделирования и оптимизации структурных и функциональных решений.

Современные подходы к организации управления сложными системами требуют обеспечения их целостности и организованности даже при наличии конфликтных и быстро меняющихся ситуаций. Поэтому только совместное рассмотрение и анализ взаимосвязей объекта, среды и целевых установок человека может служить основой построения эффективных систем. Отметим, что сочетание таких свойств целостной структуры, как ограниченность в пространстве и неограниченность во времени, привело к возникновению явления аттракции, когда основой обеспечения целостности является непрерывное движение. При этом **странные аттракторы** целесообразно рассматривать как некие «особые множества», являющиеся обобщением понятия особых точек динамических систем [17]. Такой эффект изменения фазового состояния может явиться источником возникновения хаоса как при сосредоточенной, так и при распределенной реализации динамической системы. Исследование возникающих при этом хаотических процессов также во многих случаях целесообразно производить с позиций теории инвариантности и автономности.

В настоящее время функционирование сложных систем управления все в большей степени ориентируется на активный диалог с человеком, реализующим управление. Поэтому в процессе создания систем возникает необходимость обеспечения эффективного обмена информацией между человеком и техническими средствами. Следует отметить, что до настоящего времени не найдено оптимальное сочетание различных форм коммуникативного взаимодействия человека с техническими устройствами в общем случае. Однако учет организмических принципов дает возможность структурировать человеко-машинный диалог таким образом, чтобы в максимальной степени использовать сильные стороны как человека, так и компьютеризован-

ных технических средств, что особенно ярко проявилось при разработке ряда систем обеспечения безопасности движения динамических объектов.

Система управления безопасным движением динамических объектов по своей сути является эргатической системой, для успешной работы которой необходим правильный и всесторонний учет «человеческого фактора». Специфической особенностью задачи управления движением динамических объектов в конфликтной обстановке является тот факт, что даже единичные случаи принятия ошибочных решений могут привести к очень тяжелым последствиям. Практика показывает, что ошибочные действия обычно имеют место быть как в сложной навигационной обстановке, так и в условиях дефицита времени. В подобных случаях, даже при использовании мощных современных компьютеров, невозможно решить задачу путем простого перебора всех возможных альтернативных вариантов действий в реальном масштабе времени. А навигационный конфликт, как правило, требуется разрешить достаточно быстро, за промежуток времени, определяемый спецификой данной конкретной ситуации. Поэтому интеллектуальные системы разрешения навигационных конфликтов должны обеспечивать их надлежащее быстроедействие даже в исключительно сложных ситуациях.

Одним из подходов к решению задач интеллектуального управления движением динамических объектов в условиях неопределенности и конфликта является построение различных типов внутренних и внешних **информационных образов** конфликтной ситуации. Отметим, что важной составной частью создания концептуальных и математических основ интеллектуального управления является разработка методов образного управления сложными динамическими объектами и процессами. В рамках данного подхода были исследованы принципы организации человеко-машинных систем образного управления и создана технология построения оптимально сбалансированных по внутренней и внешней среде систем различного уровня сложности. Эта технология, в частности, была применена при создании систем образного управления морскими транспортными средствами в сложных навигационных условиях и критических режимах функционирования [18].

## **ОСНОВНЫЕ ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ОБЛАСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Можно выделить два основных направления в данной области, в которых за последние годы были получены заслуживающие внимания прикладные результаты. Первое направление, которое можно отнести к созданию инфраструктуры интеллектуального направления, включает разработку методов и структур распределенного управления и передачи данных в компьютерных сетях, а также исследование нелинейных прикладных процессов в объектах управления с изменяющимися характеристиками. Второе направление, которое можно отнести к созданию интеллектуальных агентов различного назначения, включает разработку методов, моделей и алгоритмов принятия и реализации в реальном времени решений по управлению динамическими объектами в условиях неопределенности и конфликта.

Среди результатов первого направления следует отметить создание метода сетцентрического управления в распределённой компьютерно-

коммуникационной среде в реальном масштабе времени с использованием скоростных циклов динамических прикладных процессов. В данном случае достижение целей управления обеспечивается за счет генерации набора таких виртуальных циклов, которые позволяют компенсировать возможные потери пакетов данных, повысить степень синхронизации информационных потоков при высоких значениях временных задержек, а также устранить конфликты, возникающие при формировании и реализации команд сетецентрического управления. В рамках этого подхода были разработаны и исследованы такие сетевые структуры и алгоритмы управления скоростными динамическими процессами, которые позволяют существенно улучшить качество и устойчивость процесса управления. Полученные результаты были, в частности, защищены международным патентом [19].

В рамках данного направления были исследованы подходы к интеллектуализации взаимодействия распределенных компонентов сетецентрических систем, а также проанализированы используемые в настоящее время методы и алгоритмы передачи данных в сети. Выявлен такой их общий недостаток, как значительное превышение допустимых для нормального функционирования уровней задержек, потерь и искажений передаваемых данных. В ходе анализа было также показано, что существенные задержки передачи данных вызывают феномен «перезапроса», т.е. пакеты данных передаются не однократно, а с постоянными повторами. Для оценки качества коммуникационного процесса производился анализ скорости и среднего времени задержки передачи данных в сети с учетом таких параметров, как скорость модуляции, кодовая скорость, длина блока данных, время распространения сигналов по каналу, показатель группирования ошибок, вероятность сбоя, интенсивность устойчивых отказов, среднее время восстановления после отказа. Была предложена показанная на рис. 1 структурная организация системы моделирования передачи данных, включающая новый элемент — модель цифрового канала связи, что позволяет исследовать эффективность и надежность коммуникационного процесса в целом, а также формировать алгоритмы улучшения параметров передачи данных.

Первое направление исследований также включало анализ основных типов нелинейных закономерностей и определение способов эффективного использования нелинейного технологического ресурса системы с точки зрения системной сложности, сходимости, учета возможных диапазонов начальных условий. Для реализации всех заложенных в конструкции объекта управления потенциальных возможностей необходимо использование методологии критических технологий, предполагающей выявление и исследование критических точек, а также точек бифуркации и формирования странных аттракторов. При этом, анализ поведения нелинейных процессов вдали от точек устойчивости является настолько сложным, что обычно осуществляется лишь для низких степеней соответствующих полиномов и малых размерностей системы уравнений — наиболее часто три уравнения первого порядка с не более чем вторая степень полиномов в правой части уравнений [13]. Поэтому важным является структурирование типов порождающих хаотические процессы систем нелинейных уравнений на классы и типы, а также осознание сути происходящих процессов — с целью предотвращения неконтролируемого размножения критических точек.

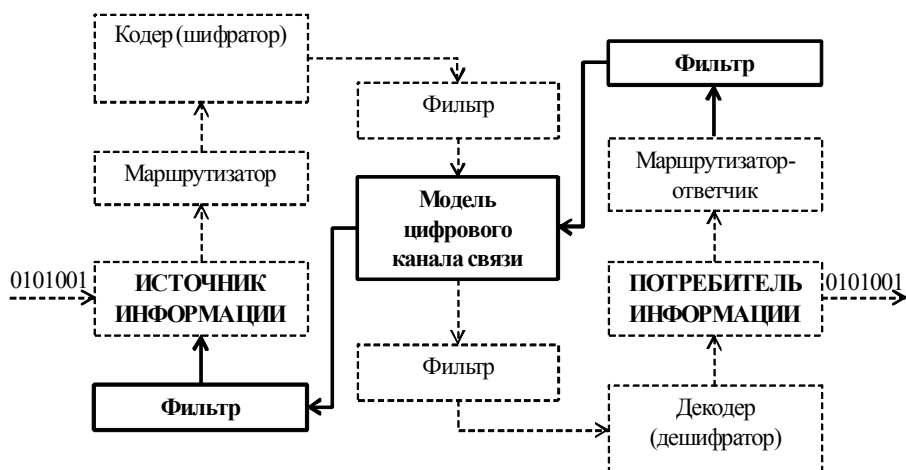


Рис. 1. Предлагаемая структурная организация системы моделирования передачи данных

В общем случае данная система описывается следующим набором уравнений:

$$\begin{aligned}
 dx_1 / dt &= f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n), \\
 dx_2 / dt &= f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n), \\
 &\dots\dots\dots \\
 dx_m / dt &= f_m(t, x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $t$  — время;  $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n$  — переменные состояния системы;  $f_1, f_2, \dots, f_m$  — ограниченные кусочно-непрерывные функции с ограниченными частными производными по  $x_j, j=1, 2, \dots, n$ .

Следует отметить, что данная система дифференциальных уравнений принципиально не решается в квадратурах, т.е. невозможно получить ее общее решение в виде аналитических выражений и неопределенных интегралов. Большинство разработанных до настоящего времени аналитических методов построения интегралов системы (1) основаны на том или ином подходе к линеаризации нелинейных по своей сути процессов. Однако, как показано в [13] при этом существенным образом недоиспользуются имеющиеся потенциальные возможности объекта управления, т.к. вместо алгоритмизации процесса управления во всем диапазоне состояний объекта  $\{X = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n) \in Q_X\}$  и диапазоне возможных управлений  $\{U = (u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n) \in Q_U\}$  ограничиваются суженными множествами  $Q_X^* \subset Q_X, Q_U^* \subset Q_U$ , в которых используемая линейная модель процесса является достаточно адекватной.

Основная особенность системы дифференциальных уравнений как моделей динамических процессов состоит в том, что они представляют собой внешнюю формальную оболочку, за которой в определенной степени скрываются функциональные свойства процесса [13]. Поэтому

актуальной новой проблемой интеллектуального управления является выявление структуры, содержания и контекста функциональных свойств реальных нелинейных процессов и создание на этой основе базы знаний наиболее существенных системных свойств таких процессов. Элементы такой базы знаний представляют собой некоторые «срезы знаний», характеризующие те или иные подмножества всего множества функциональных свойств нелинейных процессов. Такие элементы могут, например, представлять собой полученные в результате компьютерного моделирования графические образы поведения системы в виде фазовых траекторий. При этом особый интерес представляет собой выявление и исследование особых состояний и движений, включая критические, бифуркационные и хаотические. Эти графические представления в системном смысле представляют собой двухмерные фазовые портреты  $n$ -мерных фазовых скульптур процесса. Значение их состоит в том, что они дают инструмент исследования качественных свойств топологических образов нелинейных процессов.

Сложность исследования критических явлений в многомерных системах может быть значительно уменьшена при использовании методологии инвариантности и автономности нелинейных процессов. При использовании данного подхода система существенно нелинейных дифференциальных уравнений (1), характеризующаяся потенциально возможными точками бифуркации и формирования странных аттракторов, преобразуется в совокупность двух систем:

$$\begin{aligned} dy_1 / dt &= f_{y1}(t, y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n, z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n, u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n), \\ dy_2 / dt &= f_{y2}(t, y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n, z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n, u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n), \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} dy_m / dt &= f_{ym}(t, y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n, z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n, u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n), \\ dz_1 / dt &= f_{z1}(t, y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n, z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n, u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n), \\ dz_2 / dt &= f_{z2}(t, y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n, z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n, u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n), \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (3)$$

$$dz_m / dt = f_{zm}(t, y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n, z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n, u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n),$$

где  $t$  — время;  $y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n$  — выходные переменные системы;  $z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n$  — произвольные внешние переменные;  $u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n$  — управляющие переменные  $f_{y1}, f_{y2}, \dots, f_{ym}, f_{z1}, f_{z2}, \dots, f_{zm}$  — ограниченные кусочно-непрерывные функции с ограниченными частными производными по  $x_j, z_j, j = 1, 2, \dots, n$ .

Далее, используя предложенную в ряде работ В.В. Павлова [15, 16, 17] методологию анализа критических явлений в многомерных процессах, системы уравнений (2) и (3) целесообразно преобразовать в системы виртуальных автономных процессов с соответствующими виртуальными автономными координатами  $\{p_{y1}, p_{y2}, \dots, p_{yj}, \dots, p_{ym}\}$  и  $\{p_{z1}, p_{z2}, \dots, p_{zj}, \dots, p_{zn}\}$ .

После этого принципиально возможным становится автономное исследование на критичность совокупности функций  $f_{y1}, f_{y2}, \dots, f_{ym}$  и  $f_{z1}, f_{z2}, \dots, f_{zm}$  в рамках теории инвариантности, которая была предложена для синтеза систем управления многомерным объектом. Так, при приложении к системам (2) и (3) векторов малых возмущений и рассмотрении каждой из возмущаемых систем по отдельности, могут быть получены критические множества для каждой из автономных систем  $Q_{y1, y2, \dots, ym}^*$  и  $Q_{z1, z2, \dots, zn}^*$ , а также интегральное критическое множество  $Q_{\Sigma}^* = Q_{y1, y2, \dots, ym}^* \cup Q_{z1, z2, \dots, zn}^*$ . При использовании данной концепции важным является то, что одна и та же процедура может использоваться как для анализа многомерной нелинейной системы на существование критических областей различного типа, так и для синтеза функций инвариантного автономного управления  $u(y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n, z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n, p_{y1}, p_{y2}, \dots, p_{yp}, \dots, p_{ym}, p_{z1}, p_{z2}, \dots, p_{zp}, \dots, p_{zn})$  в соответствии с функциональными уравнениями абсолютной инвариантности.

Так, например, для системы Лоренца функциональные уравнения абсолютной автономности для наиболее простого линейного случая имеют вид:

$$dX/dt = p_X, \quad dY/dt = p_Y, \quad dZ/dt = p_Z; \quad p_X, p_Y, p_Z \in P_{XYZ}(X, Y, Z)$$

где  $P_{XYZ}(X, Y, Z)$  представляет собой образ управляющей функции в пространстве конусов над трехмерным пространством  $(X, Y, Z)$ . Критические точки для данной системы находятся решением системы алгебраических уравнений вида

$$a(x - y) = 0; \quad x(b - z) - y = 0; \quad xy - cz = 0.$$

Необходимо отметить, что в общем случае область  $Q_{\Sigma}^*$  имеет сложную конфигурацию, при этом в каждой точке данной области реализуются соответствующие операции воздействия на элементы  $p_i$ . В результате данной операции симметричные фазовые ячейки  $\Delta p_i(t_0)$  могут преобразовываться в ячейки  $\Delta p_i(t_0 + T)$  достаточно сложной конфигурации, но с площадью, равной площади первоначальной ячейки [17]. При этом за счет пространственно-временной неопределенности  $(\varepsilon, \Delta T)$  операторных преобразований, производимых каждой элементарной ячейкой системы, может допускаться отклонение на величину  $\varepsilon$  от первоначальной фазовой траектории. Важным моментом является то, что целостная динамическая система формирует хаотические процессы с вполне определенной топологией, характеризующейся наличием «странных аттракторов». Тогда важным вопросом исследования и классификации «странных аттракторов» является выделение их типичных видов. В работе [17] в качестве элементарных рассматриваются аттрактор Лоренца и тороидальный аттрактор. Важным вопросом дальнейших исследований в данной области является формирование расширенного списка элементарных аттракторов, на базе которых может быть сформирована базовая структура конфигурации точек бифуркации для странного аттрактора любого вида.



Необходимо отметить, что многие наиболее интересные типы аттракторов порождаются системами нелинейных дифференциальных уравнений с полиномиальными правыми частями. Причиной этого является то, что в подобном виде может быть представлена любая гладкая нелинейная характеристика объекта управления.

Для анализа свойства притяжения — отталкивания конкретных типов аттракторов целесообразно использовать метод показателей Ляпунова. Эти показатели фактически являются количественной мерой интенсивности хаотических явлений. Так, для одномерного разностного уравнения, показатель Ляпунова может быть определен по формуле:

$$L_1 = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \ln \frac{\left| f^{(r)}(x_0 + \gamma) - f^{(r)}(x_0) \right|}{\gamma},$$

где  $f^{(r)}$  —  $r$ -итерация разностного уравнения,  $\gamma > 0$  — прилагаемое к системе малое возмущение. При  $\gamma \rightarrow 0$  вышеприведенное выражение может быть переписано в виде:  $L_1 = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m \ln |f'(x_i)|$ . В случае систем высокой размерности, фактическая траектория на хаотическом аттракторе определяется значением наибольшего из показателей Ляпунова  $L_{\max}$ . При этом фиксированные точки характеризуются значениями  $L_{\max} < 0$ , ограниченные циклы — значениями  $L_{\max} = 0$ , а хаотическое поведение характеризуется значениями  $L_{\max} > 0$ .

В рамках второго направления предложены подходы к повышению уровня интеллектуализации систем управления движением летательных аппаратов и морских судов в конфликтных ситуациях. Для достижения этой цели были, в частности, разработаны алгоритмы определения приоритетов взаимодействующих летательных аппаратов и расчета оценочного значения оптимизационного функционала для возможных маневров расхождения. Данные алгоритмы основаны на анализе основных полетных характеристик конфликтующих объектов (скорость, вес, угол атаки, ускорение) и позволяют принять обоснованное решение о выборе того летательного аппарата, который обладает наибольшими возможностями для выполнения маневра расхождения. Определение параметров необходимого маневра осуществляется с помощью построения областей управляемости и графического представления управляющих характеристик для каждого из взаимодействующих объектов. Решение этой задачи производится на основе разработанных алгоритмов расчета таких аэродинамических характеристик летательного аппарата, как элементы траекторного управления ( $\theta, \psi, \delta$ ), кинематического управления ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) и аэродинамического управления ( $\delta_1, \delta_2$ ), где  $\theta$  — наклон траектории,  $\psi$  — курс,  $\delta$  — отклонение рычага управления двигателем;  $\alpha$  и  $\beta$  — углы атаки и скольжения соответственно,  $\gamma$  — крен,  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — отклонения предкрылок и закрылок соответственно.

Также был предложен новый метод генерации виртуальных криволинейных глиссид посадочного снижения летательных аппаратов по предельным траекториям, обеспечивающий наиболее эффективное расходование имеющихся ресурсов. В его основу положена идея объединения стадий снижения и планирования, что приводит к существенному Сокращению дистанции и высоты для этапов выравнивания и выдерживания. При этом учитываются координаты и характеристики точки посадки, параметры текущего состояния летательного аппарата и окружающей среды, а также расчетные области управляемости. Полная расчетная функция управления  $u(t)$  состоит из программной составляющей  $u^*(t)$ , реализующей требуемое невозмущенное движение летательного аппарата, и стабилизирующей составляющей  $\Delta u(t)$ , компенсирующей его возмущенное движение. Применение данного подхода позволяет повысить экологичность и экономичность полетов, а также существенно разгрузить воздушную зону ожидания в зоне аэропортов.

В рамках интеллектуализации систем управления движением морских судов в сложной навигационной обстановке и при условиях дефицита времени и информации предложены методы структурирования, интеграции и отображения существенных элементов внешних и внутренних конфликтов. Данные методы и разработанные на их основе алгоритмы производят автоматическое разбиение исходного множества  $S_0$  ситуаций на конечное число непересекающихся подмножеств  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_m$ , являющихся образами подмножеств опорных стратегий  $C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, \dots, C_{Bm}$ . Сформированные опорные стратегии могут включать такие альтернативы, как, например, сохранение первоначальных параметров ситуации, определение целесообразности различных видов маневров, ранжирование уровней привилегированности взаимодействующих судов в условиях неполноты информации и противоречивости критериев оценки, расчет характеристик маневрирования, формирование траектории возврата к исходным параметрам движения. При этом внутри каждой из базовых ситуаций действуют одинаковые типы стратегий анализа ситуации и генерации эффективных способов действия. Далее предлагается использовать процедуру последовательного сужения сгенерированного ранее множества альтернатив. Исходное множество альтернатив сужается вначале до множества допустимых альтернатив  $A_R$ , удовлетворяющих заданным в формализованном виде ограничениям, а затем до множества недоминируемых по Парето альтернатив  $A_E$ . Следует отметить, что алгоритмы разбиения исходного множества на классы эквивалентности и способы формирования отношений упорядоченности на соответствующих фактор-множествах обладают достаточной гибкостью. Благодаря этому обеспечиваются возможности не только для адаптации при изменении характеристик конкретной конфликтной ситуации, но и для модификации решений при изменении целей системы.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ БУДУЩЕГО РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

В настоящее время наблюдается более быстрое развитие ресурсной базы современных и проектируемых технологических средств по сравнению с адекватной им концептуальной и алгоритмической основой [13]. Но только сегодня ставится задача эффективного управления нелинейным объектом с учетом свойств человека и компьютера. Поэтому первостепенное значение имеет разработка методов и моделей целостного интеллектуального управления, т.е. управления во всем возможном пространстве состояний при полном использовании нелинейного технологического ресурса системы.

На данном этапе развития интеллектуального управления наиболее перспективным направлением является создание специализированных систем, предназначенных для функционирования в сравнительно узких предметных областях. Другими словами, наиболее целесообразным является прагматический подход к разработке интеллектуальных систем, направленный на решение проблем и удовлетворение потребностей человека, возникающих в процессе его целедостигающей деятельности. Такие системы должны обладать способностью адаптации как к возможным изменениям во внешней среде, так и к возможным изменениям в структуре и параметрах самой системы управления. Целью подобной адаптации является обеспечение качества и устойчивости управления даже при наиболее неблагоприятных условиях.

Важным фактором эффективного функционирования интеллектуальных систем является надлежащий учет человеческого фактора, т.е. интересов, целей и возможностей работающих в составе таких систем людей. Именно участие человека в контуре управления позволяет придать системам такие свойства, как способность эффективно действовать в непредвиденных ситуациях, достаточная надежность работы в различных режимах, высокий уровень адаптации к изменениям в окружающей среде. Многие сложные проблемы невозможно описать и исследовать исключительно с помощью одних только математических моделей без использования знаний, опыта и суждений человека. Следовательно, при разработке интеллектуальной системы необходимо так организовать взаимодействие человека и компьютеризованных технических средств, чтобы максимально эффективным образом использовать положительные свойства этих двух компонентов целостной системы. Необходимо создание такой структуры, которая на основе интеграции человека и машины обеспечит понимание и решение возникающих проблем, где человек способен сформировать некоторый внутренний образ проблемы, отражающий ее наиболее характерные свойства. Данный образ проблемы может описываться в виде аналитических или структурных моделей, либо даже просто в вербальной форме. Тогда основной функцией целостной интеллектуальной системы является интеграция субъективных суждений человека (например, о существующих ограничениях на применение существующих моделей) и результатов математического моделирования задачи.

Исключительно важным вопросом является формирование стратегий целедостигающего поведения интеллектуальной системы в реальных условиях, т.е. при наличии ограниченности материальных ресурсов, дефицита

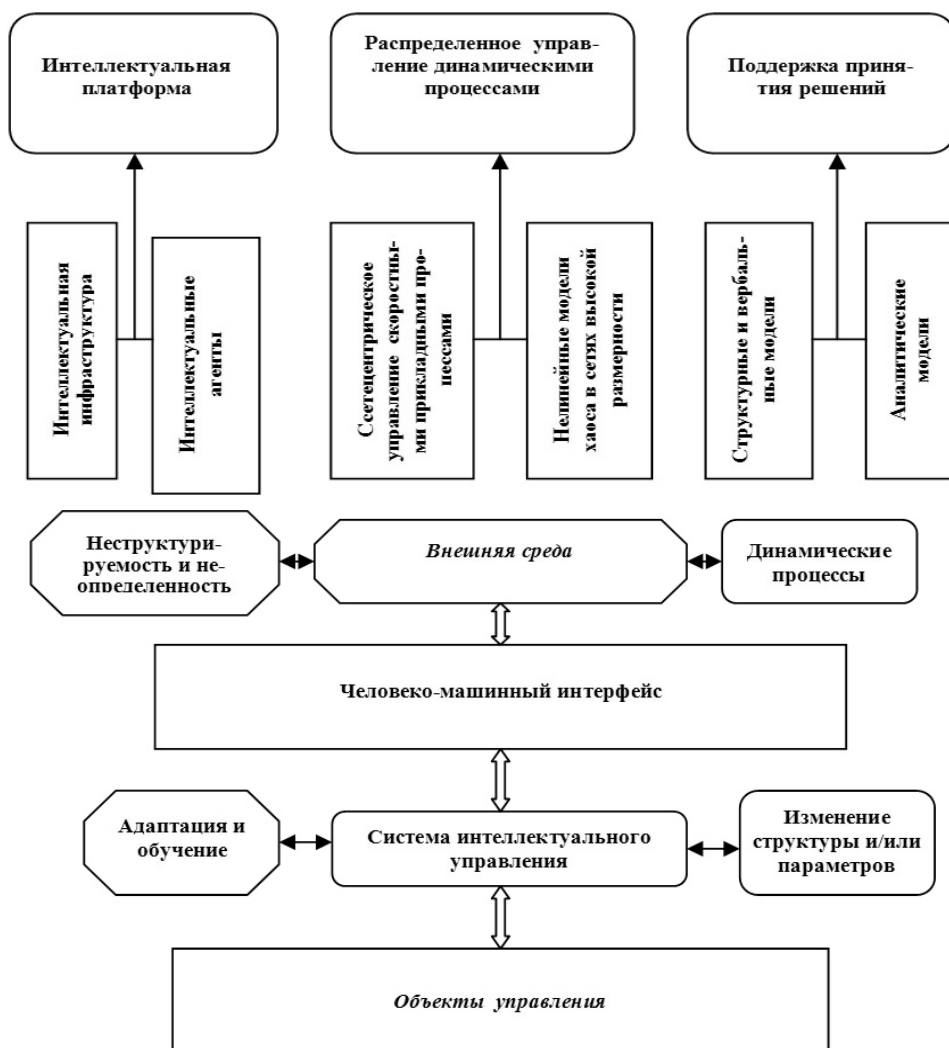


Рис. 2. Структура и компоненты системы интеллектуального управления

времени, а также неполноты используемой информации. Для обеспечения эффективных и своевременных действий в подобных ситуациях необходимо обеспечить высокое быстродействие систем разрешения конфликтов. В реальных ситуациях недостаток средств (в частности, альтернативных вариантов) на каждом отдельном этапе развития конфликта часто можно компенсировать темпом.

Актуализация способов поведения интеллектуальной системы в конфликтных ситуациях должна основываться на реализации процесса творческой деятельности человека, состоящего не в поиске пути в заданном лабиринте возможностей, а в порождении такого графа поведений, при котором с гарантированной надежностью может быть найдено эффективное решение данного конфликта. Подобная парадигма функционирования в конфликтной среде является отражением свойств этой среды, целей системы, а также методов порождения эффективных вариантов поиска возможных альтернатив.

Таким образом, наиболее многообещающими направлениями в области интеллектуального управления представляются следующие:

создание интеллектуальной инфраструктуры и интеллектуальных агентов, обеспечивающих возможность моделирования и исследования разумной деятельности человека в системах со специализированным и профессиональным интеллектом;

распределенное и сетевое управление критическими динамическими процессами на примере задач обеспечения безопасности движения транспортных средств в конфликтных ситуациях;

поддержка принятия решений в неструктурированных средах и в условиях существенной неопределенности;

разработка моделей человеко-машинного взаимодействия и алгоритмов информационной поддержки на различных этапах целедостигающего поведения интеллектуальной системы;

формирование целостных целевых образов динамических объектов, внешней среды и конфликтных ситуаций и их использование для принятия эффективных и своевременных решений;

реконфигурация структур динамических объектов в случаях отказов оборудования или его несанкционированного использования.

На рис. 2 показана предлагаемая структурная организация и компоненты системы интеллектуального управления. В соответствии с предлагаемым подходом, тремя основными составляющими такой системы являются: интеллектуальная платформа (включающая автономных интеллектуальных агентов на микроуровне и целостную интеллектуальную инфраструктуру на макроуровне), методы и алгоритмы распределенного управления скоростными и хаотическими нелинейными прикладными процессами, а также модели поддержки принятия решения при различных уровнях неопределенности проблемы. Отметим, что интеллектуальная система должна обладать способностью эффективно действовать во внешней среде не только не полностью определенной, но и постоянно меняющейся. При этом процессы адаптации и обучения системы должны учитывать как динамику внешней среды, так и возможности изменения параметров и/или структуры самой интеллектуальной системы.

## **ВЫВОДЫ**

Современные системы интеллектуального управления должны интегрировать в единое целое традиционную теорию управления, теорию искусственного интеллекта и теорию принятия решений. При этом важным фактором является преобразование концептуальных положений управления и общих принципов создания интеллектуальных систем в технологии и алгоритмы управления в конкретных предметных областях.

В работе представлены полученные результаты в таких важных направлениях, как создание методов сетецентрического управления с использованием скоростных циклов динамических прикладных процессов;

разработка алгоритмов определения областей управляемости, расчета маневров расхождения и генерации виртуальных криволинейных глиссид посадочного снижения летательных аппаратов;

исследование моделей формирования хаотических траекторий поведения системы;  
создание алгоритмов интеграции и отображения моделей конфликтов при взаимодействии морских судов;  
разработка методики моделирования и улучшения качества передачи данных в сети.

На данном этапе развития интеллектуального управления наиболее перспективным направлением является создание систем со специализированным интеллектом, обладающих способностью адаптации как к возможным изменениям во внешней среде, так и к модификациям характеристик управляющей системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zilouchian A., Jamshidi M. Intelligent control systems using soft computing methodologies. Boca Raton: CRC Press, 2001. 492 p. URL: [https://cdn.preterhuman.net/texts/science\\_and\\_technology/artificial\\_intelligence/Intelligent%20Control%20Systems%20Using%20Soft%20Computing%20Methodologies%20-%20Ali%20Zilouchian.pdf](https://cdn.preterhuman.net/texts/science_and_technology/artificial_intelligence/Intelligent%20Control%20Systems%20Using%20Soft%20Computing%20Methodologies%20-%20Ali%20Zilouchian.pdf).
2. Щербатов И.А. Интеллектуальное управление робототехническими системами в условиях неопределенности. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2010. №1. С. 73–77. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnoe-upravlenie-robototekhnicheskimi-sistemami-v-usloviyah-neopredelennosti>.
3. Antsaklis P.J. On intelligent control: report of the IEEE CSS task force on intelligent control. *Technical report of the ISIS, group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame. 1994. 31p. URL: <http://www.nd.edu/~pantaskl/Publications/150-ISIS94.pdf>.
4. Albus J.S. On intelligence and its dimensions. *Technical report of the ISIS, group № ISIS 94-001*. University of Notre Dame. 1994. P. 11–13. URL: <http://www.nd.edu/~pantaskl/Publications/150-ISIS94.pdf>.
5. Antsaklis P.J. On autonomy and intelligence in control. *Technical report of the ISIS, group № ISIS 94-001*. University of Notre Dame. 1994. P. 14–18. URL: <http://www.nd.edu/~pantaskl/Publications/150-ISIS94.pdf>.
6. Meystel A. On intelligent control, learning and hierarchies. *Technical report of the ISIS group № ISIS 94-001*. University of Notre Dame, 1994, P. 14–18. URL: <http://www.nd.edu/~pantaskl/Publications/150-ISIS94.pdf>.
7. Imam I.F., Kondratoff Y. Intelligent adaptive agents: a highlight of the AAAI-96 workshop. *Artificial Intelligence*. 1997. № 18(3). P. 75–80.
8. Hess T.J., Rees L.P., Rakes T.R. Using autonomous software agents to create the next generation of decision support systems. *Decision Sciences*. 2000. Vol.31. № 1. P. 1–31.
9. Wooldridge M., Jennings N. R. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*. 1995. Vol. 10. №2. P. 115–152.
10. Intelligent infrastructure for the 21<sup>st</sup> century. VeriSign, Inc. Mountain View, CA, USA. 22 p. URL: <http://complianceandprivacy.com/WhitePapers/VeriSign-Intelligent-Infrastructure-for-the-21st-Century.pdf>.
11. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2001. №1. С. 5–22.
12. XII International conference on intelligent systems and control “ISC-2009”. Cambridge, 2009. URL: <http://www.allconferences.com/conferences/2008/20081208150054>.
13. Павлов В.В., Павлова С.В. Интеллектуальное управление сложными нелинейными динамическими системами: аналитика интеллекта. Киев: Наук. думка, 2015. 216 с. URL: <http://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/20254/1/Pavlov.pdf>.
14. Nonaka I., G. von Krogh. Tacit knowledge and knowledge conversion: controversy and advancement in organizational knowledge creation theory. *Organization Science*. 2009. Vol. 20. № 3. P. 635–652.
15. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем. Киев: Наук. думка, 1975. 240 с.
16. Павлов В.В. Конфликты в технических системах. Киев: Вища школа, 1982. 184 с.

17. Павлов В.В. Синтез стратегий в человеко-машинных системах. Киев: Вища школа, 1989. 162 с.
18. Бибичиков А., Павлов В., Гриценко В., Губанов С. "Антикон" — шаг в обеспечении безопасности мореплавания. *Судоходство*. 1999. № 3. С. 42–43.
19. Способ и устройство для компьютерных сетей управления скоростными циклами прикладных процессов: пат. 83118 Украина, МПК (2006), H04L 12/66, G05B 15/02, G05B 17/00; заявл. 08.09.06; опубл. 10.06.08, Промислова власність, 2008. №11.

Получено 02.10.2016

## REFERENCE

1. Zilouchian A., Jamshidi M. Intelligent control systems using soft computing methodologies. Boca Raton: CRC Press, 2001. 492 p.
2. Shtcherbatov I.A. Intelligent control of robot-technical systems in uncertainty conditions. *Bulletin of Astrakhan State Technical University*. 2010. №1. pp. 73–77 (in Russian).
3. Antsaklis P.J. On intelligent control: report of the IEEE CSS task force on intelligent control. Technical report of the ISIS group №. ISIS 94-001. University of Notre Dame. 1994. 31 p.
4. Albus J.S. On intelligence and its dimensions. *Technical report of the ISIS (Interdisciplinary studies of intelligent systems) group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame. 1994. P. 11–13.
5. Antsaklis P.J. On autonomy and intelligence in control. *Technical report of the ISIS group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame. 1994. P. 14–18.
6. Meystel A. On intelligent control, learning and hierarchies. *Technical report of the ISIS group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame. 1994. P. 14–18.
7. Imam I.F., Kondratoff Y. Intelligent adaptive agents: a highlight of the AAAI-96 workshop. *Artificial Intelligence*. 1997. № 18(3). P. 75–80.
8. Hess T.J., Rees L.P., Rakes T.R. Using autonomous software agents to create the next generation of decision support systems. *Decision Sciences*. 2000. Vol. 31. № 1. P. 1–31.
9. Wooldridge M., Jennings N.R. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*. 1995. Vol. 10. № 2. P. 115–152.
10. Intelligent infrastructure for the 21<sup>st</sup> century. VeriSign, Inc. Mountain View, CA, USA. 22 p. URL: <http://complianceandprivacy.com/WhitePapers/VeriSign-Intelligent-Infrastructure-for-the-21st-Century.pdf>
11. Vasilyev S.N. From classical automatic control problems to intelligent control. *Theory and Systems of Control*. 2001. № 1. pp. 5–22 (in Russian).
12. XII International conference on intelligent systems and control "ISC-2009". (Cambridge, 2009) URL: <http://www.allconferences.com/conferences/2008/20081208150054>.
13. Pavlov V.V., Pavlova S.V. Intelligent control of complex non-linear dynamic systems: analytics of intelligence. Kiev: Nauk. dumka, 2015. 216 p. (in Russian).
14. Nonaka I., G. von Krogh. Tacit knowledge and knowledge conversion: controversy and advancement in organizational knowledge creation theory. *Organization Science*. 2009. Vol. 20. № 3. P. 635–652.
15. Pavlov V.V. Fundamentals of ergatic systems theory. Kiev: Nauk. dumka, 1975. 240 p. (in Russian).
16. Pavlov V.V. Conflicts in engineering systems. Kiev: Vyshcha shkola, 1982. 184 p. (in Russian).
17. Pavlov V.V. Synthesis of strategies in man-machine systems. Kiev: Vyshcha shkola, 1989. 162 p (in Russian).
18. Bibichkov A., Pavlov V., Gricenko V., Gubanov S. "Anticon" — a step for the provision of navigation safety. *Navigation*. 1999. № 3. pp. 42–43 (in Russian).
19. Method and device for computer networks of control of application processes' high speed cycles: pat. 83118 Ukraine; reg. 08 September 2006 (in Russian).

Recieved 02.10.2016

**В.В. Павлов**, д-р техн. наук, проф., зав. відділу інтелектуального управління  
**Ю.М. Шепетуха**, канд. техн. наук, старш. наук. співробітник,  
старш. наук. співробітник відділу інтелектуального управління  
e-mail: yshep@meta.ua

**С.В. Мельников**, канд. техн. наук, старш. наук. співробітник,  
в.о. зав. відділу інтелектуального управління  
e-mail: dep185@irtc.org.ua

**А.Е. Волков**, наук. співробітник. Відділу інтелектуального управління  
e-mail: alexvolk@ukr.net

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій  
та систем НАН України і МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40,  
м. Київ, 03680 ГСП, Україна

#### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ: ПОДХОДИ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Розглянуто поточний стан та перспективи майбутнього розвитку нового наукового напрямку — інтелектуального управління. Серед головних теоретичних та прикладних результатів у цій предметній галузі можна зазначити розробку технологій та алгоритмів керування швидкісними динамічними процесами у розподіленому комп'ютерному середовищі, структурування моделей формування хаотичної поведінки системи, створення методів поліпшення якості обміну даними між компонентами мережецентричної системи.

**Ключові слова:** інтелектуальне управління, ергатична система, теорія конфліктів, нелінійність, невизначеність, мережецентричність.

**V.V. Pavlov**, Doctor of Technics, Professor, Head of Intellectual Control Department  
**Y.M. Shepetukha**, PhD (technics), Senior Researcher, Senior Researcher  
of Intellectual Control Department

e-mail: yshep@meta.ua

**S.V. Melnikov**, PhD (technics), Senior Researcher,  
Acting Head of Intellectual Control Department

e-mail: dep185@irtc.org.ua

**A.Y. Volkov**, Researcher of Intellectual Control Department

e-mail: alexvolk@ukr.net

International Research and Training Center for Information Technologies and Systems  
of the NAS of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine,  
av. Acad. Glushkova, 40, Kiev, 03680, Ukraine

#### INTELLIGENT CONTROL: APPROACHES, RESULTS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

**Introduction.** Intelligent control systems are advanced computerized systems aimed at the modeling and analysis of intelligent tasks as well as the support of human activity in their solving. Therefore, consideration of both conceptual and applied issues of such systems' development is an important and urgent scientific problem.

The purpose of the paper is to examine existing approaches, current state, important results and prospects for future development of such new scientific direction as intelligent control.

**Methods.** Artificial intelligence methods, man-machine theory, conflict resolution theory, theory of deterministic chaos, methods of decision support, methods of distributed control of non-linear applied processes.

**Results.** One may stress two main directions in the field of intelligent control where promising results have been achieved. The first one, related to the creation of intelligent infrastruc-



ture, includes development of methods and structures of distributed control as well as examination of non-linear applied processes in objects with variable properties. The second direction, attributed to the creation of intelligent agents, includes elaboration of methods, models and algorithms for real-time decisions related to the efficient control of dynamic objects.

*Conclusion.* Modern systems of intelligent control should integrate into a single unity three main components such as: traditional control methods, artificial intelligence theory and decision making approach. The main problem is the transformation of conceptual issues of intelligent systems' creation into concrete technologies and algorithms of control in specific application domains.

**Keywords:** *intelligent control, human-machine system, conflicts theory, non-linearity, uncertainty, net-centricity.*

---

УДК 615.47; 004.9

**М.И. BOBK**, канд. биол. наук, старш. науч. сотр.,  
зав. отд. биоэлектрического управления и медицинской кибернетики  
e-mail: dep140@irtc.org.ua  
Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем  
НАН Украины и МОН Украины, п-кт Академика Глушкова, 40,  
г. Киев, 03680 ГСП, Украина

## **БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ЧЕЛОВЕКА**

---

*Рассмотрена эволюция синтеза биотехнических систем управления двигательными функциями как внешних контуров управления — «Миотон», «Миокор», адаптивных «Миостимул», используемые для восстановления двигательных функций. Представлен новый класс электронных аппаратов цифровой медицины, персональных, биологически адекватных «Тренар». Теоретической основой синтеза таких систем является обработка электромиографических (ЭМГ) сигналов. Адекватность воздействий состоянию двигательных функций, этапу их восстановления обеспечивается различными программами и методами управления. Рассмотрена оригинальная технология управления тонкой моторикой кисти для восстановления речи на базе аппаратов «Тренар».*

**Ключевые слова:** биотехнические системы, электронные аппараты, управление, реабилитация, движение, речь, персональный подход, программная электростимуляция, биологическая обратная связь, электромиографический сигнал.

«Все бесконечное разнообразие внешних проявлений мозговой деятельности сводится окончательно к одному лишь явлению — мышечному движению...».

И.М. Сеченов «Рефлексы головного мозга», 1863 г.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Мы привыкли совершать разнообразные движения и действия, совершенно не задумываясь о том, насколько это сложный и уникальный механизм, позволяющий здоровому человеку свободно, не думая и не напрягаясь, совершать все то разнообразие движений, которыми наградила нас природа. Более того, движения являются самыми доступными и эффективными лекарствами, лучшим средством для восстановления здоровья и гармоничного развития человека. Люди со специальными потребностями, например, те, кто имеет синдром детского церебрального паралича (ДЦП), или утра-

© М.И. BOBK, 2017

ISSN 2519-2205 (Online), ISSN 0454-9910 (Print). Киб. и выч. техн. 2017. № 1 (187)

тил двигательную активность в результате тяжелых заболеваний центральной, периферической нервной системы или травм особенно ценят и понимают значение двигательной активности. Цереброваскулярная патология и их наиболее тяжелая форма — инсульт являются одной из наиболее частых причин потери двигательных функций. В настоящее время отмечается стремительная тенденция к увеличению числа больных инсультом, а также к их «омоложению». По данным ВОЗ 30 % больных составляют лица трудоспособного возраста (до 50–60 лет). Инсульт — ведущая причина инвалидности взрослого населения, а ДЦП остается ведущей причиной инвалидности среди детей. Разработка эффективных методов и средств восстановления двигательных функций не перестает быть актуальной.

Одним из направлений биологической и медицинской кибернетики, последовательно развивающимся в Международном научно-учебном центре информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, являются исследования, связанные с разработкой информационных технологий управления движениями на основе биотехнических систем, аппаратно-программных комплексов, как внешних контуров управления. Такие внешние контуры, «встраиваясь» в разветвленную, иерархически организованную, с обратными связями собственную систему управления движениями человека, выполняют в ней роль недостающего звена по поддержанию, восстановлению и/или формированию нового двигательного стереотипа взамен утраченного или искаженного патологией. Функцию внешних контуров регуляции движений выполняют биотехнические системы.

Научные исследования этого направления характеризуются как теоретическими, так и прикладными результатами — от идеи, разработки концептуальных основ, физиологических предпосылок, методов, формулирования принципов, разработки алгоритмов, информационно-структурных и структурно-функциональных моделей биотехнических систем управления движениями человека до технической реализации нескольких поколений электронных аппаратов управления движениями, разработки действующих экспериментальных образцов, передачи в серийное производство и практическое использование. Такие системы предназначены для: восстановительного лечения остаточных явлений поражений центральной и периферической нервной системы у взрослых и детей (например, постинсультные параличи и парезы, невриты различного характера), травмы опорно-двигательного аппарата; управления движениями, их коррекции или обучения определенным двигательным навыкам (например, при тренаже, профессиональном обучении, спорте и т.д.); предупреждения неблагоприятного влияния ограничений двигательной активности; управления функциями, тесно связанными с двигательными, например речевыми, секреторными.

Исследования, направленные на разработку теоретических и прикладных основ управления движениями зародились еще в стенах Вычислительного Центра АН УССР в лаборатории биоэлектростимуляции отдела Биологической кибернетики (зав. отделом академик Н.М. Амосов). С 1962 г. продолжились в Институте кибернетики АН УССР, с 1964 г. в лаборатории «Управление двигательными реакциями в живых организмах», с 1969 г. в отделе «Биоэлектрическое управление и медицинская кибернетика». С мая 1997 г. по настоящее время продолжают развиваться в Международном

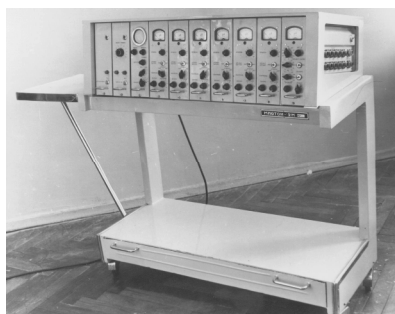
центре НАН и МОН Украины, в упомянутом отделе. С 1964 по 2009 г.г. исследованиями руководил доктор медицинских наук, профессор Леонид Седекович Алеев — лауреат Премии имени Н.М. Амосова, 2004 г.

**Цель статьи** — рассмотреть эволюцию развития исследований, направленных на синтез информационных технологий управления движениями человека на основе биотехнических систем как внешних контуров управления и представить теоретические и прикладные результаты исследований.

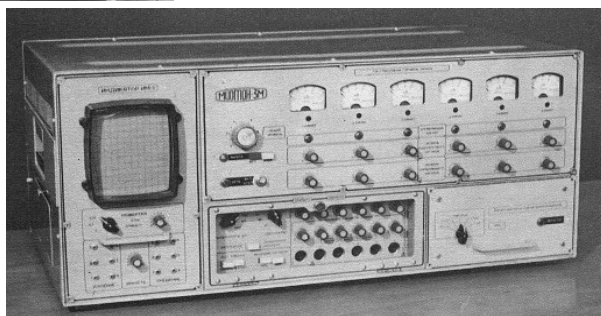
## **МНОГОКАНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ ЧЕЛОВЕКА ТИПА «МИОТОН»**

Еще в 60-х годах XX века был разработан метод программного биоэлектрического управления движениями человека, в основу которого положена многоканальная электростимуляция выбираемого нервно-мышечного комплекса, управляемая по программам, полученным в виде преобразованных электромиографических сигналов одноименных мышц другого человека [1]. В 1965 г. в Институте кибернетики АН УССР изготовлен первый экспериментальный образец многоканального устройства биоэлектрического управления движениями человека «Миотон», реализующего этот метод. В 1967-1970 г.г. были разработаны и изготовлены в СКБ Института кибернетики три опытных образца 6-канального устройства «Миотон-2», которые сразу стали использоваться в неврологических отделениях Октябрьской больницы, г. Киев, 1-ой городской больницы, г. Запорожье — для восстановления двигательных функций после инсульта, санаториях г. Саки и г. Евпатория — для восстановительного лечения двигательных функций у детей [2]. В 1977 г. аппарат «Миотон-2» включен в номенклатуру разрешенных для применения в медицинской практике и серийного производства изделий медицинской техники (Регистрационное удостоверение № 77/29/13 от 4.02.1977 г.).

Сотрудничество отдела Биоэлектрического управления и медицинской кибернетики с Арзамасским приборостроительным заводом (АПЗ) Министерства авиапромышленности СССР привело к выпуску партии изделий «Миотон-2» (рис. 1 а). По сравнению с известными аппаратами, выпускаемыми в те годы в СССР, например «Амплипульс», или зарубежными терапевтическими электростимуляторами RS 10, RS 12, которые изготавливались фирмой Veb Tur (ГДР), «Миотон-2» обладал принципиальным отличием использования в качестве программы управления сокращениями мышц преобразованной биоэлектрической активности мышц человека-донора, задающего программу движения. В сочетании с многоканальностью это позволяло навязывать движения, близкие к естественным. Модернизация «Миотон-2» привела к разработке и выпуску на АПЗ многоканального программного биоэлектрического миостимулятора «Миотон-3М», 1983 г. (рис. 1 б), важным отличием которого являлось формирование стимулирующего сигнала с порогового уровня (соответствующего порогу возбуждения стимулируемых мышц), что увеличивало соответствие навязанного движения программному [3]. В состав «Миотон-3М» входил шестиканальный магнитный регистратор, позволяющий формировать «банк двигательных программ», записанных со здоровых мышц другого человека, и шестиканальный видеоконтроль



а)



б)



в)

**Рис. 1.** Биотехнические системы управления движениями человека типа «Миотон»: а) «Миотон-2», б) «Миотон-3М», в) «Миотон 604»

льный индикатор, позволявший оператору и пациенту проводить визуальный контроль двигательных программ, поступающих на мышцы пациента и сравнивать их с выполняемыми движениями. В 1988 г. «Миотон-3М» демонстрировался на Лейпцигской ярмарке и был награжден Золотой медалью. На базе «Миотон-3М» с 1989 г. на АПЗ начался серийный выпуск биоэлектрического стимулятора «**Миотон-604**» (рис. 1 в) с улучшенными техническими характеристиками и сервисными функциями. «Миотон-604» работает в режимах: прямое управление движениями реципиента от донора; запись программы управляющих биосигналов на магнитограф; управление движениями реципиента по программе, ранее записанной на магнитограф; управление стимуляцией от встроенного синтезатора программ. Самая последняя модель «Миотон-М» — результат модернизации аппарата «Миотон-604» АПЗ совместно с ООО «СТЭК», г. Нижний Новгород, Россия, имеет малые габариты, современную элементную базу, улучшенные технические характеристики и более широкий спектр сервисных функций. Кроме базового, для клиничес-

ких учреждений предполагается разработка и производство упрощенного варианта «Миотон-М» для фитнес-клубов и ветеринарных лечебниц.

Системы управления движениями типа «Миотон» нашли широкое применение в лечебной практике клиник и курортов различных регионов СССР для восстановления двигательных функций, нарушенных при различных поражениях центральной и периферической нервной системы [4]. Аппарат «Миотон-604» до сих пор с успехом используется в клинической практике [5].

90-е годы XX ст. отмечены сотрудничеством отдела Биоэлектрического управления и медицинской кибернетики с НПКФ «Биокор-информатика» при Институте кибернетики имени В.М. Глушкова АН УССР, в результате которого разработан, поставлен на производство и нашел применение в лечебной практике медицинских учреждений Украины электростимулятор многоканальный программный биоэлектрический «**Миокор-МК-01**» (рекомендован к постановке на производство Комиссией по аппаратам и приборам, применяемым в физиотерапии, Комитета по новой медицинской технике МЗ СССР, протокол №4 от 08.04.1991 г.). Отличительная особенность аппарата — широкий набор искусственно синтезированных программ управления стимулирующими сигналами, учитывающих наиболее характерное вовлечение мышц в выполнение различных движений, и наглядное отображение программ.

### **БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ**

Результаты экспериментальных исследований по динамике изменения ключевых параметров мышцы (порог возбуждения, сила максимального сокращения) [4], а также результаты анализа изменений параметров ЭМГ сигнала (амплитуда, частота) в результате утомления мышц при произвольных и вызванных электростимуляцией сокращениях послужили теоретической основой синтеза обратных связей в устройствах управления мышечными сокращениями. Это позволило перейти к новому классу устройств, реализующие принципы адаптивного управления, когда параметры стимулирующего сигнала автоматически подстраиваются под функциональное состояние стимулирующих мышц [6, 7]. Известно, что адаптивный подход полезен в условиях начальной неопределенности и в системах управления объектами с дрейфующими характеристиками. Обе ситуации имеют место при управлении движениями на основе электростимуляции мышц. Так, ключевые параметры идентичных мышц для различных людей и различных мышц для одного и того же человека имеют существенный разброс; претерпевают существенные изменения в процессе стимуляции вследствие адаптации и/или утомления, существенно отличаются при патологии. Кроме того, при реабилитации двигательных функций важно не столько добиваться выполнения полного движения (особенно на начальных этапах реабилитации), сколько получить проприоцептивную афферентацию для формирования нового динамического стереотипа. При этом не следует выходить за пределы максимальных стимулов, поскольку при больших уровнях электростимулирующего сигнала в работу включаются защитные

реакции организма, которые могут исказить желаемую искусственно вызванную афферентацию. Отсюда вытекает необходимость в автоматической (в зависимости от функционального состояния стимулируемых мышц) регулировке динамического диапазона стимула. В дополнение, адаптивное управление приводит к увеличению соответствия выполняемых движений заданной программе, что существенно в специальных задачах управления движениями, когда требуется выполнять условие линейного управления. Технология адаптивного управления защищена патентами США, Англии, Германии, Франции, Канады, Швеции, Италии, Югославии [8, 9]. Принципы адаптивного управления реализованы в аппарате «**Миостимул**» — Стимулятор электрический медицинский, два промышленных образца которого выпущены предприятием «Октава», завод «Генератор», г.Киев в 1975 г. и 1977 г. «Миостимул» содержит две основные обратные связи, реализующие адаптивный подход. Первая служит для автоматического регулирования динамического диапазона стимулирующего сигнала в зависимости от функционального состояния мышц, с целью уменьшения искажения программы движения при управлении. При этом основным параметром, к которому подстраивается управляющее воздействие, является порог возбуждения стимулируемых мышц [6]. Вторая обратная связь осуществляет перевод на «щадающий» режим стимуляции либо отключение стимуляции при наступлении утомления стимулируемых мышц. В этом случае в качестве сигнала обратной связи используются информативные параметры биоэлектрической активности мышц, сокращениями которых управляют — амплитуда и частота «вызванной» электромиограммы [7].

### **ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ ПЕРСОНАЛЬНОГО БИОЛОГИЧЕСКИ АДЕКВАТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ «ТРЕНАР».**

Современный этап развития информационной технологии управления движениями человека характеризуется биологически адекватным, целенаправленным подходом к управлению двигательными функциями. Главными достоинствами этой технологии являются: возможность организовать индивидуальный, в зависимости от нозологии, глубины патологии и этапа реабилитации, подход к реабилитации, активировать дополнительные резервы организма на восстановление двигательных функций. Сформулированные принципы, разработанные критерии, информационно-структурные модели организации биологически адекватного управления движениями, подробно описаны в [10, 11]. Понятие «адекватность» рассматривается как индивидуальный критерий оптимального (с точки зрения достижения главного результата — восстановление двигательных функций) формирования движений и оптимальной мобилизации резервов на разных этапах восстановления.

На базе обработки и преобразования электромиографических сигналов в световые и звуковые информативные сигналы получила развитие *теория «образного» (зрительного и слухового) осознания мышечной активности* зрительным и слуховым анализаторами коры головного мозга. В результате такого преобразования ЭМГ сигналы, характеризующие ключевые параметры мышечной активности (сила и скорость сокращения мышц), ранее недо-

ступные, стали доступны сознанию в виде зрительных и слуховых образов. Это позволило активировать дополнительные резервы моторной области коры на восстановление двигательных функций. Известно, что моторная область, являясь кортикальным отделом проприоцептивной сенсорной системы, одновременно оказывается местом конвергенции проекций от всех других сенсорных зон коры и как высший интегративный отдел мозга млекопитающих является «центральным аппаратом построения движений». Использование в системах управления движениями не только метода программной электростимуляции мышц, но и метода биологической обратной связи (БОС), а также сочетание этих методов способствует установлению движения во взаимосвязи со зрительным, слуховым анализаторами, позволяет расширить ассоциативные связи между новыми функциональными образованиями, которые начинают выполнять роль утраченных структур в собственной системе управления движениями пациента. Метод БОС — зрительной и слуховой, используемый параллельно с другими методами и как самостоятельный метод, позволяет проводить осознанный контроль тренировочного задания, способствуя эффективности реабилитационных мероприятий. Такие программы как «Донор» или «Пороговая стимуляция», «готовят» и делают более восприимчивой поврежденную моторную зону к управляющим воздействиям, усиливают эффективность афферентации как основного способа формирования новой рефлекторной системы супраспинального контроля движений взамен утраченного или искаженного патологией.

Описанный подход реализован в новом классе электронных систем биологически адекватного управления движениями типа **ТРЕНАР®**, представленный двумя модификациями электронных аппаратов цифровой медицины: «Аппарат для электростимуляции с биоуправлением Тренар-01» и «Аппарат для электростимуляции с биологической обратной связью Тренар-02» (рис. 2).

Гамма тренировочных программ как информационно-энергетических сигналов управления в аппаратах «Тренар» представлена:

1) электростимуляцией мышц по искусственно синтезированным программам в широком диапазоне — программы «Синтез»;

2) по программам, которые «считываются» с собственных здоровых мышц пациента или мышц другого человека (инструктора) при их произвольном сокращении и передаются тренируемым мышцам в режиме «онлайн» — программы «Донор»;

3) тренировкой соотношения принудительно-произвольных сокращений по методу пороговой электростимуляции — программа «Порог»;

4) тренировкой произвольных сокращений мышц по методу биологической обратной связи с использованием ЭМГ сигнала тренируемой мышцы, преобразованного в зрительные и слуховые информационные сигналы — программа «Биотренировка»;

5) тренировкой произвольных и принудительных сокращений мышц в режиме «запись — воспроизведение», когда записанный в памяти ЭМГ сигнал произвольно сокращающейся мышцы воспроизводится в виде программы электростимуляции той же мышцы — программа «Память-Ауто» [12, 13].





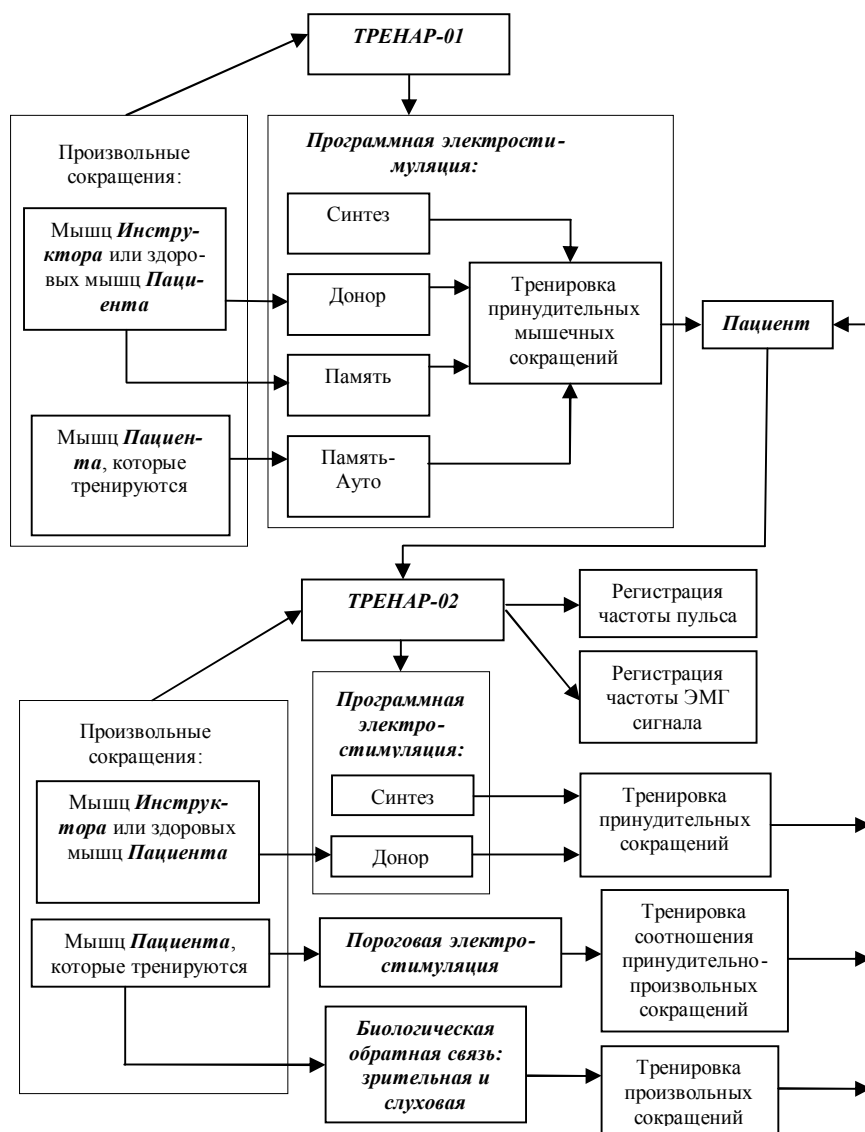
**Рис. 2.** Электронные аппараты биологически адекватного управления движениями ТРЕНАР®.

Основу этих программ составляет «электромиографический образ» мышечного движения, несущий информацию о силе и скорости мышечного сокращения. Преобразование «электромиографических образов» в информативные «зрительные и звуковые» образы мышечного движения позволило активировать сознание в процессе тренировки мышц и, тем самым, активировать дополнительные резервы организма на восстановление двигательных функций при патологии.

При биологически адекватном управлении движениями «электромиографический образ» мышечного сокращения выполняет разные функции:

- детектор состояния мышечного сокращения (норма, патология);
- модель (программа) формирования принудительных мышечных сокращений;
- модель (программа) формирования тренировочного задания произвольных мышечных сокращений. ЭМГ-образ мышечных сокращений используется также для комплексной активации сенсорных зон коры головного мозга — проприоцептивной, зрительной и слуховой.

Как внешние контуры управления движениями, аппараты Тренар имеют электрическую и информационную связь с мышцами, которые управляют и электрическую и/или информационную связь с мышцами, которыми управляют в зависимости от программы тренировки (рис. 3) [14]. Разнообразие программ формирования/тренировки движений обеспечивает выбор программы, адекватной функциональному состоянию двигательной системы пациента, позволяет индивидуально на каждом этапе реабилитации организовать процесс тренировки, наиболее эффективно мобилизующий резервы орга-



**Рис. 3.** Аппараты ТРЕНАР как внешние контуры управления движениями. Структурно-функциональная модель

низма на восстановление движений, вплоть до их полного восстановления. Структурно-функциональные модели активации поврежденной моторной зоны коры на восстановление управления движениями по программам «Синтез», «Донор» (метод — программная электростимуляция) и «Биотренировка» (метод БОС) представлены и описаны в [15].

Рассмотренная организация управления процессом восстановления патологически измененных двигательных функций является примером организации интеллектуального управления, которое появилось на стыке нейробиологии, кибернетики, информатики.

Показателем интеллектуального управления является единство ситуационной и конечной цели управления. Конечная цель — это восстановление двигательных функций. Ситуационная цель зависит от неврологического статуса пациента, состояния его двигательных функций и определяет метод, программу, параметры и регламент тренировки движений на определенном этапе реабилитации [10].

Как интеллектуальные системы, аппараты «Тренар» характеризуются доминированием в них избирательной структурно-функциональной организации с целью получения результата — биологически адекватной активации резервов организма на восстановление двигательных функций. Такой подход совпадает с фундаментальным положением П.К. Анохина о роли результата как фактора, который образует функциональную систему [16]. Гибкая архитектура аппаратов «Тренар» позволяет реализовать этот принцип и организовать разные программы тренировки движений с целью получения главного результата — восстановление двигательных функций. Управление восстановлением двигательных функций на базе аппаратов «Тренар» удовлетворяет главным принципам реабилитации: раннее начало реабилитационных мероприятий; систематичность и продолжительность; адекватность на каждом этапе реабилитационных мероприятий; активное участие в реабилитации пациента.

Технология биологически адекватного, целенаправленного управления движениями и электронные аппараты «Тренар» ее реализующие, защищены рядом авторских свидетельств и патентов [17–20], переданы в промышленное производство на ГНПП «Электронмаш», г. Киев, получили Свидетельства о Государственной регистрации, разрешены для применения на территории Украины. Всесторонняя клиническая апробация аппаратов в 16 клинических и оздоровительных учреждениях различных регионов Украины подтвердила их эффективность при восстановлении двигательных функций взрослых и детей (более 12 000 пациентов).

### **ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТОНКОЙ МОТОРИКОЙ КИСТИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЧИ НА БАЗЕ АППАРАТОВ «ТРЕНАР»**

Нарушения речи (афазии, дизартрии) наблюдаются более чем у трети больных, перенесших инсульт, и являются вторым по значимости и распространенности постинсультным дефектом после двигательных нарушений. Моторная афазия — патология устной речи, которая характеризуется нарушением структурно-семантического оформления речевого высказывания, проявляется у 18–27% пациентов, перенесших инсульт. Наличие речевого дефекта после перенесенного инсульта, черепно-мозговой травмы, опухоли мозга либо оперативного вмешательства на головном мозге значительно снижает коммуникативные возможности, повседневную жизненную активность больных, способствует их социальной изоляции. Разработка эффективных методов и средств восстановления речевых функций как и двигательных после инсульта не перестает быть актуальной.

Речевые движения являются одним из видов произвольных движений. Поэтому наиболее эффективным подходом к реабилитации речи является

комплексный подход, при котором логопедические занятия, сопровождающиеся медикаментозной терапией, сочетаются с методами, направленными на формирование кинестетической афферентации от мышц речевых органов. Кроме артикуляционного аппарата, различают еще один «орган речи», который имеет онтогенетическую связь с функциональной системой речи. Это — кисть. Известно, что развитие тонкой моторики кисти доминантной руки влияет на уровень речевого развития детей [21]. Однако пальчиковая гимнастика малоэффективна при выраженных патологиях движений дистальных отделов руки, а метод подпороговой электростимуляции тыльной поверхности кисти рук (для создания афферентации от мышц кисти и пальцев), не вызывающий сокращения мышц [22], малоэффективен, поскольку не направлен на формирование движений тонкой моторики кисти. Между тем, именно формирование мелкой моторики кисти имеет онтогенетическую связь с функциональной системой речи.

Анализ механизмов нейропластичности коры головного мозга и путей ее активации при восстановлении движений и речи, близкая локализация представительства кисти и центров речи в коре головного мозга, их тесная филогенетическая связь, учет такого фактора, как величина проекции кисти в коре головного мозга, которая занимает около трети всей двигательной проекции, а также принимая во внимание то, что развитие речи с ее многообразием звуков, слов, предложений и логическим отражением человеком восприятия мира, собственной оценкой окружающей среды, тесно связано с развитием движений пальцев рук — все это послужило основой для разработки нового метода и технологии восстановления моторики речи на базе подключения к пациенту внешнего контура индивидуализированного управления мышечными движениями кисти [23, 24]. В качестве внешнего контура, целенаправленно формирующего движения кисти и пальцев пораженной руки, использован аппаратно-программный комплекс ТРЕНАР, хорошо зарекомендовавший себя при восстановлении двигательных функций после инсульта [15].

Отличительной особенностью разработанного метода восстановления устной речи у пациентов после инсульта является формирование афферентации от различных мышечных сокращений кисти и пальцев пораженной руки. Расширенная гамма движений тонкой моторики, отобранных с учетом онтогенеза развития движений кисти и пальцев, особенностей функционального состояния пораженной конечности после инсульта и доступности подведения управляющих воздействий с помощью поверхностных электродов позволяет расширить область активации представительства кисти в моторной зоне коры, что способствует реорганизации моторного центра речи.

Проблема многокритериального выбора параметров тренировок кисти и пальцев, который осуществляет врач при организации индивидуального подхода к реабилитации, решена включением в систему управления движениями информационного компонента — специализированного программного модуля, реализованного в структуре персонального компьютера (ПК) [25, 26]. Разработанные на основе продукционной модели представления знаний критерии определения индивидуализированного комплекса управляющих воздействий, — движения, программы и регламент управления, — позволяют врачу формировать стратегию реабилитационного курса

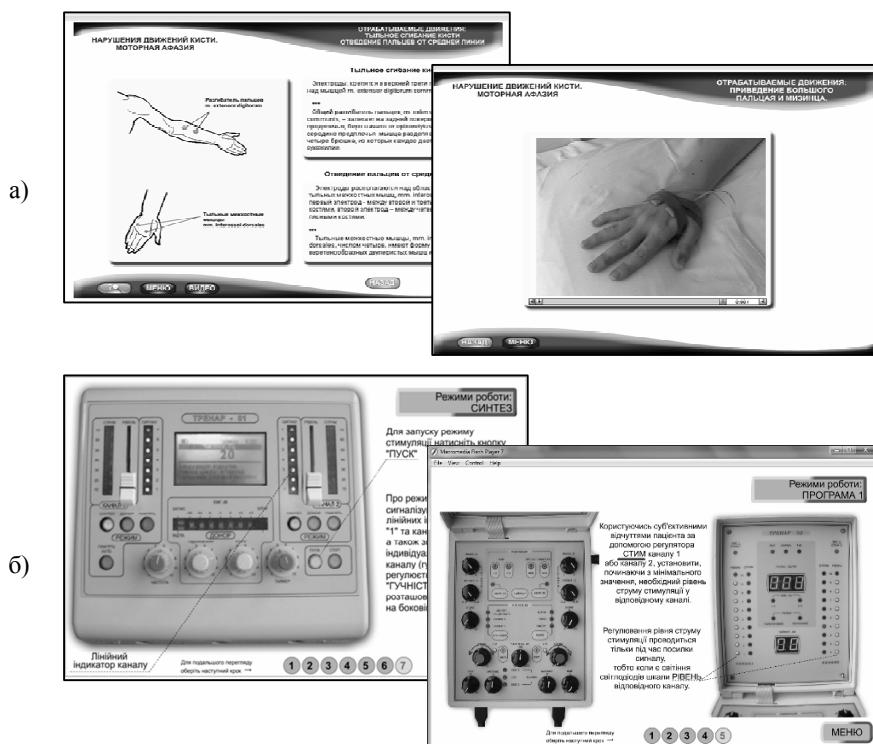
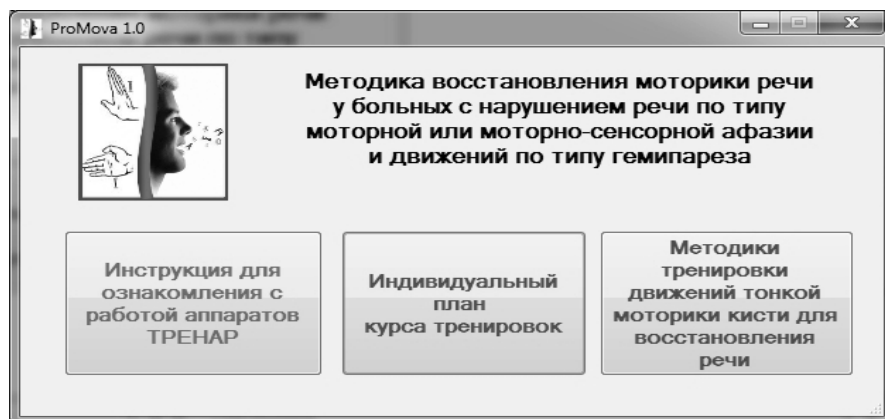


Рис. 4. Фрагменты а) медицинского и б) технического модулей мультимедийного справочника

с учетом текущего состояния больного, его неврологического статуса, состояния двигательных функций, наличия сопутствующих заболеваний и специфических противопоказаний. Специализированный программный модуль объединяет подсистему поддержки принятия решений и электронный мультимедийный справочник, предоставляющий информацию о видах движений тонкой моторики кисти, топологии подведения информационно-энергетических управляющих сигналов к мышцам, функционировании аппаратов «Тренар» по различным программам управления движениями (рис. 4). Интегрированный в архитектуру ПК программный модуль обеспечивает информационно-консультационную поддержку врача при проведении реабилитационных мероприятий по восстановлению речи и, при необходимости, консультирует в интерактивном режиме оператора (врача) относительно практического использования технологии управления тонкой моторикой кисти на базе электронных аппаратов «Тренар» (рис. 5)

Разработанная методика количественной экспресс-оценки моторных и сенсорных нарушений речи при моторной или моторно-сенсорной афазии позволила объективизировать диагностику степени выраженности дефекта речи и оценить восстановление речи даже в пределах небольшой положительной динамики [27]. Использование новой информационной технологии восстановления моторного компонента речи в сочетании с базовым курсом реабилитации у больных после инсульта с нарушением движений по типу



**Рис. 5.** Начальное окно программы определения персональной «маршрутной карты» реабилитационного курса тренировок движений кисти и пальцев пораженной руки.

гемипареза и речи по типу моторной или моторно-сенсорной афазии улучшает функцию речи на 32,5 % ( $p \leq 0,01$ ) по сравнению с базовым курсом реабилитации. Более выраженная эффективность восстановления речи наблюдается у пациентов в раннем периоде реабилитации, а также при использовании нескольких программ тренировки мелкой моторики кисти в одном курсе. Исследования проведены на базе неврологического отделения № 1 Киевской городской клинической больницы № 3.

Отличительной особенностью рассмотренной организации управления процессом восстановления устной речи является то, что роль внешнего контура целенаправленного, биологически адекватного управления тонкой моторикой кисти выполняет компьютерный программно-аппаратный комплекс, в состав которого входят и электронные аппараты «Тренар» и ПК с интегрированным в своей структуре программным модулем. Эта особенность внесла дополнительные элементы «интеллектуализации» в управление физиологическими функциями — *организации управления на основе знаний — медицинских и технических*. Специализированный программный модуль обеспечивает поддержку деятельности оператора на основе знаний о технологии восстановления речи, функционировании аппаратно-программного комплекса «Тренар» во всем разнообразии предоставляемых методов, программ и параметров сигналов управления; движениях кисти и пальцев рук, рекомендуемых для тренировки, мышцах и топологии подведения управляющих сигналов к мышцам для реализации движений. Наличие специализированного программного модуля в качестве информационного компонента в составе программно-аппаратного комплекса тренировки тонкой моторики кисти позволяет расширить функциональные возможности электронных аппаратов «Тренар» по организации персонального, биологически адекватного, целенаправленного подхода к управлению двигательными функциями, в частности, тонкой моторикой кисти для восстановления речи, интенсифицировать усвоение знаний по практическому использованию аппаратов «Тренар» для восстановления речи.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрена эволюция синтеза биотехнических систем управления двигательными функциями как внешних контуров управления — «Миотон-2», «Миотон-3М», «Миотон 604», «Миокор», адаптивных, с обратными связями, — «Миостимул», а также новый класс электронных аппаратов цифровой медицины — персональных, биологически адекватных типа ТРЕНАР®.

1. Многоканальные аппараты биоэлектрического управления движениями типа «Миотон» — это первые аппараты, обладающие тем принципиальным отличием от терапевтических электростимуляторов мышц, что в них использовалась многоканальная электростимуляция выбираемого нервно-мышечного комплекса, управляемая по программам, полученным в виде преобразованных электромиографических сигналов одноименных мышц другого человека. В сочетании с многоканальностью это позволяло навязывать движения, близкие к естественным, и улучшать восстановление двигательных функций после тяжелых заболеваний центральной и периферической нервной системы.

2. Введение обратных связей в устройства управления мышечными сокращениями по автоматической регулировке динамического диапазона стимулирующего сигнала в зависимости от порога возбуждения стимулируемых мышц и по автоматическому уменьшению уровня или отключению стимулирующего сигнала при утомлении мышц позволило улучшить соответствие навязанного движения программному и избежать включения защитных реакций организма, которые могут исказить искусственно вызванную афферентацию при превышении уровня электростимуляции. Введение таких обратных связей целесообразно не только при управлении движениями с целью восстановления двигательных функций, но и в специальных задачах управления движениями, когда требуется выполнять условие линейного управления.

3. Главными достоинствами нового класса аппаратов «Тренар» является возможность организовать индивидуальный, биологически адекватный подход к восстановлению двигательных и речевых функций в зависимости от вида, глубины патологии и этапа реабилитации. Организация индивидуального подхода к восстановлению нарушенных функций, активация дополнительных резервов мозговой деятельности, направленная на восстановление нарушенных функций, достигаются за счет использования оригинальных программ формирования мышечных движений, основанных на разных методах. Основой синтеза методов и программ является специальная обработка ЭМГ сигналов. Организация управления восстановлением двигательных функций на базе аппаратов «Тренар» удовлетворяет такому важному показателю интеллектуального управления, как единство ситуационной и конечной цели, а также главным принципам реабилитации.

4. Использование оригинального метода управления тонкой моторикой кисти для восстановления речи, расширенной гаммы тренировки движений кисти и пальцев рук на базе аппаратов «Тренар», включение в биотехническую систему управления движениями специализированного программного модуля в структуре ПК, выполняющего функции информационно-консультационной поддержки врача при проведении реабилитационных

мероприятий по восстановлению речи, позволило организовать индивидуальный подход к восстановлению моторики речи после инсульта, увеличить эффективность восстановления по сравнению с базовым курсом реабилитации и внесло дополнительные элементы «интеллектуализации» в управление физиологическими функциями — организации управления на основе медицинских и технических знаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 190525 СССР, МПК А 61b 4/06. Способ управления двигательными реакциями / Л.С. Алеев, Бунимович С.Г. СССР. № 1019769/31-16; заявл. 26.06.65; опубл. 29.02.67, Бюл. №2.
2. Алеев Л.С. Біоелектрична система «Міотон» і рухові функції людини. *Вісн. АН УРСР*. 1969. Вип.4. С. 70–80.
3. А. с. 321245 СССР, МПК А 61b 5/04. Способ управления движениями человека / Л. Алеев, С. Бунимович, М. Вовк, В. Горбанев, А. Шевченко СССР. № 1455753/31-16; заявл. 22.06.1970; опубл. 03.09.1971.
4. Алеев Л.С., Вовк М.И., Горбанев В., Шевченко А. «Миотон» в управлении движениями. Киев: Наук. думка, 1980. 142 с.
5. Юдин А.В., Шикова Т.Н. Миотонотерапия в комплексном лечении невропатий. Городская клиническая больница №1 г. Тольятти. URL:[http://www.f-med.ru/scient/nt\\_mitonoterapia.php](http://www.f-med.ru/scient/nt_mitonoterapia.php) (дата обращения: 11.11.2016)
6. А. с. 929 054 СССР, МПК А 61 В 5/04. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М. Вовк, В. Горбанев, А.Шевченко СССР. № 2428608/28-13; заявл. 13.12.76; опубл. 25.05.82, Бюл. № 19.
7. А. с. 976 952 СССР, МПК 61 В 5/04, А 61 N 1/36. Многоканальное устройство адаптивного биоэлектрического управления движениями человека / Л. Алеев, М.Вовк, В. Горбанев, А. Шевченко СССР. № 2436412/28-13; заявл. 03.01.77; опубл. 30.11.82, Бюл. № 44.
8. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles: United States Patent 4,165,750 Aug. 28, 1979.
9. Elektrischer Anreger für Menschenmuskeln mit bioelektrischer Steuerung : Deutsches Patentamt DE 2 811 463. 14.03.85.
10. Вовк М.І., Кифорено С., Котова А. Біологічна і біотехнічна системи як ціленаправлені. *Управляючі системи і машини*. 2005. № 3. С.16–24.
11. Гриценко В.І., Котова А., Вовк М. и др. Інформаційні технології в біології та медицині. Курс лекцій. Київ: Наук. думка. 2007. 382 с.
12. Вовк М.И. Биоинформационная технология управления движениями человека. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2010. Вып. 161. С. 42–52.
13. «Тренар» — инновационная технология восстановления движений. Матеріали Міжнародного науково-практичного форуму «Наука і бізнес — основа розвитку економіки» — Дніпропетровськ, 2012. С.204–206.
14. Вовк М.И. Биоинформационная технология управления движениями как направление биологической и медицинской кибернетики. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2013. Вып. 174. С. 56–70.
15. Вовк М.И. Новые возможности восстановления двигательных и речевых функций. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып.186. С. 78–93.
16. Анохин П.К. Очерки по физиологии функциональных систем. М.: Медицина, 1975. 447 с.
17. Спосіб керування рухами людини: пат. 41795 Україна: МПК А61 N 1/36, № u 200814822; заявл. 23.12.08; опубл. 10.06.09, Бюл. № 11. 4 с.
18. Електростимулятор: пат. 32376 Україна: МПК А61N 1/36, № u 2008 00632; заявл. 18.01.08; опубл. 12 .05.08, Бюл. № 9. 4 с.



19. «Апарат для електростимуляції з біокеруванням ТРЕНАР-01. Методика використання» / М. Вовк, В. Иванов, А. Шевченко // Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір № 26 836, Україна. — 09.12.2008.
20. «Апарат для електростимуляції з біологічним зворотним зв'язком ТРЕНАР-02. Методика використання» / М. Вовк, В. Горбаньов, А. Шевченко // Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір № 37243. — Україна — 04.03.2011.
21. Кольцова М.М. Двигательная активность и развитие функций мозга ребенка. М.: Педагогика, 1973. 143 с.
22. Спосіб лікування мовних порушень у хворих на пухлини головного мозку: патент на корисну модель № 42627 Україна, МПК (2006.01), А61N 1/36. № u200902139; заявл. 11.03.2009, опубл. 10.07.09, Бюл. № 13. 4 с.
23. Вовк М.І., Галян Е.Б. Восстановление моторного компонента речи на базе управления мышечными движениями. Теоретическое обоснование. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2012. Вып. 167. С.51–60.
24. Спосіб лікування мовних порушень: пат. на винахід № 111388 Україна, МПК (2006.01), А61N 1/36; № а 2014 06 092; заявл. 03.06.2014, опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с.
25. Галян Е.Б. Специализированный программный модуль технологии восстановления речи, архитектура и функциональное взаимодействие его компонентов. *Управляющие системы и машины*. 2014. № 6. С. 52–58.
26. Вовк М.І., Галян Е.Б. Организация интеллектуального управления движениями кисти для восстановления речи. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып. 184. С. 25–43.
27. Вовк М.И., Пелешок С.Р., Галян Е.Б., Овчаренко М.А. Методика оценки моторных и сенсорных нарушений речи. *Сборник статей науч.-информ. центра «Знание» по материалам XI международной заочной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке» 3 ч., г. Харьков: сборник со статьями*. Д.: научно-информационный центр «Знание», 2016. С. 70–76.

Получено 28.12.2016

## REFERENCE

1. Inventor's certificate 190525 USSR. The method of motor control / L. Aleev, S. Bunimovich. No 1019769/31-16; claimed 26.06.65; published 29.02.67, Bull. No 2. (in Russian).
2. Aleev L.S. Bioelectrical system "Mioton" and motor functions of a person. Bull. of AS of USSR. 1969. Iss. 4. P. 70–80 (in Russian).
3. Inventor's certificate 321 245 USSR. The method of motor control of a person / L. Aleev, S. Bunimovich, M. Vovk, V. Gorbanev, A. Shevchenko. No1455753/31-16; claimed 22.06.1970; registered 03.09.1971. (in Russian).
4. Aleev L.S., Vovk M.I., Gorbanev V., Shevchenko A. «Mioton» in motor control. Kiev: Nauk. dumka, 1980. 142 p. (in Russian).
5. Judin A.V., Shikova T.N. Miotonoterapiya in treatment of neuropathies. City Clinical Hospital №1 Togliatti. URL: [http://www.f-med.ru/scient/nt\\_miotonoterapia.php](http://www.f-med.ru/scient/nt_miotonoterapia.php) (in Russian) (date of the application: 11.11.16).
6. Inventor's certificate 929 054 USSR. Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko. No 2428608/28-13; claimed 13.12.76; published 23.05.82, Bull. № 19 (in Russian).
7. Inventor's certificate 976 952 USSR Multichannel device for adaptive bioelectrical motor control of a person / L. Aleev, M. Vovk, V. Goranev, A. Shevchenko. No 2436412/28-13; claimed 03.01.77; published 30.11.82, Bull. №44. (in Russian).
8. Bioelectrically controlled electric stimulator of human muscles: United States Patent 4,165,750 Aug. 28, 1979.
9. Elektrischer Anreger für Menschenmuskeln mit bioelektrischer Steuerung: Deutsches Patentamt DE 2 811 463. 14.03.85 (in German).

10. Vovk M.I., Kiforenko S.I., Kotova A. Biological and Biotechnical Systems as Purposeful Ones. *Systems and Machines for Control*. 2005. No 3. P.16–24 (in Russian).
11. Gritsenko V.I., Kotova A., Vovk M et.al. Information technology in Biology and Medicine. Lecture course. K.: Nauk. Dumka, 2007. 382 p. (in Ukrainian).
12. Vovk M.I. Bioinformatic technology of motor control of a person. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2010. Iss. 161. P. 42–52 (in Russian).
13. “Trenar” — innovative technology for motor restoration. Materials of the International scientific — practical forum «The Science and Business — a basis of development of economy». Dnepropetrovsk, 2012. P. 204–206 (in Russian).
14. Vovk M.I. Bioinformatic technology of motor control as the direction of biological and medical cybernetics. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2013. № 174. P. 56–70 (in Russian).
15. Vovk M.I. New opportunities for movement and speech rehabilitation. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2016. Iss.186. P. 78–93 (in Russian).
16. Anohin P.K. The Sketches on Physiology of Functional Systems. Moscow: Medicine, 1975. 447 p. (in Russian).
17. The method of Motor Control of a Person: pat. 41 795, Ukraine: IPC A61 N 1/36. No u 200814822; claimed 23.12.08; published 10.06.09, Bull. No 11. (in Ukrainian).
18. Electrical stimulator: patent 32376, Ukraine: IPC A61 N 1/36. No u 2008 00632; claimed 18.01.08; published 12.05.08, Bull. No 9. (in Ukrainian).
19. The Device for Electrical Stimulation with Biocontrol TRENAR-01. The Technique for Using / M. Vovk, V. Gorbaney, A. Shevchenko // The Inventor's Certificate on author's product right № 26 836, Ukraine — 09.12.2008 (in Ukrainian).
20. The Device for Electrical Stimulation with Biofeedback TRENAR-02. The Technique for Using / M. Vovk, V. Gorbaney, A. Shevchenko // The Inventor's Certificate on author's product right № 37243, Ukraine. 04.03.2011 (in Ukrainian).
21. Koltsova M.M. Motor activity and development of the child's brain functions. M.: “Pedagogika”, 1973. 143 p. (in Russian).
22. The way to treat speech disorders: pat. UA 111388, IPC A61N 1/36. No a 2014 06 092; claimed 03.06.2014, published 25.04.2016, Bull. No 18. (in Ukrainian).
23. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Restoring of motor component of speech based on muscle movement control. Theoretical grounding. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2012. № 167. P. 51–60 (in Russian).
24. The way to treat speech disorders: pat. UA, A61N 1/36, no. 111388, claimed 03.06.2014, published 25.04.2016, Bulletin no 18 (in Ukrainian).
25. Galyan Ye.B. Specialized software module of speech rehabilitation technology, architecture and functional interaction of its components. *Control Systems and Machines*. 2014. Iss. 6. P. 52–58 (in Russian).
26. Vovk M.I., Galyan Ye.B. Organization of Intelligent Hand Movements Control to Restore Speech. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2016. Iss. 184. P. 25–43 (in Russian).
27. Vovk M.I., Peleshok S.R., Galyan Ye.B. Ovcharenko M.A. The method of assessment of motor and sensory speech disorders. *Collected papers of scientific-information center "Knowledge" based on XI International correspondence scientific-practical conference: «The development of science in the XXI century», part 3. Kharkiv: collected papers. D.: scientific-information center "Knowledge", 2016. p. 70–76 (in Russian).*

Recieved 28.12.2016

М.І. Вовк, канд. біол. наук, старший наук. співроб.,  
зав.від. біоелектричного керування та медичної кібернетики  
e-mail: dep140@irtc.org.ua  
Міжнародний научно-навчальний центр інформаційних технологій  
та систем НАН України і МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40,  
м. Київ, 03680 ГСП, Україна

## БІОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОВИМИ ФУНКЦІЯМИ ЛЮДИНИ

Розглянуто еволюцію синтезу біотехнічних систем керування руховими функціями, як зовнішніх контурів керування — «Міотон», «Міокор», адаптивних «Міостимул», які використовуються для відновлення рухових функцій. Представлено новий клас електронних апаратів цифрової медицини, персональних, біологічно адекватних «Тренар». Теоретичною основою синтезу таких систем є обробка електроміографічних (ЕМГ) сигналів. Адекватність керування стану рухових функцій і етапу їх відновлення забезпечується різними програмами і методами. Розглянуто оригінальну технологію керування тонкою моторикою кисті для відновлення мовлення на базі апаратів «Тренар».

**Ключові слова:** біотехнічні системи, електронні апарати, керування, реабілітація, рух, мовлення, персональний підхід, програмна електростимуляція, біологічний зворотний зв'язок, електроміографічний сигнал.

М.І. Vovk, PhD (Biology), Senior Researcher,  
Head of Bioelectrical Control & Medical Cybernetics Department  
e-mail: dep140@irtc.org.ua  
International Research and Training Center for Information Technologies  
and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine  
and Ministry of Education and Science of Ukraine,  
Glushkov ave., 40, Kiev, 03680 GSP, Ukraine

## BIOENGINEERING SYSTEMS FOR HUMAN MOTOR FUNCTIONS CONTROL

*Introduction.* Movement training is one of the main factors to mobilize person's reserves for movement restoration

*The purpose of the article is* to present the results of theoretical and applied researches focused on synthesis of information technologies for human motion control based on bioengineering systems as external control circuits.

*Results.* The evolution of bioengineering systems for motor control — multichannel electronic devices "Mioton-2", "Mioton-3M", "Mioton-604", "Miokor", adaptive device "Miostimul" and a new class of portable electronic devices of digital medicine for personal, biologically adequate, motor control "TRENAR®" are considered. Special EMG — signals processing and its transformation into informative visual and sound signals, that describe muscle contractions are used to develop different programmes for muscle control. These programs based on different methods of muscle electrical stimulation and biofeedback are aimed on activation of additional brain reserves to restore motor functions. New method and technology to restore motor speech, based on original technique of fine motor hand training by the technology "Trenar" is described. The results of clinical testing confirmed its effectiveness in motor speech restoration after the stroke.

*Conclusion.* The main benefits of the technology "Trenar" that leads to the increasing in efficiency of motor and speech rehabilitation are as follows: advanced range of training programs, based on different methods, original techniques of fine motor hand training allows one to select individual approach to rehabilitation process.

**Keywords:** bioengineering systems, electronic devices, bioelectric control, muscle stimulation, biofeedback, electromyographic signal, rehabilitation, movement, speech, personal approach.

# Медицинская и биологическая кибернетика

---

УДК 004.75+004.932.2:616

**А.С. КОВАЛЕНКО**, д-р мед. наук, проф., зав. отд.  
медицинских информационных систем  
e-mail: askov49@gmail.com

**Л.М. КОЗАК**, д-р биол. наук, старш. науч. сотр., ведущий науч. сотр.  
отд. медицинских информационных систем  
e-mail: lmkozak52@gmail.com

**О.А. РОМАНИЮК**, младший науч. сотр.  
отд. медицинских информационных систем  
e-mail: ksnksn7@gmail.com

Международный научно-учебный центр информационных технологий  
и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40,  
г. Киев, 03680 ГСП, Украина

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ МЕДИЦИНЫ

---

*Рассмотрены этапы развития медицинской информатики, опыт разработки подходов и методов формализации медицинской информации, создания медицинских информационных систем и информационных технологий исследования биологических систем разного уровня иерархии. Представлены результаты разработки информационной технологии поддержки хранения и обработки цифровой медицинской информации. Использование разработанной технологии обеспечивает организацию долговременного хранилища цифровых медицинских изображений, полученных от диагностических комплексов в учреждениях здравоохранения, и возможность использовать эту медицинскую информацию лечащим врачом на своем рабочем месте в текущем лечебно-диагностическом процессе. Проанализированы пути дальнейшего развития информационных технологий цифровой медицины.*

**Ключевые слова:** информационные технологии, долговременное хранение цифровых медицинских изображений, цифровая медицина.

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно исследованиям рынка медицинских технологий 2015 года, он был оценен в 5,7 млрд. долларов. Лидирующие позиции занимали лечение хронических заболеваний, вэлнес-индустрия и сегмент электронных органайзеров для принятия лекарств. Было подсчитано, что возрастет спрос на беспроводные мобильные устройства, носимые пациентом. Поэтому осно-

вной упор будет сделан на оказание помощи на дому пациентам с хроническими заболеваниями, а также на создание методов оценки и поддержки здоровья человека с использованием информационных технологий. Таким образом, возрастет потребность в средствах и методах хранения цифровых медицинских данных с последующей их обработкой и анализом, а также в мобильных устройствах для сбора, обработки и обмена цифровыми данными. Для этого необходимо организовать взаимодействие пациентов с врачами и обмен электронными медицинскими документами и записями.

**Цель работы** — проанализировать опыт создания медицинских информационных систем, результаты разработки информационной технологии поддержки хранения и обработки цифровой медицинской информации и пути дальнейшего развития информационных технологий цифровой медицины.

## **РАЗВИТИЕ НАПРАВЛЕНИЙ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАТИКИ**

Одно из первых направлений медицинской информатики базировалось, начиная с 60-х годов XX века, на разработке подходов и методов формализации медицинской информации: формализованные критерии диагностики и оценки эффективности лечения, формализация медицинских записей и создание формализованной истории болезни [1]. Сотрудниками отдела медицинских информационных систем на протяжении 20-ти лет деятельности Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины решались задачи построения медицинских информационных систем (МИС) с использованием электронных медицинских документов, методов и средств организации автоматизированной обработки и математического анализа медицинских данных [2, 3]. Разработаны информационные системы контроля функционального состояния, диагностики и мониторинга состояния здоровья [4–5].

Разработанные математические модели биологических процессов в норме и патологии стали основой для создания информационных технологий (ИТ) исследования биологических систем разного уровня иерархии. Использование предложенных ИТ направлено на решение разносторонних задач оценки состояния индивидуального и популяционного здоровья, выявления особенностей влияния внешних факторов на это состояние [6–8].

По результатам многолетних исследований и моделирования состояния популяционного здоровья и социально-демографического состояния были разработаны ИТ определения состояния здоровья населения и уровня демографического развития различных регионов Украины с помощью предложенных композитных индексов. Внедрение разработанных ИТ позволяет увеличить информационное наполнение и снизить временные затраты сравнительного анализа медико-демографического состояния регионов, осуществлять мониторинг основных рисков состояния здоровья населения и создает информационную основу для принятия управленческих решений при разработке программ регионального развития [9, 10].

Одной из важных задач медицины катастроф является своевременное приведение в состояние повышенной готовности служб медицинской помощи в случаях как природных, так и техногенных чрезвычайных ситуаций. Для решения этой задачи были разработаны средства моделирования на основе

обнаруженных закономерностей во временных рядах данных: космических и геофизических факторов, данных об аварийности и заболеваемости и ряда других. Реализация этих моделей ориентирована на прогнозирование резких изменений гелиогеофизических факторов и связанных с ними изменений состояния биологических объектов; вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций [11–13].

При разработке комплексных информационных систем возникает задача планирования, разработке комплексных информационных систем, решение которой основывается на предварительном анализе технологических процессов и информационных потоков с учетом разных алгоритмов процесса обслуживания пациентов в учреждениях скорой медицинской помощи, в стационарах и в амбулаторно-поликлинических учреждениях здравоохранения. Переход к страховой медицине обусловил, кроме того, реализацию функций учета финансовых показателей медицинской деятельности в ряде госпитальных информационных систем. Разработанная нами информационная технология предпроектного исследования комплексной информационной системы нацелена на определение приоритетных функций и оценку свойств медицинской информационной системы, формирование оптимальной тактики ее проектирования и включает алгоритмы планирования медицинской деятельности [14–16].

Создание телемедицинских систем и сетей является составным элементом информатизации здравоохранения во многих странах мира, расширяются области применения телемедицины. Разработанная нами теория телемедицинских систем, включающая выдвинутые принципы структурно-функциональной организации этих систем, критерии и методы анализа цифровых медицинских изображений, реализована в ИТ построения и функционирования межрегиональной телемедицинской сети. Внедрение ИТ в работу Центра телемедицины МЗ Украины дало возможность охватить квалифицированной медицинской помощью население более 20-ти областей Украины [17–19]. Для объединения медицинских информационных систем в телемедицинскую сеть Украины и для вхождения в международное информационное пространство необходимо обеспечить стандартизацию информационных носителей и передачу медицинских изображений. На базе международных стандартов Health Level 7 и DICOM проведена гармонизация стандартов в области медицинской статистики и информатики в здравоохранении [20, 21].

В настоящее время крайне актуальными остаются вопросы взаимодействия информационных ресурсов, решение проблемы интероперабельности, интеграции хранилищ данных и единого информационного пространства. Получение цифровых медицинских изображений от инструментальных диагностических комплексов в учреждениях здравоохранения, организация системы их длительного хранения и управления доступом медицинского персонала к базе изображений для просмотра и анализа диагностической информации являются неотъемлемыми задачами развития и внедрения информационных технологий в учреждениях здравоохранения. На протяжении более 20-ти лет нами ведутся разработки для решения различных задач по поддержке процесса оказания медицинской помощи пациентам Больницы для ученых НАН Украины и повышение ее эффективности и

качества. Результаты решения задачи формирования единого информационного пространства данного медицинского учреждения представлены в данной работе.

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ЦИФРОВОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Разработанная технология объединяет в единую функциональную сеть медицинскую информационную систему (МИС) данного медицинского учреждения, лечебно-диагностические системы и системы сохранения и архивирования цифровых медицинских изображений (ЦМИ) (рис. 1). МИС Больницы для ученых разработана с учетом результатов анализа бизнес-процессов и информационных потоков ее клинической части. Программное обеспечение МИС реализовано в среде Delphi, база данных разработана в средах MySQL и SQLite. Процесс регистрации пациентов, направленных в приемное отделение, базируется на учетной форме Ф-003/о «Медицинская карта стационарного больного», состоящей из нескольких разделов: идентификационные данные, диагноз при поступлении, дневник, врачебные назначения, протокол операций. Эти разделы являются отдельными учетными формами. После заполнения медицинской карты пациент направляется в соответствующее отделение стационара, в котором делаются назначения, связанные с уточнением диагноза и установлением функционального состояния человека.

В составе комплекса инструментальных диагностических систем находятся: цифровая рентгенография — DX (Digital Radiography), компьютерная томография — CT (Computed Tomography), магнитно-резонансная томография — MR (Magnetic Resonance), ультразвуковая диагностика — US (Ultrasound), рентгеновская ангиография — XA (X-Ray Angiography). Все они должны поддерживать международный стандарт представления ЦМИ DICOM 3.0.

Информационная технология разработана в рамках концепции трехуровневой системы хранения и обработки ЦМИ:

1. Первый уровень — лечебно-диагностическая система, где изображение формируется, а данные изображения могут сохраняться в базе данных или в архиве ИДС путем заполнения дискового пространства с последующим созданием архивов на носителях.

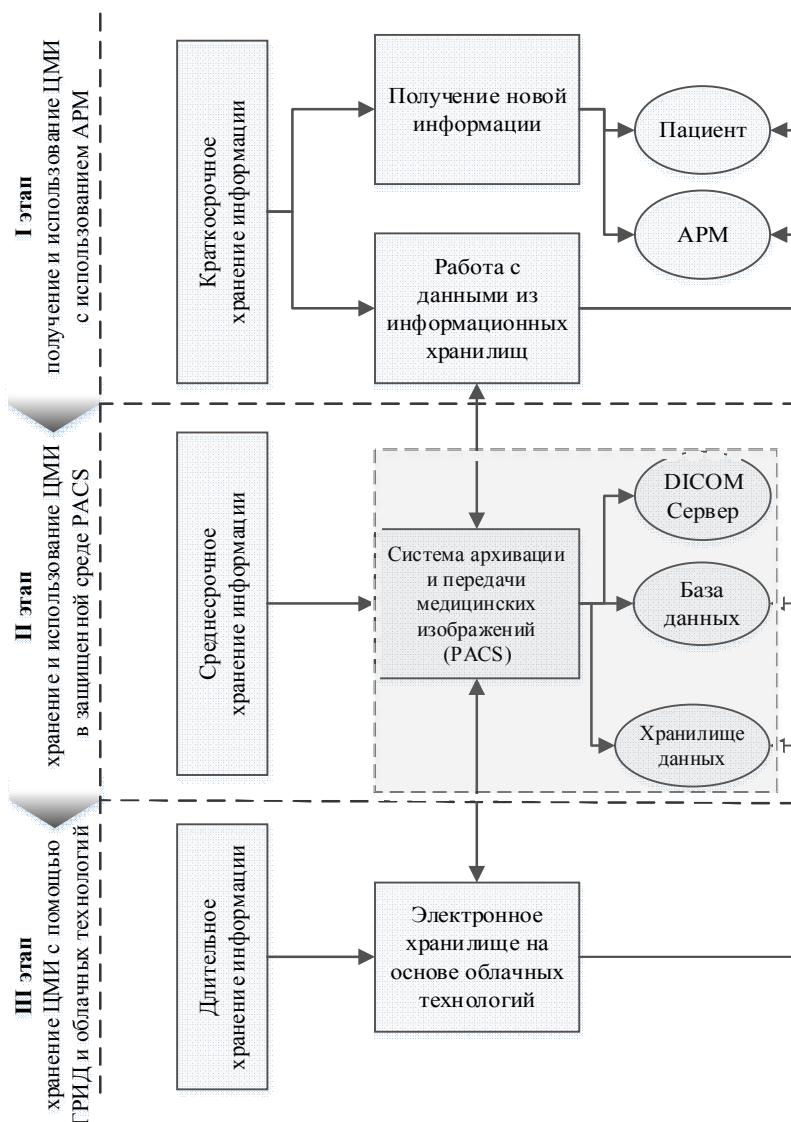
2. Средний уровень — временное хранилище, где хранятся изображения DICOM-формата, к которым открывается доступ для использования в лечебно-диагностическом процессе.

3. Верхний уровень — обеспечение хранения изображений на основе электронных хранилищ длительного хранения с большими и надежными каналами связи, дисковым пространством, вычислительными мощностями.

**I этап информационной технологии — обеспечение работы врача с медицинской информацией на своем рабочем месте.**

Решаются две задачи информационной поддержки деятельности врача: с уже имеющимися медицинскими данными о пациенте и получение необходимой новой или дополнительной диагностической информации.

Для выполнения первой задачи необходимо обеспечить доступ к системам хранения различного типа, которые установлены и используются в ресурсных центрах — от простых файловых систем к устройствам массового



**Рис. 1.** Схема информационной технологии поддержки хранения и обработки цифровой медицинской информации

хранения данных. Чтобы исключить необходимость дополнительного учета особенностей различных устройств хранения данных, каждый такой ресурс, включенный в инфраструктуру электронных хранилищ долгосрочного хранения, должен поддерживать стандартный интерфейс.

В настоящее время наиболее распространенным интерфейсом является менеджер ресурсов хранения данных (Storage Resource Manager, SRM). При управлении данными в таких системах главным образом используются файловые записи. Хранение данных в виде файлов является типичным в научных исследованиях и является удобным во многих прикладных задачах, когда нужно обрабатывать очень большие объемы данных.



При решении второй задачи пациент направляется на дополнительное диагностическое обследование, результаты которого (цифровые медицинские изображения, результаты лабораторных исследований) сопровождаются метаданными, содержащими информацию о пациенте и лечащем враче, характеристики процесса исследования.

Стандартный протокол использования диагностических ЦМИ базируется на формировании и использовании изображения на автоматизированных рабочих местах (АРМ), в инструментальной диагностической системе для анализа и постановки предварительного диагноза или для визуализации протекания лечебных процедур. Полученные изображения сохраняются в локальной базе системы инструментальных исследований, а для использования на последующих этапах лечебно-диагностического процесса делается запись на оптический носитель ЦМИ вместе с программой просмотра. Диски передаются на руки пациенту (лечащему врачу) и могут пересматриваться на любом компьютере, оснащенном CD/DVD приводом. Типичным решением сохранения и архивирования ЦМИ является внедрение таких систем, которые позволяют хранить и обмениваться вышеупомянутыми изображениями. Это первый, низший уровень хранения медицинской информации.

Имеющийся объем дискового пространства хранилища временного хранения накладывает ограничения на время хранения ЦМИ в хранилище. Время хранения изображений в хранилище определяется продолжительностью лечебно-диагностического процесса и отчетного периода работы учреждения здравоохранения (около 1-го года).

Для использования ЦМИ после превышения срока хранения во временном хранилище (например, при повторном обращении пациента) необходимо использовать системы долговременного хранения медицинской информации.

**II этап ИТ — долговременное хранение и использование ЦМИ в защищенной среде PACS (Picture Archiving and Communication Systems).** Система получения, анализа, обработки, обмена и архивирования медицинских изображений — PACS, удовлетворяет предварительно сформулированные требования к системам передачи, архивирования и сохранения ЦМИ: многоплатформенность, бесплатность, способность выполнять функции индексирования базы данных (БД) диагностических систем, передачи ЦМИ в хранилище, управление доступом к хранилищу и др. Поэтому функционирование этого этапа обеспечивается использованием PACS Conquest. Так как настройка системы осложнялась отсутствием большого количества необходимых параметров обмена DICOM-данными между диагностическими системами и DICOM-сервером, нами разработана специальная методика настройки системы передачи и архивирования ЦМИ, подробно описанная в [22].

Для обеспечения сбора файлов изображений от БД диагностической системы, импорта метаданных из БД в файлы \*.dcm, упорядочение тегов в соответствии с DICOM 3.0 и согласование данных цифровых медицинских изображений с БД пациентов МИС больницы используется разработанный модуль конвертации ЦМИ, реализованный на языке программирования Haskell [22]. Модуль осуществляет следующие операции: формирование

внутреннего списка актуальных файлов ЦМИ, проведение при запуске программы проверки наличия новых файлов с внутренним списком (для исключения повторной конвертации обработанных файлов), изменение формата ЦМИ в стандарт DICOM (при необходимости) и запрос к БД пациентов для заполнения пустых тегов. Если в диагностической системе предусмотрено формирование текстовой информации с помощью кириллицы, выполняется процедура транслитерации метаданных, проводится необходимая коррекция и замена названия файла, после чего выполняется экспорт ЦМИ в PACS.

Таким образом, после проведения каждого диагностического исследования, полученные результаты с помощью разработанного модуля конвертации ЦМИ автоматически переносятся в систему хранения и архивирования с возможностью дальнейшего просмотра этих данных (средний уровень хранения).

Так как PACS функционируют, как правило, локально (в отдельной больнице), то для объединения территориально разобщенных медицинских учреждений и для увеличения возможного объема хранения медицинской информации следует использовать облачные технологии.

**III этап ИТ — долговременное хранение ЦМИ с помощью ГРИД и облачных технологий.** Доступность использования облачных технологий, повышение скорости работы с облачными системами, работа с виртуальными носителями информации и другие преимущества этих технологий служили побудительными факторами для использования этих технологий наряду с ГРИД-системами. Следует подчеркнуть, что требуется, с одной стороны, использование анонимизированных ЦМИ с целью защиты персональных данных пациентов и, с другой — внедрение механизмов идентификации и поиска анонимизированных ЦМИ соответствующего пациента в хранилище долгосрочного хранения, а также обеспечение возможности воспроизведения персональных данных пациента для дальнейшего использования на базе МИС.

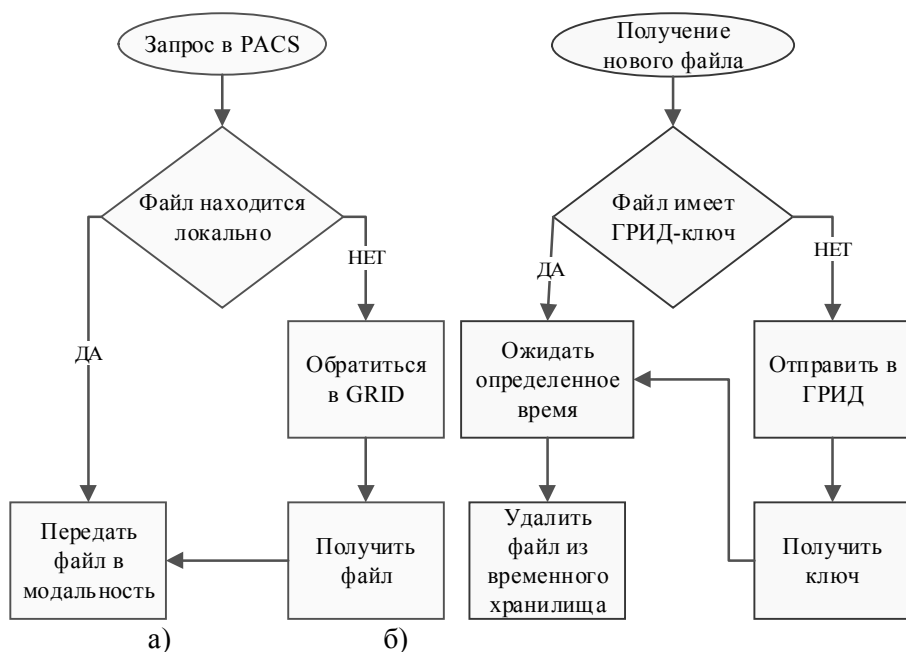
В разработанной технологии на данном этапе использовалась система МедГРИД НАН Украины [23], обеспечивая верхний уровень хранения медицинской информации.

Добавление нового ЦМИ в ГРИД-систему, а также определение места нахождения файла осуществляются с помощью алгоритмов (рис. 2).

Необходимость нахождения файла в локальной сети УЗ имеет временный характер, который обусловлен сроком пребывания пациента в стационаре или на время курса лечения, поэтому для сохранения дискового пространства локальные копии, попавшие в ГРИД ЦМИ, удаляются спустя 4–6 месяцев.

Для корректной идентификации пациента используется стандартный уникальный номер пациента, с помощью которого происходят все запросы о результатах исследования.

Существует несколько протоколов запроса данных о пациенте в систему хранения данных. Выбор конкретного протокола зависит от уровня доступа и прав пользователей или систем. Запрос о данных, поступающий через систему диагностических исследований, имеет более высокий приоритет, т.к. включается протокол query/retrieve между двумя или несколь



**Рис. 2.** Алгоритмы добавления нового ЦМИ в ГРИД-систему (а) и определения места нахождения файла (б)

манипуляции с файлами (копирование, перемещение, изменение метаданных, добавление меток на самом изображении). Запрос от МИС имеет более низкий приоритет, пользователь имеет возможность просмотра файла и, в редких случаях, внесения каких-либо изменений в файл.

Согласно закону о защите персональных данных, медицинские данные, которые хранятся вне медицинских учреждений, должны быть деперсонифицированы. Благодаря теговой структуре DICOM файлов, существует возможность выборочно удалить личные данные о пациенте, такие как фамилия, имя, дата рождения, и уже анонимными хранить в ГРИД-системе вне учреждения здравоохранения. Для различных научных исследований существует возможность получить данные, находящиеся в ГРИД. Для этого к каждому ЦМИ добавляется уникальный ключ, с помощью которого можно найти, посмотреть или загрузить необходимый файл, но уже без личных данных о пациенте. Для использования диагностических изображений, поступивших с ГРИД, внутри УЗ необходимо провести процесс восстановления персональных данных.

Использование облачных технологий, одной из подсистем которых является ГРИД, позволяет виртуально расширить сетевые хранилища данных, предоставить к ним доступ большому количеству пользователей, что способствует росту качества предоставления медицинских услуг.

Таким образом, предложенная технология обеспечивает хранение ЦМИ, полученных в результате диагностических процедур с помощью инструментальных систем, на трех уровнях хранения: первичном — с помощью стандартных носителей и МИС, среднем — с использованием

PACS лечебного учреждения, и вышем — с применением ГРИД и облачных технологий. Использование ИТ предоставляет возможность лечащему врачу со своего АРМа запрашивать необходимые ему медицинские данные о пациенте для проведения анализа изменений состояния данного пациента, для формирования и коррекции тактики лечения.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОЙ МЕДИЦИНЫ**

Совершенствование средств мобильной телефонии и мобильных диагностических устройств, уменьшение размеров компьютерной техники открывает перспективы для развития информационных технологий цифровой медицины по нескольким направлениям. Прежде всего, направление персонализированной медицины, когда выбор методов лечения и лекарственных средств ориентированы на индивидуальные особенности организма человека. Второе направление — применение облачных технологий, позволяющих создавать большие хранилища данных и соответствующих сервисов, которые дадут возможность ускорения поиска медицинских данных, их обмена между медицинскими работниками и обеспечивают расширение возможностей единого медицинского информационного пространства для удаленных медицинских учреждений. В-третьих, развитие телемедицины в направлении телеприсутствия, что повысит эффективность и качество оказания медицинской помощи в медицинских учреждениях независимо от их расположения. И, наконец, разработка интеллектуальных информационных технологий и систем, роль которых заключается в поддержке принятия решений врачом при постановке диагноза, распознавании цифровых медицинских изображений и выборе тактики лечения, реабилитации и профилактики.

Также важно отметить необходимость разработки новых методов формализации электронных медицинских записей и документов. Направление развития формализации медицинских записей нацелено на создание графических интерфейсов и автоматизированного формирования вербальной информации.

## **ВЫВОДЫ**

Становление медицинской кибернетики и информатики на начальных этапах охватывало разработку и внедрение предметно-ориентированных медицинских информационных систем. Привлечение методов формализации и математического моделирования, повышение возможностей вычислительной техники инициировало создание информационных технологий широкого спектра, обеспечивающих информационную поддержку процессов получения, анализа, хранения цифровой медицинской информации об объектах разного уровня — индивидуального, популяционного, организационно-управленческого.

Использование разработанной информационной технологии поддержки хранения и обработки цифровой медицинской информации обеспечивает организацию долговременного хранилища цифровых медицинских изо-

бражений, полученных от диагностических комплексов в учреждениях здравоохранения, и возможность использовать эту медицинскую информацию лечащим врачом на своем рабочем месте в текущем лечебно-диагностическом процессе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов Н.М. Голоса времен. К. : Оранта-пресс, 1999. 500 с.
2. Медицинская информационная система. К. : Наук. думка, 1975. 508 с.
3. Козак Л.М., Елизаров В.А. Автоматизированная система определения характеристик интеллектуальной и эмоциональной составляющих психического статуса здоровья человека. *Український журнал мед.техніки та технології*. 1995. Вип. 3. С. 59–66.
4. Гарбуз Ю.И., Богатырева Р.В., Коваленко А.С. и др. Государственная компьютерная информационная система мониторинга эпидемического процесса в Украине. Технология мониторинга. *Врачебное дело*. 1999. №3. С. 3–12.
5. Синекон Ю.С., Коваленко О.С., Матросова Г.А., Использование компьютерных технологий для задачи анализа показателей здоровья и медицинской диагностики. *Електроніка і зв'язь*. 2001. № 11. С.114–117.
6. Budnyk M., Kovalenko A., Berezovska T., Kozlovsky V. Finding of ROI Intervals at Cardiocycle for CAD Study in Magnetocardiography. *International Journal of Bioelectromagnetism*. 2003. Vol. 5, N 1. P. 107–108.
7. Kozak L.M., Lukashenko M.V. Monitoring and correction students' functional state by the information technology tools. *Кибернетика и вычислительная техника*. Вып. 176. 2014. С. 74–84.
8. Евтушенко А.С., Козак Л.М., Кочина М.Л., Яворский А.В. Результаты использования факторных моделей для оценки функционального состояния человека при зрительном труде. *Укр.журн. медицини, біології та спорту*. 2015. №2(2). С. 70–74.
9. Rogozinskaya N.S., Kozak L.M. Информационное обеспечение технологии автоматизированного мониторинга состояния здоровья населения. *Кибернетика и системный анализ*. № 6. 2013. С. 162–173.
10. Кривова О.А., Козак Л.М. Комплексная оценка регионального демографического развития. *Кибернетика и вычислительная техника*. Вып. 182. 2015. С. 70–84.
11. Василик П.В., Коваленко А.С., Бычков В.В., Василега А.Г. Роль факторов внешней среды в возникновении всплесков аварийности на дорогах. *Україна. Здоров'я нації*. 2008. № 3–4 (7–8). С. 35–40.
12. Бычков В.В. Теоретичні основи прогнозування ризиків надзвичайних ситуацій. *Довкілля та здоров'я*. 2009. № 4 (51). С. 12–14.
13. Провотар А.И., Василик П.В. Модельные волны и взаимодействие: Теоретические и прикладные аспекты. Київ: Наук. Думка, 2014. 296 с.
14. Коваленко О.С., Голубчиков М.В., Орлова Н.М. Інформаційні системи в охороні здоров'я та основні вимоги до їх створення. *Управління закладом охорони здоров'я*. № 1. 2007. 42–46 с.
15. Литвинов А.А., Коваленко А.С., Голубчиков М.В. Особенности проектирования подсистемы „Статистика” госпитальной информационной системы. *Управляющие системы и машины*. 2007. № 5. С. 61–67.
16. Пезенцали А.А., Козак Л.М., Коваленко А.С. Функциональная модель как основа управления проектом разработки комплексной информационной системы медицинского учреждения. *Управляющие системы и машины*. 2008. № 4. С. 3–10.
17. Коваленко А.С., Козак Л.М., Осташко В.Г. Телемедицина — развитие единого медицинского информационного пространства. *Управляющие системы и машины*. 2005. № 3. С. 86–92.
18. Лазоришинец В.В., Слабкий Г.О., Коваленко О.С. и др. Інформатизація охорони здоров'я України та розвиток телемедицини. Житомир: Полісся, 2010. 228 с.

19. Гриценко В.И., Козак Л.М., Коваленко А.С. и др. Медицинские информационные системы как элемент единого медицинского информационного пространства. Кибернетика и вычислительная техника. 2013. Вып. 174. С. 30–46.
20. Коваленко О.С., Буряк В.І. Стандартизація інформаційних систем медичного обслуговування з урахуванням загальноєвропейської інтеграції. Клиническая информатика и телемедицина. 2004. №1. С. 35–40.
21. Коваленко А.С., Пезенцали А.А., Царенко Е.К. Проблемы стандартизации в области медицинских информационных технологий. Клиническая информатика и телемедицина. 2011. Т. 7; Вып. 8. С.111–114.
22. Романюк О.А., Коваленко А.С., Козак Л.М. Информационное обеспечение взаимодействия систем инструментального исследования и системы длительного хранения цифровых медицинских изображений в учреждениях здравоохранения. Кибернетика и вычислительная техника. 2016. Вып. 184. С. 56–71.
23. Система збереження та обробки медичних зображень — Медичний ґрид. URL:<http://medgrid.isma.kharkov.ua> , вільний (29.09.2016)

Получено 27.12.2016

## REFERENCE

1. Amosov N.M. Voices of Times. Kiev, Oranta-Press, 1999. 500 p. (in Russian).
2. *Medical Information System*. Kiev: Nauk. Dumka, 1975. 508 p. (in Russian).
3. Kozak L.M., Elizarov V.A. Automated system for determining the characteristics of the intellectual and emotional components of the human mental health. *Ukrainskiy zhurnal med.tekhniki ta tekhnologii*. 1995. Iss. 3. P. 59–66 (in Russian).
4. Garbuz Y.I., Bogatyreva R.V., Kovalenko A.S. et al. National Computer Information System for monitoring the epidemic process in Ukraine. Monitoring technology. *Vrachebnoye delo*. 1999. №3. P. 3–12 (in Russian).
5. Sinekop Y.S., Kovalenko O.S., Matrosova G.A. The use of computer technology to analyze problems of health and medical diagnostics. *Elektronika i svyaz*. 2001. №11. P. 114–117 (in Russian).
6. Budnyk M., Kovalenko A., Berezovska T., Kozlovsky V. Finding of ROI Intervals at Cardiac cycle for CAD Study in Magnetocardiography. *International Journal of Bioelectromagnetism*. 2003. Vol. 5, N 1. P. 107–108.
7. Kozak L.M., Lukashenko M.V. Monitoring and correction students' functional state by the information technology tools. *Cybernetics and Computer Engineering*. 176. 2014. P. 74–84.
8. Yevtushenko A.S., Kozak L.M., Cochina M.L., Yaworskij A.V. The results of the use of factor models for the evaluation of human functional state when the visual work. *Ukrainskiy zhurnal meditsini, biologii ta sportu*. 2015. № 2 (2). P. 70–74 (in Russian).
9. Rogozinskaya N.S., Kozak L.M. Dataware technologies automated health monitoring. *Kybernetika i sistemnyy analiz*. 2013. № 6. P. 162–173 (in Russian).
10. Krivova O.A., Kozak L.M. Comprehensive assessment of regional demographic development. *Kybernetika i vychislitelnaâ tehnika*. 182. 2015. P. 70–84 (in Russian).
11. Vasylyk P.V., Kovalenko A.S., Bychkov V.V., Vasilega A.G. The role of environmental factors in the occurrence of bursts of accidents on the roads. *Ukraina. Zdorov'ya natsii*. 2008. №3–4 (7–8) p. 35–40 (in Russian).
12. Bychkov V.V. *Theoretical basis of forecasting the risks of emergencies*. Environment and health. 2009. № 4 (51). P. 12–14 (in Ukrainian).
13. Provotar A.I. Vasylyk P.V. Model wave and interaction: theoretical and applied aspect. Kiev: Nauk. Dumka. 2014. 296 p. (in Russian).
14. Kovalenko O.S., Golubchikov N.V., Orlova N.M. Information systems in health and basic requirements for their creation. *Management of health care*. №1. 2007. P. 42–46 (in Ukrainian).
15. Litvinov A.A., Kovalenko A.S., Golubchikov M.V. Features of the design of the subsystem "Statistics" hospital information system. *Control systems and machine*. 2007. №5. P. 61–67 (in Russian).

16. Pezentsali A.A., Kozak L.M., Kovalenko A.S. Functional model as the basis for management of the project to develop an integrated information system of medical institution. *Control systems and machines*. 2008. № 4. P. 3–10 (in Russian).
17. Kovalenko A.S., Kozak L.M., Ostashko V.G. Telemedicine — the development of a single medical information space. *Control systems and machines*. 2005. № 3. P. 86–92 (in Russian).
18. Lazorishinets V.V., Slabkiy G.O., Kovalenko O.S et al. Health Informatization of Ukraine and the development of telemedicine. Zhytomyr: Polissya, 2010. 228 p. (in Ukrainian).
19. Gritsenko V.I., Kozak L.M., Kovalenko A.S. et al. Medical information systems as part of a single medical information space. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2013. 174. P. 30–46 (in Russian).
20. Kovalenko O.S., Buryak V.I. Standardization of information systems of health care on the basis of European integration. *Clinical Informatics and Telemedicine*. 2004. № 1. P. 35–40 (in Ukrainian).
21. Kovalenko A.S., Pezentsali A.A., Carenko E.K. Problems of standardization in the field of medical information technology. *Clinical Informatics and telemedicine*. 2011. Vol 7. Iss. 8. P. 111–114 (in Russian).
22. Romaniuk O. A., Kovalenko A.S., Kozak L.M. Information support interoperability of instrumental studies and long-term storage of digital medical imaging in health care system. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2016. 184. P. 56–71 (in Russian).
23. The system of storage and processing of medical images. Medical grid. URL:<http://medgrid.isma.kharkov.ua>. Free (29.09.2016)

Recieved 27.12.2016

О.С. Коваленко, д-р мед. наук, проф.,  
зав. відд. медичних інформаційних систем  
e-mail: askov49@gmail.com

Л.М. Козак, д-р біол. наук, старш. наук. співр.,  
провідний наук. співр. відд. медичних інформаційних систем  
e-mail: lmkozak52@gmail.com

О.О. Романюк, молодший наук. співр. відд. медичних інформаційних систем  
e-mail: ksnksn7@gmail.com

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем  
НАН України та МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40,  
м. Київ, 03680 МПС, Україна

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОЇ МЕДИЦИНИ

Розглянуто етапи розвитку медичної інформатики, досвід розроблення підходів і методів формалізації медичної інформації, створення медичних інформаційних систем та інформаційних технологій дослідження біологічних систем різного рівня ієрархії. Надано результати розроблення інформаційної технології підтримки зберігання та оброблення цифрової медичної інформації. Використання розробленої технології забезпечує організацію довготривалого сховища цифрових медичних зображень, отриманих від діагностичних комплексів в закладах охорони здоров'я, і можливість аналізувати медичну інформацію лікарем на своєму робочому місці під час поточного лікувально-діагностичного процесу. Проаналізовано шляхи подальшого розвитку інформаційних технологій цифрової медицини.

**Ключові слова:** інформаційні технології, довготривале зберігання цифрових медичних зображень, цифрова медицина.

*A.S. Kovalenko*, Dr Medicine, Prof.,  
Head of Department of Medical Information Systems  
e-mail: askov49@gmail.com

*L.M. Kozak*, Dr Biology,  
Leading Researcher of Department of Medical Information Systems  
e-mail: lmkozak52@gmail.com

*O.A. Romanyuk*, Junior Researcher of Department of Medical Information Systems  
e-mail: ksnksn7@gmail.com  
Technologies and Systems of the National Academy of Sciences  
of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine,  
Glushkov ave., 40, Kiev, 03680 GSP, Ukraine

## INFORMATION TECHNOLOGY FOR DIGITAL MEDICINE

*Introduction.* The need of health care institutions in the repeated use of digital medical images by different specialists during patient care and long-term storage for the analysis of diagnostic information determines the relevance of this work.

The need for means and methods of storage of digital medical data with their subsequent processing and analysis, as well as on mobile devices for the collection, digital data processing and exchange increase.

The purpose of the article is to analyze the experience of creating medical information systems, the development of information technology support the storage and processing of digital medical information and the further development of information technology for digital medicine.

*Results.* Employees of the department of medical information systems for more than 20 years of activities of the International Research and Training Centre for Information Technologies and Systems NAS and MES of Ukraine solved the problem of constructing the medical information systems and information diagnostics technologies with the use of electronic medical records, methods and means of the mathematical analysis of medical data. The developed technology support for storing and processing digital medical information combines into a single functional network the medical information system, instrumental diagnostic systems and a system of conservation and archiving digital medical images. PACS and cloud technologies was used for long-term storage of digital medical images.

*Conclusion.* Organization of long-term storage of digital medical images obtained from the diagnostic systems in health care facilities, and the ability to use this information by doctors at their workplace in the current diagnostic and treatment process was provided by using the developed information technology support for storing and processing digital medical information.

**Keywords:** *medical information system, information technology, digital medical imaging, long-term storage.*



---

УДК 616.379-008.64:004.62:614.2

**С.І. КІФОРЕНКО**, д-р біол. наук, пров. наук. співроб.

від. застосування математичних і технічних методів у біології та медицині

e-mail: skifor@ukr.net

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем

НАН України і МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40,

м. Київ, 03680 МПС, Україна

## **ІЄРАРХІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ — ОСНОВА ТЕХНОЛОГІЇ ДОКЛІНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ ГЛІКЕМІЇ**

---

*Запропоновано технологію ієрархічного моделювання на прикладі системи регуляції глікемії, основу якої складає інформаційна структура з використанням різних за складністю математичних моделей. Реалізована за принципом ієрархії технологія моделювання дозволяє розв'язувати задачі ідентифікації, прогнозування, вибору алгоритмів корекції патологічного стану системи регуляції глікемії з використанням методів математичної теорії керування. Включення в єдиний технологічний цикл комплексу математичних моделей, які функціонують одночасно, розширює коло завдань і дозволяє проаналізувати на етапах теоретичних досліджень і доклінічних випробувань різні аспекти проблематики синтезу та оцінювання адекватності моделей і ефективності алгоритмів керування, актуальних в діабетології.*

**Ключові слова:** ієрархічне моделювання, система регуляції глікемії, алгоритми керування, доклінічні випробування.

### **ВСТУП**

Система регуляції рівня глікемії — одна з основних гомеостатичних систем організму, що входить до складу систем обміну речовин, які забезпечують його енергетичні потреби. Вивченню експериментально-фізіологічними методами різних аспектів діяльності цієї системи присвячена велика кількість робіт, в яких механізми її регуляції досліджено на різних ієрархічних рівнях функціонування — від субклітинного, клітинного, на рівні органів та фізіологічних систем цілісного організму. Зазначимо, що фізіологічні дані надають інформацію про роботу системи тільки в певній проекції, заздалегідь обмеженій умовами конкретних фізіологічних досліджень.

Синтез інформаційних зрізів, одержаних в експерименті, і об'єднання їх в цілісну фізіологічну картину проводиться гіпотетично, тим самим формулюється вербальна модель функціонування системи в цілому. На цьому

© С.І. КІФОРЕНКО, 2017

етапі можливі якісні міркування про різні механізми взаємодії у цілісній системі регуляції. Використання методологічних прийомів математичного моделювання дозволило об'єднати розрізнені фізіологічні дані в математичний об'єкт, що дозволяє перевіряти цілий ряд гіпотез, і може бути інструментом аналізу фізіологічних механізмів, які взаємодіють в цілісній системі регуляції, в кількісно-цифровому форматі.

Актуальність вивчення цієї системи з використанням сучасних технологій моделювання пов'язана з тим, що вони розширюють можливості імітації та перевірки кількісних гіпотез про причинно-наслідкові механізми, які забезпечують функціонування системи регуляції вуглеводного обміну, стан якої є одним з індикаторів такого важкого захворювання як цукровий діабет.

Цукровий діабет — поширене хронічне ендокринне захворювання, в основі якого лежить розлад обміну речовин, пов'язаний з порушенням, в першу чергу, вуглеводного, а також білкового та жирового обмінів в результаті дефіциту гормону інсуліну або в результаті неправильної його дії. Все більша розповсюдженість цього захворювання набула в наш час характеру неінфекційної епідемії. Статистичні дослідження свідчать, що кожні 15-ть років у всьому світі кількість пацієнтів, хворих на діабет, подвоюється. В Україні зареєстровано приблизно 1,2 млн. хворих, це майже 3% населення.

Сучасні інформаційні технології, які базуються на математичному моделюванні, можуть бути ефективним допоміжним засобом підтримки прийняття рішень в процесі діагностики та лікування цукрового діабету.

**Мета** статті — показати можливість використання різних за складністю моделей в єдиному технологічному циклі підтримки процесів регуляції глікемії.

## ЕВОЛЮЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЯЦІЇ ГЛІКЕМІЇ

В даний час відома велика кількість математичних моделей, присвячених дослідженню різних аспектів функціонування системи регуляції глікемії. Різноманітність моделей настільки значна, що характеризувати їх в деталях в цій публікації не доцільно. Досліджено тенденцію становлення, розвитку та використання технології математичного моделювання для вирішення біомедичних задач діабетології в самих різних аспектах [1–5].

Методологічно попереднім підходом щодо використання математичного формалізму для вивчення регуляції глікемії є побудова структурних багатозв'язкових блок-схем, які включають велику кількість фізіологічних компонентів і зв'язків між ними, дають наочну інформацію про складність і багатоконтурність регуляційних механізмів, що забезпечують гомеостатичні властивості системи. Інформацію про це можна знайти в монографіях та статтях, присвячених загальному погляду на фізіологічні особливості регуляції глікемії, наприклад, в [6, 7]. Незважаючи на розуміння складності фізіологічної системи і розвинений математичний апарат, спочатку в літературі з'являється проста модель Больє, яка стала класичною [8]. Ця модель є системою лінійних диференціальних рівнянь, в основу якої покладено принципову взаємодію глюкозо-інсулінових факторів, і яка може вважатися початком індуктивного процесу вивчення системи вуглеводного обміну методом математичного моделювання.

Аналогічні за складністю лінійні диференціальні рівняння з коефіцієнтами, які не змінюються в часі, використано для опису глюкозо-інсулінових зв'язків в ранніх роботах, наприклад, [9, 10], хоча експериментальні дані вказували на нелінійність залежності основних факторів, які забезпечують гомеостатичну регуляцію вуглеводно-обмінних процесів в організмі [11, 12]. В Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем школою Ю.Г. Антомонова розвивався науковий напрям, пов'язаний з моделюванням біологічних систем різного рівня ієрархії: клітинного, системного, рівня цілісного організму. Запропоновано принципи класифікації біосистем, принципи вибору адекватного математичного апарату, розроблено цілий ряд математичних моделей, які описують різні аспекти функціонування біологічних систем. Виділено три класи моделей за глибиною імітації досліджуваних процесів:

- функціональні, апроксимаційні моделі, які не розкривають суті біологічного процесу;
- структурно-функціональні, які відтворюють механізми взаємодії внутрішніх складових досліджуваної системи;
- моделі, які враховують фізико-хімічні властивості процесів, що вивчаються.

Проблематика наукових досліджень школи Антомонова Ю.Г. безпосередньо пов'язана з математичним моделюванням фізіологічних процесів і систем, в тому числі системи регуляції глікемії [13, 14, 15].

У подальшому, в дослідженнях, що стосуються використання технологій моделювання процесів регуляції рівня глікемії, умовно можна виділити *два аспекти*. *Перший* аспект пов'язан зі збільшенням розмірності системи рівнянь моделі, наприклад [16–18], що передбачає врахування великої кількості взаємодіючих метаболічних процесів. *Другий* — з ускладненням структури самих рівнянь, що включають нелінійності різного типу, які дозволяють з більшим ступенем адекватності відтворювати взаємодію метаболітів і регуляторів в системі, що моделюється [19–21]. Якісний стрибок в ідеології моделювання пов'язаний з переходом саме до цих моделей, здатних відображати динаміку процесів, що протікають в системі, і в той же час, ефективно використовувати багатий експериментальний матеріал, накопичений в спеціальних фізіологічних дослідженнях (in vivo та in vitro). Ці дослідження дали конкретний цифровий матеріал для поглибленого моделювання функціонування окремих органів, метаболітів і гормонів, що беруть участь в регуляції рівня глікемії. Це дозволило розширити уявлення про роботу системи в цілому. Запропоновано клас моделей, в яких застосовується новий методологічний прийом побудови складних моделей регуляції глікемії. Цей прийом полягає у використанні експериментально встановлених фізіологічних експериментальних залежностей.

Комплексна структурована модель такого типу [19] описує зміну концентрації глюкози і інсуліну в різних органах і в різних місцях системи кровообігу. Вона розмежовує засвоєння глюкози на периферії, в печінці, мозку, нирках, в кишковикі і дозволяє провести порівняльний аналіз розподілу глюкози та інсуліну за різних шляхів їх надходження, зокрема, в периферичну і комірну вени. В модель блоками, синтезованими на основі великого обсягу експериментальної фізіологічної інформації, в модель

входять функції сигмоїдальної залежності швидкостей продукції та поглинання глюкози печінкою за різною концентрацією глюкози в плазмі, а також швидкості утилізації глюкози периферичними інсулінозалежними та інсулінонезалежними (мозок, нирки) тканинами. Використання цих функцій під час моделювання значно знижує невизначеність, що виникає при ідентифікації складних за структурою багатопараметричних систем, якою є система регуляції вуглеводного обміну.

Кількісне оцінювання достовірності відтворюваних моделлю результатів проведено шляхом дії на систему різними стандартними і нестандартними тестами і перевірці протікання процесів не тільки в плазмі крові, але і в печінці, на периферії і в підшлунковій залозі (секреція інсуліну), для яких було одержано експериментальні дані. Ця модель знайшла застосування при перевірці різних алгоритмів і способів керування за допомогою пристрою автоматичного дозування інсуліну зі зворотним зв'язком [22–24]. Теоретичні і практичні аспекти пов'язано з використанням технології моделювання [24].

Відомо цикл робіт українських вчених, які широко і успішно використовують технологію математичного моделювання для розв'язання різних завдань діагностики і інсулінотерапії при цукровому діабеті [25–27]. Автори запропонували фізіологічно адекватну мінімальну математичну модель регуляції глікемії у вигляді диференціального рівняння 1-го порядку з запізнюючим аргументом, що дозволяє досить точно відтворювати динаміку глікемічної кривої за різних зовнішніх впливів. Структура моделі дозволила провести ряд досліджень з урахуванням особливостей всмоктування глюкози з кишківника, вдосконалити процедуру виявлення латентних форм цукрового діабету, провести імітацію розрахункового оптимального режиму інсулінотерапії для автоматизованого дозатора.

Резюмуючи викладене, відзначимо, що моделі, складні за структурою з урахуванням великої кількості регулюючих факторів, використовуються в основному для теоретичних досліджень, під час перевірки різних гіпотез про функціонування системи вуглеводного обміну в цілому. На моделях такого типу можна кількісно оцінити внесок окремих елементів в загальний процес регуляції, що має певне теоретичне значення. Спрощені моделі, є зручними для практичного застосування, для виконання конкретних обчислювань, можуть бути інструментом при використанні теорії управління для синтезу оптимальних алгоритмів керування [28, 29]. Поділ цей умовний, оскільки моделі, розроблені для дослідницьких цілей, можуть бути використані для розв'язання багатьох практично важливих задач. В цій роботі запропоновано методологію використання математичних моделей різного рівня складності в єдиному технологічному комплексі.

## **ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІЄРАРХІЧНОГО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

За останні роки відбулися кардинальні зміни в розумінні вимог щодо можливостей використання математичних моделей. Зараз модель може розглядатися не як самодостатній об'єкт досліджень, а як елемент цілісної постановки задачі керування і стає інформаційно-технологічним інструментом розв'язання цієї задачі [30]. Стає можливим застосування результатів моделювання не тільки для розв'язання задач керування, а й для більш широ-



Рис. 1. Технологічна схема ієрархічного моделювання

кого їх використання — під час розроблення інформаційних систем підтримки прийняття рішень лікарем у лікувально-діагностичному процесі.

З огляду на вищезазначене, під час конструюванні технологічної системи підтримки прийняття рішень в діабетології виникає потреба у виборі моделей різного рівня складності, адекватних поставленій проблемі. При наявності розвиненої системи моделей доцільно структурувати їх сукупність за принципом ієрархічності, основу якого складає різний рівень абстракції при імітації особливостей функціонування досліджуваної системи.

Технологію застосування методології ієрархічного математичного моделювання в діабетології проілюстровано нами на прикладі одночасного використання в єдиному комплексі різних за складністю математичних моделей системи регуляції рівня глікемії. Включення в єдиний технологічний цикл комплексу математичних моделей, які функціонують одночасно, розширює коло завдань і дозволяє проаналізувати різні аспекти проблематики синтезу алгоритмів керування, актуальних в діабетології.

*Основні компоненти середовища моделювання.* Розроблена технологія моделювання передбачає використання трьох типів моделей. Перший тип — моделі високого рівня складності — MAX model, найбільш наближені до сучасних уявлень про закономірності функціонування системи регуляції, — використовуються для імітації об'єкту дослідження. Другий тип — це більш прості моделі — MIDI model, за допомогою яких можливе використання теорії оптимальних процесів, використовуються в якості моделей об'єкту дослідження і виконують функції прогнозування. Третій тип моделей знаходиться ще на більш низькому рівні складності. MINI model — це моделі, за якими можливе одержання аналітичних розв'язків

диференціальних рівнянь і які допускають обчислення клерувальних впливів і функцій прогнозу за розрахунковими формулами. Схематично технологію ієрархічного моделювання надано на рис. 1. В якості об'єкту керування (MAX рівень) використовується модель, розроблена на основі моделі [23], адаптована для вирішення завдань керування з детальним описом системи регуляції, має суттєві нелінійності, містить кілька десятків параметрів, в неї закладено функції, які відтворюють фізіологічні закономірності, еволюційно сформовані для підтримки глікемічного статусу організму. Простіша — феноменологічна MIDI модель, в запропонованій схемі виконує функцію моделі об'єкту, що відображає глюкозо-інсулінові зв'язки, використовується для теоретичного синтезу алгоритмів і може бути використана в адаптивному контурі керування як функція прогнозування динаміки рівня глікемії. Цю модель надано системою лінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку, в основу якої покладено взаємодію глюкози та інсуліну. Ідеологія їх використання охоплює розроблення алгоритмів керування зі зворотним зв'язком і різною дискретністю вимірювань [13, 31].

*Дворівневу схему моделювання* може бути використано на доклінічному етапі під час відпрацювання різного типу керуючих впливів (їжа, фізичні навантаження, інсулінотерапія, тощо) на систему регуляції глікемії. Принципову дворівневу схему моделювання надано на рис. 2.

*Процедура доклінічних досліджень in model.* На модель високого рівня складності — Max model, яка представляє реальний об'єкт, подається тестове глюкозне або інсуліно-глюкозне навантаження. За результатами цих вимірювань індивідуалізуються параметри спрощеної моделі — Midi model. На рис. 3 проілюстровано результати апроксимації точок, одержаних в тестовому дослідженні, розв'язком прогнозуючої Midi моделі.

Модель такого типу дозволяє використовувати математичну теорію оптимальних процесів для вибору раціональних способів керування рівнем глікемії. Так, метод аналітичного конструювання регуляторів дозволяє синтезувати алгоритми керування для їх можливої реалізації в технічних пристроях дозування інсуліну, які потребують наявності зворотного зв'язку. На рис. 4 проілюстровано ефективність використання такого алгоритму. Критерієм оптимальності під час синтезу алгоритму вибрано функціонал, утворений зваженою сумою квадратів відхилення рівня глікемії від заданого значення 5,5 ммоль/л та параметру, який характеризує інтенсивність введення інсуліну дозуючим пристроєм. Значення вагового коефіцієнту функціоналу відтворює рівень пріоритету витрат інсуліну на керування та міру відхилення рівня глікемії від заданого значення. Суцільні криві на рис. 4 ілюструють динаміку некерованих процесів зміни глюкози і інсуліну, спричинених 4-х кратним прийомом їжі, в якій містяться відповідно 40, 50, 35, та 20 грамів глюкози, штрихові — динаміку відповідних оптимально керованих процесів.

На рис. 4 наведено розв'язки рівнянь MIDI моделі, які ілюструють динаміку глюкози крові та інсуліну в умовах нормального функціонування фізіологічної системи регуляції глікемії при введенні глюкози per os.

Модель такого типу базується на використанні математичної теорії оптимальних процесів для вибору раціональних способів керування рівнем глікемії. Так, метод аналітичного конструювання регуляторів дозволяє синтезувати алгоритми керування для їх можливої реалізації в технічних

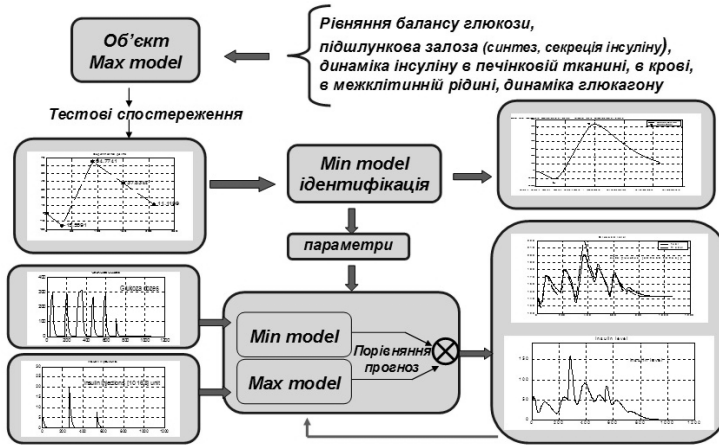


Рис. 2. Дворівнева схема моделювання системи регуляції рівня глікемії

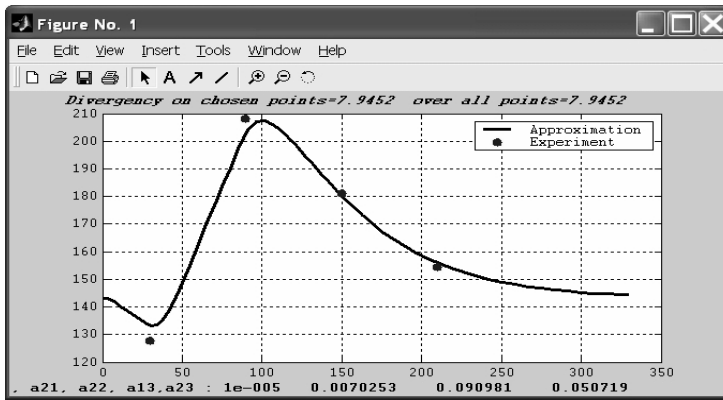


Рис. 3. Ілюстрація результатів тестового дослідження

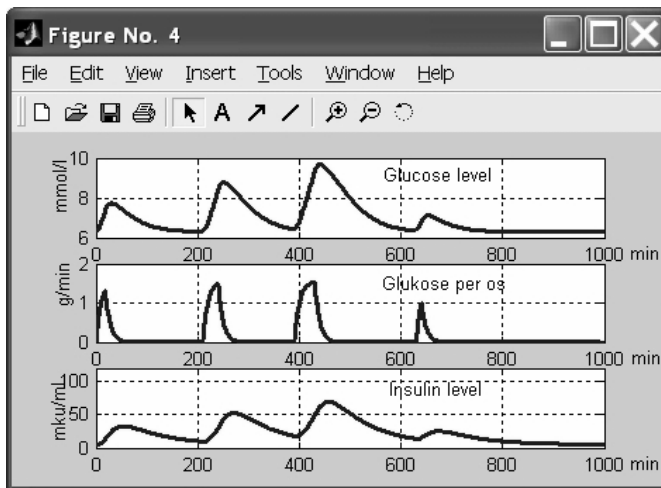


Рис. 4. Динаміки глюкози крові та інсуліну в нормі на тлі введення глюкози per os

пристроях дозування інсуліну, які потребують наявності зворотного зв'язку. На рис. 5 проілюстровано ефективність використання такого алгоритму. Критерієм оптимальності під час синтезу алгоритму вибрано функціонал, утворений зваженою сумою квадратів відхилення рівня глікемії від заданого значення 5,5 ммоль/л та параметру, який характеризує інтенсивність введення інсуліну дозуючим пристроєм. Значення вагового коефіцієнту функціоналу відтворює рівень пріоритету витрат інсуліну на керування та міру відхилення рівня глікемії від заданого значення. Суцільні криві на рис. 5 ілюструють динаміку некерованих процесів зміни концентрації глюкози (5a) та інсуліну (5б), спричинених 4-х кратним прийомом їжі, в якій містяться відповідно 40, 50, 35 та 20 грамів глюкози, штрихові — динаміку відповідних оптимально керованих процесів.

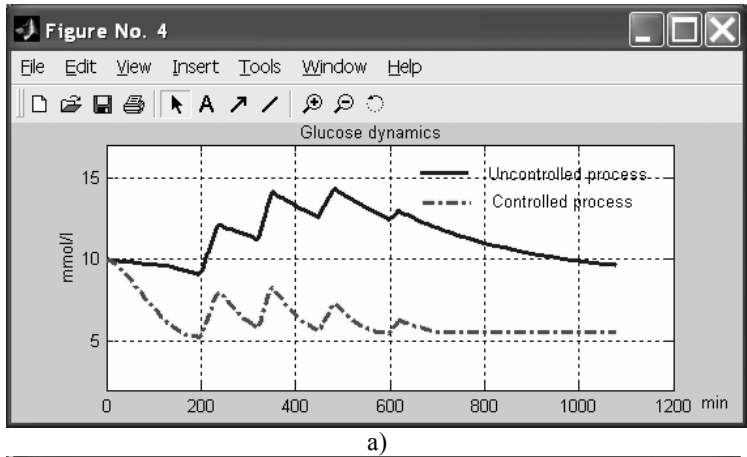
Описана вище технологія дворівневого моделювання дозволяє проводити доклінічні випробування різних способів корекції глікемії, в тому числі непов'язаних з необхідністю використання дозуючих пристроїв. Найбільш поширеною на практиці є процедура введення інсуліну перед їжею для компенсації її вуглеводної компоненти. Попереднє дослідження такого режиму корекції можна провести відповідно до схеми, наведеної на рис. 2. При цьому на обидві моделі подаються вхідні функції, що імітують режим харчування, фізичне навантаження та ін'єкції інсуліну які передбачається приймати перед їжею в найближчу добу. Результати імітаційного порівняльного дослідження процедури добового прогнозування, реалізованого з використанням технології дворівневого моделювання, проілюстровано на рис. 6.

За величиною одержаної розбіжності розв'язків обох моделей оцінено адекватність мінімальної моделі та можливість її використання для прогнозування динаміки рівня глікемії як самостійного інструменту в інших ситуаційних задачах. Якщо розбіжність рішень залишається в допустимих межах, мінімальну модель може бути застосовано для визначення необхідних керуючих впливів. В іншому випадку необхідно вирішити питання про додаткові вимірювання для забезпечення корекції параметрів прогнозуючої моделі або скоротити інтервал прогнозування. За допомогою такої ітераційної процедури надається можливість послідовно відпрацьовувати різні варіанти інсулінотерапії, кількісної вуглеводної компоненти в дієті, фізичних навантажень та виявляти небезпечні ситуації та зони ризику, пов'язані з виходом регульованої величини — рівня глюкози, за межі області допустимих значень. Наявність цієї інформації вказує на необхідність втручання в процес регуляції шляхом раціонального вибору додаткових керуючих впливів.

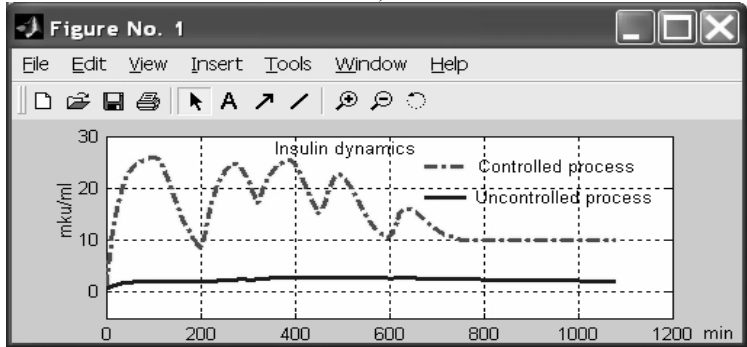
Запропоновану технологію реалізовано в середовищі програмування Matlab Simulink. Відповідне меню і приклад представлення результатів моделювання проілюстровано на рис. 7.

При реалізації схеми дворівневого моделювання можливо імітувати весь комплекс процедур, які супроводжують технологію синтезу керування. Надано можливість імітувати процес отримання вимірювань з усіма властивими для них атрибутами (дискретність, неточність, наявність непередбачених збурень), процедуру ідентифікації параметрів за одержаними спостереженнями, процедуру порівняння синтезованих алгоритмів, а також перевірку їх працездатності в широкому діапазоні зміни початкових умов і зовнішніх збурень.





a)



б)

Рис. 5. Динаміки глюкози крові та інсуліну в нормі на тлі введення глюкози per os

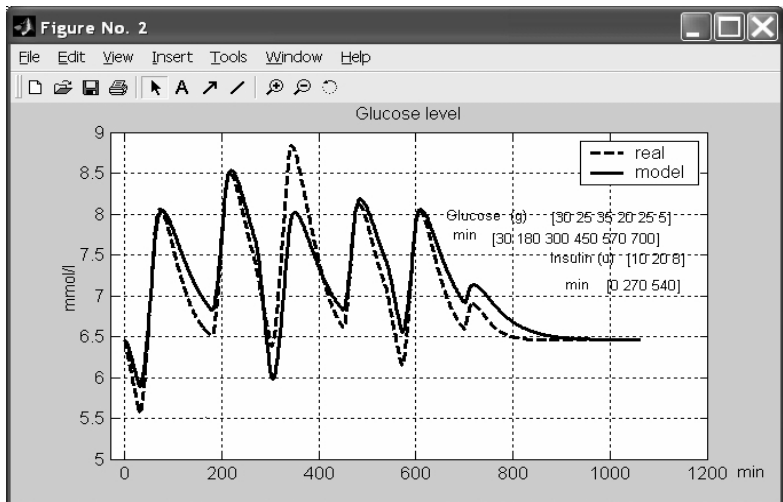
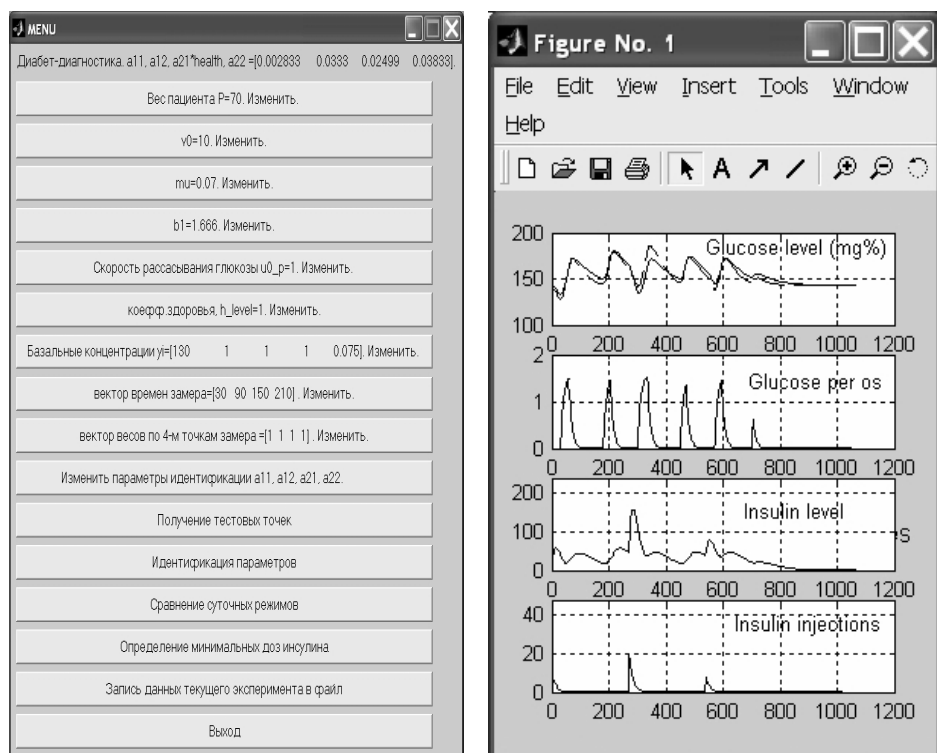
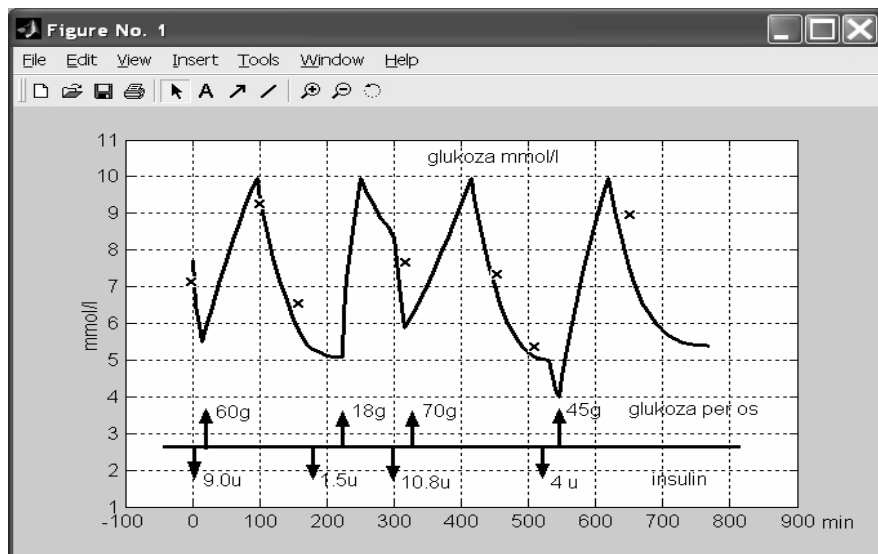


Рис. 6. Динаміка рівня глікемії в умовах 6-ти кратного прийому їжі і трьох компенсуючих доз інсуліну перед основними прийомами їжі (суцільна лінія — за спрощеною прогнозуючою моделлю, штрихова — за моделлю, яка імітує реальний об'єкт)



**Рис. 7.** Меню користування програмним забезпеченням і приклад результатів моделювання.



**Рис. 8.** Прогноз глікемічного профілю, виконаний за розрахунковими формулами

Розроблення MINI моделей, наведених на загальній схемі рисунку 1, засновано на можливості використання простих розрахункових формул для прогнозування процесів керування рівнем глікемії за відсутністю можливості виконання чисельного інтегрування рівнянь MAX і MIDI моделей. На рис. 8 наведено приклад прогнозованого глікемічного профілю, одержаного за таким алгоритмом обчислення компенсуючих доз інсуліну, на фоні передбачуваних харчових навантажень з відповідною глюкозною складовою.

Синтезовані на спрощених моделях алгоритми вимагають подальшої їх перевірки та адаптації до реальних ситуацій. В Інституті ендокринології і хімії гормонів ім. В.П. Комісаренка АМНУ в умовах амбулаторного обстеження хворих на цукровий діабет проведено апробацію запропонованого алгоритму. Значення рівня глікемії під час випробувань позначено хрестиками на рис. 8.

В зв'язку з тим, що активно зростає індустрія мобільних медичних сервісів і збільшується попит на одержання інформаційної допомоги для пацієнтів з хронічними захворюваннями, доцільним є створення мобільних додатків на основі використання технології математичного моделювання. Діабет як будь-яке хронічне захворювання вимагає регулярного контролю і самоконтролю в домашніх умовах. Пацієнтові часто доводиться самостійно вимірювати рівень цукру в крові, іноді 5–6 разів на добу, за допомогою призначених для цієї мети портативних пристроїв — глюкометрів. Зауважимо, однак, що бувають ситуації, коли така можливість не завжди є доступною. В цьому випадку доцільним є створення мобільних додатків на основі використання технології математичного моделювання для прогнозу персонального глікемічного профілю. Це надасть можливість розширити функціональні можливості інформаційної підтримки користувачів, які хворіють на діабет.

## **ВИСНОВКИ**

Запропоновано технологію ієрархічного моделювання на прикладі системи регуляції глікемії, яка базується на одночасному використанні різних за складністю математичних моделей в єдиному комплексі.

Включення в єдиний технологічний цикл комплексу математичних моделей, які функціонують одночасно, розширює коло завдань і дозволяє проаналізувати на етапах теоретичних досліджень і доклінічних випробувань різні аспекти проблематики синтезу та випробувань алгоритмів керування, актуальних в діабетології.

Обчислювальний експеримент на запропонованому комплексі дозволяє вирішити ряд методичних і процедурних питань на доклінічному етапі швидше і дешевше, що не скасовує, безумовно, необхідність удосконалення алгоритмів в реальних клінічних умовах.

Моделюючий комплекс є допоміжним інструментарієм та основою для імітації розв'язання теоретичних і прикладних задач підтримки прийняття рішень при діагностиці та терапії діабету, що надає можливість на основі візуалізації динаміки процесу оцінити за допомогою розроблених алгоритмів якість керування, виявити зони ризику і вибрати режим, який забезпечує прийнятне рішення поставлених завдань.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Карпельєв В.А., Филиппов Ю.И., Тарасов Ю. и др. Математическое моделирование системы регуляции гликемии у пациентов с сахарным диабетом. Вестник РАМН. 2015. Т. 70. № 5. С. 549–570.
2. Гоменюк С.М., Емельянов А.О., Карпенко А.П. и др. Обзор методов и систем прогнозирования оптимальных доз инсулина для больных сахарным диабетом 1 типа. Информационные технологии. 2010. (3). С. 48–57.
3. Cobelli C., Dalla Man C., Sparacino G. et al. Diabetes: models, signals, and control. *IEEE reviews in biomedical engineering*. 2009. Т. 2. С. 54–96.
4. Palumbo P., Ditlevsen S., Bertuzzi A., De Gaetano A. Mathematical modeling of the glucose–insulin system: A review. *Mathematical biosciences*. 2013. Т. 244. № 2. С. 69–81.
5. Нефедов В.П., Ясайтис А.А., Новосельцев В.Н. и др. Гомеостаз на различных уровнях организации биосистем. Новосибирск: Наука, 1991. 232 с.
6. Дришель Г. Регулирование уровня сахара крови. *Процессы регулирования в биологии*. М.: Наука, 1960. С. 63–85.
7. Гольдман С. К вопросу о кибернетических аспектах гомеостазиса. *Самоорганизующиеся системы*. М.: Наука, 1964. С. 40–62.
8. Bolie V. Coefficients of normal blood glucose regulation. *J. Appl. Physiol*. 1961. Vol. 16. P. 783–788.
9. Ackerman E., Gatewood L.C., Rosevear J.W. et al. A mathematical model of the glucose-tolerance test. *Phys. Med. Biol*. 1964. Vol. 9. P. 203–215.
10. Segre C., Turco G.L., Vercellone G. Modelling blood glucose and insulin kinetics in normal? Diabetics and obese subjects. *Diabetes*. 1973. Vol. 22. P. 94–103.
11. Bergman E.E., Urquhart J. The pilot gland approach to the study of insulin secretory dynamics. *Recent Progr. Hormone Res*. 1971. Vol. 27. P. 583–605.
12. Grodsky C.N., Curry D., Landahi H. et al. Purther studies of the dynamics aspects of insulin release in vitro, with evidence for the two-compartmental storage system. *Acta diabet. Latina*. 1969. Vol. 6, Suppl. № 1. P. 554–579.
13. Бізкомедицина. Єдине інформаційне простірство. К.: Наук. думка, 2001. 318 с.
14. Антомонов Ю.Г., Кифоренко С.И., Микільська І.А. и др. Математическая теория системы сахара крови. К.: Наук. думка, 1971. 82 с.
15. Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні (кол. авторів). Київ: Наук. думка, 2010. 1008 с.
16. Antomonov Yu., Kiforenko S., Allamiarov B. et al. Theoretical investigation of carbohydrate and lipometabolism systems and use of simplified mathematical models for control *Kybernetes*. 1977. Vol. 6. № 4. P. 297–303.
17. Алламяров Б.У., Кифоренко С.И. Экспериментальное исследование и математическое моделирование динамики некоторых показателей углеводного и жирилопидного метаболизма в условиях однократного введения адреналина. Математические модели в биологии. Киев: Институт кибернетики АН УССР, 1974. С. 17–24.
18. Алламяров Б.У., Хамдамов Р. Идентификация математической модели управления уровнем глюкозы и свободных жирных кислот крови при сахарном диабете. *Изв. АН УзССР, Сер. техн. Наук*. 1982. № 4. С. 38–43.
19. Cobelli C., Federspil C., Pacini G. et al. An integrated mathematical model of the dynamics of blood glucose and its hormonal control. *Math. Biosci*. 1981. Vol. 5 P. 27–60.
20. Даргау Л.А., Оркина Е.Л., Новосельцев В.Н. Углеводный обмен: Интегральные модели. *Инженерная физиология и моделирование систем организма*. Новосибирск: Наука, 1987. С. 54–69.
21. Albisser A.M., Amasaki Y.Y., Broekhuysse O. et al. Hypercomplex models of insulin and glucose dynamics: do they predict experimental results. *Ann. Biomed. Engin*. 1980. Vol. 8. P. 539–557.
22. Cobelli C, Ruggari E. Evaluation of portal/periphersi route and of algoritme for insulin delivery in the closed-loop control of glucose in diabetes. A modeling etudy. *IEES Transact. Biomed. Eng*. 1983. Vol. 30. P. 93–103.

23. Cobelli C., Mari A. Control of diabetes with artificial systeme for insulin delivery algorithm independent limitations revealed by a modeling study. *IEEE Transact. Biomed. Eng.* 1985. Vol. 32. P. 840–845.
24. Cobelli C. Modelling and identifications of endocrine-metabolic systems. Theoretical aspects and their importance in practice. *Math. Biosci.* 1984. Vol.72. № 2. P. 263–289.
25. Лапта С.И., Лапта С.С. Функционально-феноменологическая модель перорального глюкозо-толерантного теста. *Проблемы бионики.* 2000. № 52. С. 52–57.
26. Лапта С.С., Поспелов Л.А., Соловьева О.И. Компьютерная ранняя диагностика сахарного диабета методами математического моделирования. *Вестн. НТУ «ХПИ».* 2014. № 36 (1079). С. 55–61.
27. Сокол Е.И., Лапта С.С. Математическая модель регуляции углеводного обмена *Вестн. НТУ «ХПИ».* 2015. №33(1142). С. 152–157.
28. Жевнин, А.А., Колесников, К.С., Крищенко, А.П. и др. Синтез алгоритмов терминального управления на основе концепций обратных задач динамики (обзор). *Изв. АН СССР. Техн. кибернетика.* 1985. № 4. С. 180–188.
29. Глушков В.М., Амосов Н.М., Антомонов Ю.Г. и др. Методы математической биологии Кн. 5. Методы анализа и синтеза биологических систем управления. Киев: Вища шк., 1983. 272 с.
30. Новосельцев В.Н. Моделирование в век компьютеров. М.: Ин-т проблем управления РАН, 2002.
31. Кифоренко С.И. Концептуальные основы имитационного исследования: система углеводного обмена — система внешнего управления. *Кибернетика и вычислительная техника.* Вып.110. 1997. С. 64–71.

Получено 30.12.2016

## REFERENCE

1. Karpel'ev V.A., Fylyppov Y.I., Tarasov Yu et al. Mathematical modeling of blood glucose regulation system in patients with diabetes. *Herald of the RAMS.* 2015. Vol. 70. № 5. P. 549–570. (In Russian).
2. Gomenyuk S.M., S.A. Emelyanov, Karpenko A.P., Tchernetsov S.A. Review of methods and forecasting systems of optimal insulin doses for patients with type 1 diabetes. *Information technologies.* 2010; (3). P. 48–57. (In Russian).
3. Cobelli C., C. Dalla Man, G. Sparacino et al. Diabetes: models, signals, and control. *IEEE reviews in biomedical engineering.* 2009. №. 2. P. 54–96.
4. Palumbo P., S.Ditlevsen, A.Bertuzzi, A. De Gaetano. Mathematical modeling of the glucose–insulin system: A review. *Mathematical biosciences.* 2013. Vol. 244. №. 2. P. 69–81.
5. Nefedov V.P., Jasaitis A.A., Novoseltsev V.N. et al. Homeostasis at different levels of biological systems organization et al. Novosibirsk: Nauka, 1991. 232 p. (In Russian)
6. Drishel G. Regulation of blood sugar level. *Regulatory processes in biology.* М.: Nauka, 1960. P. 63–85 (In Russian).
7. Goldman S. On the question of cybernetic aspects of homeostasis. *Self-organizing systems.* Moscow: Nauka, 1964. P. 40–62. (In Russian).
8. Bolie V. Coefficients of normal blood glucose regulation. *J. Appl. Physiol.* 1961. Vol. 16. P. 783–788.
9. Ackerman E., Gatewood L.C., Rosevear J.W., Molnar D.G. A mathematical model of the glucose-tolerance test. *Phys. Med. Biol.* 1964. Vol. 9 P. 203–215.
10. Segre C., G.L. Turco, G. Vercelione. Modelling blood glucose and insulin kinetics in normal? Diabetics and obese subjects. *Diabetes.* 1973. Vol. 22. P. 94–103.
11. Bergman E.E., J. Urquhart. The pilot giand approach to the study of insulin secretory dynamics. *Recent Progr. Hormone Res.* 1971. Vol. 27. P. 583–605.
12. Grodsky C.N., D. Curry, H. Landahi, L. Bennett. Further studies of the dynamics aspects of insulin release in vitro, with evidence for the two-compartmental storage system. *Acta diabet. Latina.* 1969. Vol. 6, Suppl. № 1. P. 554–579.

13. Biekomeditsina. Single Information Space / Ed. V.I. Gritsenko. Kiev: Nauk. Dumka, 2001. 318 p. (In Russian).
14. Antomonov Y.G., Kiforenko S.I., Mikulskaya I.A., Parokonnaya N.K. The mathematical theory of blood glucose system. Kiev: Nauk. Dumka, 1971. 82 p. (In Russian)
15. State and prospects of development of science in Ukraine (group of authors). Kiev: Nauk.dumka, 2010. 1008 p. (In Russian)
16. Antomonov Yu., S. Kiforenko, B. Allamiyarov et al. Theoretical investigation of carbohydrate and lipometabolism systems and use of simplified mathematical models for control. *Kybernetes*. 1977. Vol.6. № 4. P. 297–303.
17. Allamiyarov B.U., Kiforenko S.I. Experimental study and mathematical modeling of some indicators of carbohydrate and fat-lipid metabolism dynamics in a single injection of adrenaline. *Mathematical models in biology*. Kiev: Inst. of Cybernetics, 1974. P. 17–24 (In Russian).
18. Allamiyarov BU, Khamdamov R. Identification of the mathematical model of the level of glucose and blood free fatty acids control in diabetes. *Proc. of the Academy of Sciences of the Uzbek SSR, Ser. tehn. Science*, 1982. № 4. P. 38–43 (In Russian).
19. Cobelli, C. Federspil, G. Pacini et al. An integrated mathematical model of the dynamics of blood glucose and its hormonal control. *Math. Biosci.* 1981. Vol. 5. P.27–60.
20. Dartau L.A., Orkina E.L., Novoseltsev V.N., Sklyanik A.L. Carbohydrate metabolism: Integral models. *Engineering physiology and modeling of the body's systems*. Novosibirsk: Nauka, 1987. P. 54–69 (In Russian)
21. Albisser A.M., Y Y. Amasaki, O.Broekhuysse, I. Tiran. Hypercomplex models of insulin and glucose dynamics: do they predict experimental results. *Ann. Biomed. Engin.* 1980. Vol. 8. P.539–557.
22. Cobelli C., E. Ruggari. Evaluation of portal/periphersi route and of algoritme for insulin delivery in the closed-loop control of glucose in diabetes. A modeling etudy. *IEES Tranzasct. Biomed. Eng.* 1983. Vol. 30. P. 93–103.
23. Cobelli C., A. Mari. Control of diabetes with artificial systeme for insulin delivery algorithm independent limitations revealed by a modeling study. *IEEE Transact. Biomed. Eng.* 1985. Vol. 32. P. 840–845.
24. Cobelli C. Modelling and identifications of endocrine-metabolic systems. Theoretical aspects and their importance in practice. *Math. Biosci.* 1984. Vol. 72. № 2. P. 263–289.
25. Lapta S.I., S.S. Lapta. Functionally-phenomenological model of oral glucose-tolerance test. *Problems of bionics*. 2000. № 52. P. 52–57 (In Russian).
26. Lapta S.S., L.A. Pospelov, O.I. Solovyov. Computer early diagnosis of diabetes by methods of mathematical modelling. *Vestn. NTU "KhPI"*. 2014. №36 (1079). P. 55–61 (In Russian).
27. E.I. Sokol, S.S. Lapta. Mathematical model of carbohydrate metabolism regulation *Vestn. NTU "KhPI"*. 2015. №33 (1142). P. 152–157 (In Russian).
28. Zhevnin A.A., Kolesnikov K.S., Kryschenko A.P., & Toloknov V.I. Synthesis of Terminal Control algorithms based on the concepts of inverse dynamics problems (review). *Proc. AN SSSR. Tech. Cybernetics*. 1985, № 4. P. 180–188 (In Russian).
29. Glushkov V.M., Amosov N.M., Antomonov Yu. et al. Methods of mathematical biology. V. 5. Methods of analysis and synthesis of biological control systems. Kiev: Vishcha shk., 1983. 272 p. (In Russian).
30. Novoseltsev V.N. Mathematical modeling in the age of computers. Moscow: Inst. probl. upr. RAN, 2002 (In Russian).
31. Kiforenko S.I. Conceptual bases of simulation study: the system of carbohydrate metabolism — the external control system. *Cybernetics and Computer Science*. Iss. 110. 1997. P. 64–71 (In Russian).

Recieved 30.12.2016

С.І. Кіфоренко, д-р биол. наук,  
вед. науч. сотр. отд. применения математических  
и технических методов в биологии и медицине  
e-mail: skifor@ukr.net

Международный научно-учебный центр информационных технологий  
и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40,  
г. Киев, 03680 ГСП, Украина

## ИЕРАРХИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ — ОСНОВА ТЕХНОЛОГИИ ДОКЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ГЛИКЕМИИ

Предложена технология иерархического моделирования на примере системы регуляции гликемии, основу которой составляет информационная структура с использованием различных по сложности математических моделей. Реализованная по принципу иерархии, технология моделирования позволяет решать задачи идентификации, прогнозирования, выбора алгоритмов коррекции патологического состояния системы регуляции гликемии с использованием методов математической теории управления. Включение в единый технологический цикл комплекса математических моделей, функционирующих одновременно, расширяет круг задач и позволяет проанализировать на этапах теоретических исследований и доклинических испытаний различные аспекты проблематики синтеза, оценки адекватности моделей и эффективности алгоритмов управления, актуальных в диабетологии.

**Ключевые слова:** иерархическое моделирование, система регуляции гликемии, алгоритмы управления, доклинические испытания.

S.I. Kiforenko, leading researcher at the Department of mathematical  
and technical methods in biology and medicine  
e-mail: skifor@ukr.net  
International Research and Training Center for Information Technologies  
and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry  
of Education and Science of Ukraine,  
Glushkov ave., 40, Kiev, 03680 GSP, Ukraine

## HIERARCHICAL MODELING — THE BASIS OF TECHNOLOGY OF PRECLINICAL TESTING OF GLYCEMIC LEVEL CONTROL ALGORITHMS

*Introduction.* In recent years there have been fundamental changes in the understanding of the requirements for the possibilities of using mathematical models. Now the model can not be seen as a self-contained object of research but as well as an element of integrated formulation of task management. Thereby it becomes information technology tool to solve this problem. It is possible to use the simulation results not only to solve control problems, but also for wider use — in the development of information systems support decision making in medical treatment and diagnostic process.

The purpose of the article is to summarize the experience in the development of hierarchical modeling technology of the system regulation of blood glucose using models different levels of complexity in a single technological cycle.

*Methods.* Structural and functional modeling, hierarchical modeling, methods of synthesis of mathematical models, methods for parameter identification and verification of models, methods of control theory.

*Results.* On the example of the regulation of blood glucose system is developed hierarchical modeling technology, based on the simultaneous use in a single technological cycle mathematical models of various levels of complexity: MAX, MIDI, MINI. The first type — a high level of complexity of the model — MAX-model — the closest to the modern ideas about the laws regulating the functioning of the system — used to simulate the object of

research. The second type — these are more simple models of research object — MIDI model, — are used for the synthesis of control actions and fulfil the prediction function. The third type — the models are still at a lower level of complexity. — MINI model. Differential equations of these models have the analytical solutions and therefore it can possibly to calculate the control actions and functions of the forecast for calculation formulas.

*Conclusions.* This arrangement extends the range of simulation tasks and allows to analyze, at the stages of theoretical research and pre-clinical testing, the various aspects of the synthesis and test the effectiveness of the control algorithms that are relevant in diabetology.

**Keywords:** *hierarchical simulation, system regulation of blood glucose, control algorithms, preclinical testing.*



# ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

---

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.

## Требования к рукописям статей

1. Рукопись предоставляется на белой бумаге в двух экземплярах (язык — русский, украинский, английский, 10—14 с.) и электронная версия.

К рукописи прилагаются:

- аннотации — на русском и украинском языках (УДК, фамилия, инициалы автора/ов, название статьи, 5—6 строк текста, ключевые слова), на английском языке (фамилия, инициалы автора/ов, место работы, город, страна, название статьи, от 250 слов, с выделением рубрик: введение, цель, результаты, выводы, ключевые слова);
- согласие автора/ов на публикацию;
- сведения об авторе должны включать: ФИО, ученую степень, научное звание, должность, отдел, место работы, почтовый адрес организации, телефон (служ., моб., дом.), E-mail, авторские идентификаторы ORCID или ResearcherID.

2. Текст статьи подается с обязательными рубриками: введение, постановка задачи, цель, результаты, четко сформулированные выводы.

Поданные статьи обязательно направляются на рецензирование ведущим специалистами в данной области.

## Структура статьи

УДК. НАЗВАНИЕ. И.О. Фамилия / и. Организация/и. Аннотация (рус., 5—10 строк). Ключевые слова: (5—8 слов). ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛЬ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. РЕЗУЛЬТАТЫ (1—3 РАЗДЕЛА С НАЗВАНИЯМИ). ВЫВОДЫ.

Список литературы на языке оригинала (в порядке упоминания в тексте, по стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1 : 2006, ДСТУ ГОСТ 7.80 : 2007).

Список литературы — перевод источников на английский язык, фамилии и инициалы авторов — транслитерация:

Author A.A. Article. *Journal*, 2000, vol. 1, № 2 pp. 111–112.

Author A.A., Author B.B. *Book*. City : Publisher, 2000. 111 p. (in Russian).

Резюме (укр., 5—10 рядків). Ключові слова (5—8 слів).

Abstract (0,5—0,7 p.): ФИО, Название статьи на английском языке. *Название организации — на английском языке.*

С обязательными рубриками: Introduction. Purpose. Results. Conclusion. Keywords .

## Требования к текстовому файлу

Формат файла \*.doc, \*.rtf. Файл должен быть подготовлен с помощью текстового редактора Microsoft Word 2003.

Используемые стили: шрифт Times New Roman, высота 12 пт, межстрочное расстояние — полуторное. Формат бумаги А4, поля (слева, справа, сверху, внизу) 2 см.

*Формулы* набираются в редакторе формул **Microsoft Equation Editor 3.0**.

Опции редактора формул — (10,5; 8,5; 7,5; 14; 10). **Ширина формул не более 12 см.**

*Рисунки* должны быть достаточно качественными, созданы встроенным редактором рисунков Word Picture либо иными Windows-приложениями (в этом случае рисунки должны быть представлены отдельными файлами соответствующих форматов). **Ширина рисунков не более 12 см.**

*Таблицы* выполняются стандартным встроенным в Word инструментарием «Таблица».

В розничную продажу журнал не поступает

***Оформление подписки для желающих опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.***

**Подписка осуществляется:**

- ГП «Пресса»: Каталог видань України”, подписной индекс 86598;
- Подписное агенство «Укринформнаука» НАН Украины, подписной индекс 10029, [ukrinformnauka@gmail.com](mailto:ukrinformnauka@gmail.com),