

Editorial board

I.V. Sergienko — Editor-In-Chief (Glushkov Institute of Cybernetics, Kyiv, Ukraine)

V.I. Gritsenko — Editor-In-Chief (International Research and Training Center for International Technologies and Systems Kyiv, Ukraine)

L.M. Kozak — Deputy Editor (IRTCITS, Kyiv, Ukraine)

Computer Science and Information Technologies:

Abraham A. (*Machine Intelligence Research Labs, Washington USA*), Fainzilberg L.S. (IRTCITS, Kyiv, Ukraine), Gorbunovs A. (*Riga Technical University, Riga, Latvia*), Gubarev V.F. (*Institute of Space Research, Kyiv, Ukraine*), Rachkovskij D.A. (IRTCITS, Kiev, Ukraine), Wunsch D.C. (*Missouri University of Science & Technology, Rolla, USA*)

Applied Mathematics:

Anisimov A.V. (*T. Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine*), Chikrii A.A. (*Glushkov Institute of Cybernetics of the NASU, Kyiv, Ukraine*), Gupal A.M. (*Glushkov Institute of Cybernetics, Kyiv, Ukraine*), Kogut P.I. (*Dnipropetrovsk State University, Dnipro, Ukraine*), Mordukhovich Boris (*Wayne University, Detroit, USA*), Vlahavas I. (*Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece*)

Technologies of medical diagnostics and treatment:

Azarhov O.Yu. (*Priazovsky State Technical University, Mariupol, Ukraine*), Belov V.M. (IRTCITS, Kyiv, Ukraine), Kovalenko A.S. (IRTCITS, Kyiv, Ukraine), Rybak I. (*Drexel University College of Medicine, Philadelphia, USA*), Yavorsky O.V. (*Kharkiv State Medical University, Kharkiv, Ukraine*)

Biology:

Antomonov M.Yu. (*Marzyeyev Institute of Public Health, Kyiv, Ukraine*), Ermakova I.I. (IRTCITS, Kyiv, Ukraine), Knigavko V.G. (*Kharkiv State Medical University, Kharkiv, Ukraine*), Kochina M.L. (*Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv*), Navakatikyan M., (*National Centre for Classification in Health, Sydney, Australia*), Salem A.-B. M. (*Ain Shams University, Cairo, Egypt*)

The journal is included in the List of Scientific Professional Editions of the Ministry of Education and Science of Ukraine (MESU) for PhD applicants in technical and physical-mathematical sciences (order of the MES of Ukraine № 1528, 29.10.2014), biological and medical sciences (order of the MES of Ukraine № 261, 06.03.2015)

The journal is included in Google Scholar, information resource Scientific Periodicals of Ukraine (V.I. Vernadsky NLU), ULRICHS WEB, Crossref (DOI), ROAD, DOAJ, Electronic Journals Library (Germany)

Certificate of State Registration KB № 12649-1533P, 14.05.2007

Editorial address:

03187 Kyiv, Acad. Glushkov av., 40

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

Phon: 503 95 62. E-mail: kvt.journal@kvt-journal.org.ua, <http://kvt-journal.org.ua/>

Editor *N.A. Charchiyan*

Computer layout *A.V. Tupalskiy*

Підп. до друку 27.09.2019. Формат 70×108/16. Гарн. Times New Roman.
Ум. друк. арк. 10,33. Обл. вид. арк. 9,84. Тираж 72. Зам. №

Віддруковано ВД “Академперіодика” НАН України
01004, Київ 4, вул. Терещенківська, 4.

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

Cybernetics and Computer Engineering

3 (197)/2019

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

CONTENTS

Informatics and Information Technologies

ГРИЦЕНКО В.І., СУРОВЦЕВ І.В., БАБАК О.В. Система бездротового зв'язку 5G	5
---	---

Intelligent Control and Systems

BARSEGHYAN V.R. The Problem of Control of Membrane Vibrations with Non-Separated Multipoint Conditions at Intermediate Moments of Time	20
ZHITECKII L.S., AZARSKOV V.N., SOLOVCHUK K.Yu. Solving a Problem of Adaptive Stabilization for Some Static MIMO Systems	33

Medical and Biological Cybernetics

BONDARENKO M.A., KNIGAVKO V.G., ZAYTSEVA O.V., RUKIN A.S. Mathematical Modeling of DNA Damages in Irradiated Cells at Different Oxygenation Degrees ..	51
ARALOVA N.I., ARALOVA A.A. Mathematical Models of Conflict Controlled Processes under Functional Self-Organization of the Respiratory System	65
KIFORENKO S.I., HONTAR T.M., ORLENKO V.L., IVASKIVA K.Y., OBELETS T.A. Information Technology for Supporting Self-Control in the Formation of a Rational Lifestyle for Diabetics Patients	80

To Attention of Authors	100
-------------------------------	-----

Cybernetics and Computer Engineering

3 (197)/2019

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

CONTENTS

Informatics and Information Technologies

GRITSENKO V.I., SUROVTSEV I.V., BABAK O.V. 5G Wireless Communication System	5
---	---

Intelligent Control and Systems

BARSEGHYAN V.R. The Problem of Control of Membrane Vibrations with Non-Separated Multipoint Conditions at Intermediate Moments of Time	20
ZHITECKII L.S., AZARSKOV V.N., SOLOVCHUK K.Yu. Solving a Problem of Adaptive Stabilization for Some Static MIMO Systems	33

Medical and Biological Cybernetics

BONDARENKO M.A., KNIGAVKO V.G., ZAYTSEVA O.V., RUKIN A.S. Mathematical Modeling of DNA Damages in Irradiated Cells at Different Oxygenation Degrees ..	51
ARALOVA N.I., ARALOVA A.A. Mathematical Models of Conflict Controlled Processes under Functional Self-Organization of the Respiratory System	65
KIFORENKO S.I., HONTAR T.M., ORLENKO V.L., IVASKIVA K.Y., OBELETS T.A. Information Technology for Supporting Self-Control in the Formation of a Rational Lifestyle for Diabetics Patients	80

To Attention of Authors	100
-------------------------------	-----

Кібернетика 3 (197)/2019 та обчислювальна техніка

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

ЗМІСТ

Інформатика та інформаційні технології

ГРИЦЕНКО В.І., СУРОВЦЕВ І.В., БАБАК О.В. Система бездротового зв'язку 5G 5

Інтелектуальне керування та системи

БАРСЕГЯН В.Р. Завдання керування коливаннями мембрани з нерозділеними багатоточковими умовами у проміжні моменти часу 20

ЖИТЕЦЬКИЙ Л.С., АЗАРСКОВ В.М., СОЛОВЧУК К.Ю. Розв'язування однієї задачі адаптивної стабілізації деяких статичних МІМО систем 33

Медицина та біологічна кібернетика

БОНДАРЕНКО М.А., КНИГАНКО В.Г., ЗАЙЦЕВА О.В., РУКІН О.С. Математичне моделювання пошкоджень ДНК опромінених клітин за різного ступеня їхньої оксигенації 51

АРАЛОВА Н.І., АРАЛОВА А.А. Математичні моделі конфліктно-керованих процесів у разі функціональної самоорганізації системи дихання 65

КІФОРЕНКО С.І., ГОНТАР Т.М., ОРЛЕНКО В.Л., ІВАСЬКІВА К.Ю., ОБЕЛЕЦЬ Т.А. Інформаційна технологія підтримки самоконтролю у формуванні раціональної життєдіяльності у пацієнтів хворих на діабет 80

До уваги авторів 100

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

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

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

Для наукових співробітників, інженерів, аспірантів і студентів ВНЗ відповідного фаху.

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.

Журнал «Кибернетика и вычислительная техника» - до 2019 р., ISSN 2519-2205 (Online), ISSN 0454-9910 (Print)

Журнал «Cybernetics and Computer Engineering» - з 2019 р., ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print)

Адрес редколлегии:

03187 Киев, 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 Сайт: kvt-journal.org.ua

DOI: <https://10.15407/kvt197.03.005>

УДК 004.72

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

СУРОВЦЕВ І.В., д-р. техн. наук, старш. наук. співроб.,
зав. відд. екологічних цифрових систем
e-mail: dep175@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com

БАБАК О.В., канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
старш. наук. співроб. відд. екологічних цифрових систем
e-mail: dep175@irtc.org.ua

Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

СИСТЕМА БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

Вступ. Високошвидкісна мобільна система зв'язку 5G активно розвивається у багатьох країнах світу. Важливо розуміти наукові та технічні передумови бездротової технології 5G, щоб ефективно використовувати їх у нових інтелектуальних інформаційних технологіях.

Мета статті — проаналізувати архітектурні особливості, методи комунікації та завдання, покладені в основу проектування технології 5G.

Результати. Показано, які конкретні технічні та технологічні проблеми повинні бути вирішені для досягнення широким можливостей мобільного зв'язку 5G. Водночас, технологію 5G незабаром буде стандартизовано та впроваджено у всьому світі, включаючи Україну. Можливість підключення безлічі зовнішніх пристроїв в умовах електромагнітних перешкод з використанням LTE-з'єднань у разі розподілення по великій площі та за суворих вимог до затримок виконання технологічних процесів дає змогу стверджувати, що технологія бездротового зв'язку 5G є необхідною і незамінною в дослідженнях і виробництві.

Висновки. Бездротові технології 5G та хмарні обчислення є необхідними умовами для створення швидкісного мобільного зв'язку, кіберфізичних систем та надання широкого спектру послуг споживачам.

Ключові слова: технологія 5G, мобільний зв'язок, архітектура зв'язку 5G, Інтернет, кіберфізичні системи.

ВСТУП

Технології мобільного бездротового зв'язку стали невід'ємною частиною нашого життя, зумовлюючи значний соціально-економічний вплив на розвиток країн світової спільноти. Різке зростання кількості мобільних пристроїв і обсягу трафіку привів до появи технології бездротового зв'язку 4G, надаючи засіб для широкосмугових мобільних послуг у будь-який час та в будь-якому місці. Однак, потреби ринку настільки великі, що вже є розробленою і розгортається мережа мобільного зв'язку 5G. Перспективи її використання пов'язують зі створенням нових інтелектуальних інформаційних технологій та систем. Бездротовий зв'язок 5G вже частково впроваджено у Німеччини, Великобританії, США, Японії, Китаї, Південній Кореї. З огляду на це, вкрай важливо розуміти, на яких наукових і технічних засадах побудовано технологію 5G. Дуже коротко зупинимось на історичних і практичних аспектах створення нової технології 5G і розробленні, яке потрібно виконати для її розвитку. Порівняння всіх поколінь технологій бездротового зв'язку (1G-5G) відображено в Табл. 1.

Аналізуючи хронологію еволюції поколінь бездротового зв'язку, можна зробити висновок, що технологію 5G буде стандартизовано і розгорнуто в світі на початку 2020-х років. Запропонована стаття присвячена деяким важливим питанням технології бездротового зв'язку 5G, яка використовується під час розроблення кіберфізичних систем, що активно розвиваються.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зараз для мобільного зв'язку, обслуговування соціальних мереж і веб-сайтів використовують технологію бездротового зв'язку четвертого покоління (4G), призначену для забезпечення високих швидкостей передачі даних і великої пропускної здатності мережі. До розгляду можливостей технології 5G зупинимось на історичному розвитку, перевагах та недоліках сучасної технології мобільного зв'язку 4G.

Таблиця 1. Порівняння характеристик поколінь технологій бездротового зв'язку

Технологія	1G	2G	3G	4G	5G
Розгортання	1970 –1980	1990-2001	2001-2010	2011-2020	2021
Пропускна здатність	2 Кбіт/с	1,6 Мбіт/с	2 Мбіт/с	1 Гбіт/с	вище 1 Гбіт/с
Смуга частот	-	1,25 МГц	5 МГц	20 МГц	вище 20 МГц
Технологія	Аналоговий стільниковий, технологія FM-радіо	Цифровий стільниковий, технологія GSM	CDMA 2000 (1xRTT, EVDO) UMTS, EDGE	Wi-Max LTE Wi-Fi	WWW (скоро)

В системі 4G прийнято такі зведені вимоги IMT-Advanced [1]:

- пікова швидкість передачі даних для високої мобільності (до 360 км / г) 100 Мбіт / с, для стаціонарних або мобільних користувачів — 1 Гбіт / с;
- затримка в призначеній для користувача площині менше за 10 мс;
- смуга пропускання від 40 МГц до 100 МГц.

Для забезпечення переходу на новий рівень продуктивності систему стільникового зв'язку LTE (Long Term Evolution) було вдосконалено від рівня 3GPP (3G) до 4G (вище 4G) з версіями стандарту LTE Release від R-8 до R-13, останній з яких було прийнято у 2013 році.

Системи 4G були спочатку запропоновані двома технологіями-конкурентами, а саме: технологією глобальної сумісності для мікрохвильового доступу (WiMAX) та технологією довгострокового розвитку (LTE) [2], основаної на 3GPP, який став найпоширенішим стандартом для мобільних послуг 4G на сьогодні. Це дає можливість користувачам безперешкодно перемикатися між провайдером бездротового зв'язку, використовуючи тепер дійсно глобальний стандарт LTE-A (IMT-Advanced 4G), прийнятий у 2010 році [3].

Зараз найпоширенішим засобом зв'язку для інтелектуальних мобільних пристроїв є стандарт IEEE 802.11, більш відомий за маркетинговим терміном як WiFi. Набір стандартів, що лежить в основі технології та визначений для бездротової локальної мережі (WLAN), дає змогу розділити протокол доступу до середовища і до специфікації фізичного рівня [4]. Залежно від фактичної реалізації, фізичний рівень ґрунтується на базових швидкостях в 1–2 Мбіт / с, смугах 2,4 ГГц та інфрачервоному LOS (поширення радіоліній прямої видимості). Завдяки розподілу на два рівня, визначення базових каналів може виконуватися окремо від реальних механізмів, що уможливорює вільне застосування різних промислових, наукових і медичних діапазонів (ISM) у всьому світі. Згодом з'явилися просунутіші версії від 802.11a до 802.11n і 802.11ac, які збільшують пропускну здатність за рахунок об'єднання каналів та робочих змін у смугах частот понад 300 і 400 Мбіт / с [5].

Термінали користувача у мережі 4G повинні мати можливість вибирати цільові бездротові системи. Базові станції періодично транслюють сигнальні повідомлення у наявні системи GSM для передплати на послуги мобільного зв'язку. Однак цей процес є складним у гетерогенних системах 4G через відмінності в бездротових технологіях та протоколах доступу. Для надання бездротових послуг у будь-який час і в будь-якому місці мобільність терміналу є обов'язковою умовою в інфраструктурі 4G. Мобільність дає змогу клієнтам переміщатися по географічних регіонах через кордони бездротових мереж. Існує дві основні проблеми мобільності терміналу: керування місцем розташування та керування передачею. За керування місцем розташування система відстежує та знаходить мобільний термінал для можливого підключення. Керування розташуванням включає в себе оброблення всієї інформації про роумінг терміналу, такої як оригінальні і поточні осередки, інформація про автентифікацію тощо. З іншого боку, керування передачею обслуговування підтримує постійний зв'язок, коли термінал переміщається. Мобільний IPv6 (MIPv6) — це стандартизований IP-протокол мобільності для бездротових систем IPv6. У цій схемі кожен термінал має домашню адресу IPv6. Кожний раз, коли термінал виходить за межі локальної мережі, домашня адреса стає недійсною і тер-

мінал отримує у поточній мережі нову службову IPv6-адресу. Крім схеми з широким доступом, вдосконалені методи передачі каналу з багатьма входами та виходами (MIMO) і значну координацію між декількома стільниковими вузлами, що має назву скоординованої багато точкової передачі/прийому (CoMP), було прийнято в якості ключових методів для LTE [6].

Мета статті — проаналізувати архітектурні особливості, методи комунікації та завдання, покладені в основу проектування технології 5G.

НОВІ МОБІЛЬНІ БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ — ОСНОВА ТЕХНОЛОГІЇ 5G

Мережі п'ятого покоління 5G можуть бути повноцінним бездротовим зв'язком без обмежень — World Wide Wireless Web (WWWW). На цей момент, 5G перестав бути терміном, який офіційно використовується для конкретної специфікації в офіційному документі, оприлюднюється телекомунікаційними компаніями або органами стандартизації. Кожна нова версія підвищує продуктивність системи і додає нові можливості з новими галузями застосування. IEEE 802.16 — це серія стандартів бездротового широкосмугового зв'язку, затверджених Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), яка отримала назву «WiMAX» (Всесвітня сумісність для мікрохвильового доступу) галузевого альянсу WiMAX Forum. IEEE 802.16 стандартизує радіоінтерфейс і пов'язані з ним функції бездротового локального зв'язку 5G [7].

Для досягнення проектних можливостей мобільної мережі було поставлено конкретні завдання, які визначаються як 10 ключових фундаментальних блоків для 5G [1]:

1. Еволюція багаторівневої технології багатоадресного доступу (RAT). 5G, швидше за все, буде набором RAT, що включає в себе еволюцію наявних технологій, доповнену новими революційними розробками. LTE повинен розвиватися, щоб використовувати розширене формування променя для подальшого поліпшення можливостей подолання перешкод у сценаріях розгортання з малою щільністю для малих осередків. WiFi [8] також повинен розвиватися, щоб краще використовувати доступний неліцензійний спектр для забезпечення широкосмугових бездротових каналів зі швидкостями передачі даних до декількох Гбіт / с, підтримуючи одночасну передачу до чотирьох потоків з використанням технології для багатьох користувачів MIMO [9]. Так, великі телекомунікаційні компанії, такі як Qualcomm, останнім часом працюють над розробленням LTE в неліцензованому спектрі та над інтеграцією приймачів 3G / 4G / WiFi у єдиний модуль багаторежимної базової станції (BS) [10].

2. Розгортання дуже малих осередків — ще одне слушне рішення, що дає змогу впоратися з обмеженням ємності, одночасно додаючи в систему значну енергоефективність. Це інноваційне рішення, що зветься HetNets (гетерогенні мережі мобільного інтернету), може допомогти значно підвищити спектральну ефективність зони. Воно включає два різні способи реалізації: «накладення стільникової системи на маленькі комірки з однаковою технологією, тобто на мікро-, піко- або фемтосоти; накладення з невеликими сотами різних технологій на відміну від стільникового (наприклад, високошвидкісний пакетний доступ (HSPA, LTE, WiFi і т.д.)» (див. [1], с. 7). Однак зменшення

розміру комірки збільшує міжсотові перешкоди та необхідну керувальну сигналізацію. Щоб подолати цей недолік, необхідно удосконалити методи керування міжсотовими перешкодами на системному рівні разом з додатковими методами подолання перешкод [11–13].

3. Самоорганізація мережі. Можливість мережі самоорганізовуватися (SON) є ще одним ключовим компонентом 5G. У міру того, як популяція маленьких клітин збільшується, SON отримує більшого імпульсу [14, 15]. «Майже 80% бездротового трафіку генерується в приміщенні. Щоб нести цей величезний трафік, потрібні занадто щільні розгортання невеликих осередків в будинках, які встановлюються і обслуговуються в основному користувачами, поза контролем операторів. Ці маленькі внутрішні осередки повинні бути самоналагоджувальними та встановлюватися у режимі «підключи і працюй». Крім того, вони повинні мати можливість SON інтелектуально налаштовуватися до сусідніх малих стільників, щоб мінімізувати міжсотові перешкоди. Наприклад, невеликий осередок може зробити це шляхом автономної синхронізації з мережею та розумним налаштуванням радіопокриття» (див. [1], с. 8).

4. Зв'язок між пристроями різних типів. Зв'язок МТС (поліпшений сеанс зв'язку з під'єднанням одного або двох кінцевих користувачів) є ще одним фундаментальним аспектом 5G, який ставить дві основні проблеми в мережі. По-перше, кількість пристроїв, які необхідно підключити, надзвичайно велика. Інша проблема — це зростання попиту у реальному часі та дистанційне керування мобільними пристроями (наприклад, транспортними засобами) за допомоги мережі. Для цього потрібно мати надзвичайно низьку затримку, яка не перевищує мілісекунди, та так званий «тактильний Інтернет» [16–18], який вимагає 20-разового покращення затримки від 4G до 5G.

5. Розроблення міліметрових хвиль RAT. «Традиційний спектр на частоті менше за 3 ГГц стає все перевантаженішим, це призводить до наближення розроблених RAT до межі пропускну здатності Шеннона. Проводять масштабні дослідження з використанням діапазонів cmWave та mmWave для мобільного зв'язку. Є три основні перешкоди для мобільного зв'язку mmWave. По-перше, втрати в тракті відносно вищі в цих смугах порівняно зі звичайними смугами частот, які є нижчими за 3 ГГц. По-друге, електромагнітні хвилі мають тенденцію поширюватися у напрямку прямої видимості (LOS), що робить радіолінії уразливими для блокування рухомими об'єктами або людьми. Нарешті, втрати проникнення через будівлі в цих діапазонах істотно вище, блокуючи зовнішні RAT для внутрішніх користувачів» (див. [1], с. 8). Крім того, передачі в міліметровому діапазоні можуть зазнавати значного ослаблення також через сильний дощ, оскільки краплі дощу мають приблизно такий саме розмір, що і довжина радіохвиль (міліметри), тому вони можуть викликати розсіювання. Незважаючи на ці обмеження, є безліч переваг для зв'язку mmWave. Планується виділення доступного неліцензованого спектру 9 ГГц у смузі mmWave 60 ГГц, що може повністю змінити мобільний зв'язок, надаючи надширокі смугові бездротові канали, які можуть безперешкодно сполучати дротові та бездротові мережі. Інші переваги зв'язку mmWave — це малі розміри антен та їхня мала відстань, що дає можливість об'єднувати десятки антенних елементів всього на одному квадратному сантиметрі. Це, в свою чергу, дає змогу досягати дуже високих коефіцієнтів посилення формування проме-

ню у відносно невеликих областях. Використовуючи інтелектуальні фазовані антенні решітки, можна повною мірою використовувати просторову ступінь свободи бездротового каналу (застосовуючи розширений доступ з просторовим розділенням каналів (SDMA)), що може ще більше підвищити пропускну здатність системи [19–20].

6. Модернізація транзитних посилань [21] «є наступною критичною проблемою мобільного зв'язку 5G. Паралельно з поліпшенням RAN необхідно також модернізувати транзитні з'єднання для перенесення величезного обсягу призначеного для користувача трафіку, що генерується в комірках. В іншому випадку, транзитні з'єднання стануть вузьким місцем, погрожуючи правильній роботі всієї системи. Проблема посилюється відповідно до збільшення популяції дрібних комірок. Зокрема, двоточкові лінії зв'язку mmWave, які використовують антенні решітки з дуже гострими променями, можуть розглядатися для надійної самостійної зворотної передачі без втручання в інші стільники або в лінії доступу» (див. [1], с. 9).

7. Енергоефективність залишається важливою проблемою проектування під час розроблення системи 5G. За даними на 2012 рік, «інформаційні та комунікаційні технології споживають до 5% електроенергії, виробленої у всьому світі, і забезпечують приблизно 2% глобальних викидів парникових газів, що еквівалентно викидам, які створює вся авіаційна промисловість» (див. [1], с. 9). Отже, необхідно використовувати енергоефективні підходи до проектування RAN і транзитних з'єднань, які призначені для обладнання користувача [22]. Особливо важливо враховувати, що підвищення енергоефективності надає можливість продовжити термін використання батареї як один з найголовніших критеріїв для більшості споживачів, які купують мобільний телефон.

8. Розподіл нового спектра є ще однією важливою проблемою 5G для забезпечення бездротового зв'язку. Стрімке збільшення потоку та трафіку навряд чи можна контролювати, підвищуючи тільки спектральну ефективність або щільність. Крім технологічних інновацій, для задоволення попиту потрібно збільшити ширину спектру [23], наприклад, шляхом «розподілу смуги близько 100 МГц у смузі 700 МГц, смуги 400 МГц на частоті близько 3,6 ГГц, смуги завширшки кілька ГГц у см- або мм-смугах частот» (див. [1], с. 10).

9. Спільне використання спектру. «Процес регулювання розподілу нового спектру часто займає дуже багато часу, тому ефективне використання доступного спектру завжди має вирішальне значення. Великий діапазон радіоспектру традиційно виділяється для військових радарів, де спектр використовується постійно не повністю або не у всьому географічному регіоні» (див. [1], с. 10). Фірма Qualcomm запропонувала модель авторизованого / ліцензійного спільного доступу до використання спектру в невеликих сотах (з обмеженням покриттям) без втручання користувача, що може компенсувати дуже повільний процес очищення спектра. Для спільного використання ліцензійних та неліцензійних спектрів може бути використано концепції когнітивного радіо (Cognitive Radio) або інші моделі [24].

10. Віртуалізація RAN є не менш важливим фактором 5G, який уможливорює спільне використання бездротової інфраструктури між декількома операторами. Для мережі віртуалізації, інтелект повинен бути витягнутий з обладнання RAN і централізовано налаштовуватися з використанням програ-

много забезпечення, що може бути зроблено на різних рівнях» (див. [1], с. 10). Це може надати багато переваг бездротовому зв'язку за рахунок: спільного використання мережі; поліпшеної енергоефективності та простоти обслуговування обладнання; керування необхідними ресурсами на вимогу; скорочення часу виходу на ринок інноваційних послуг; швидкого усунення пошкоджень завдяки підвищеній прозорості мережі [25]. «Можуть бути використані багаторежимні RAN, що підтримують 3G, 4G або WiFi, в яких різні радіоінтерфейси можуть вмикатися/вимикатися для кінцевих користувачів за допомоги центрального програмного блоку керування» (див. [1], с. 11).

АРХІТЕКТУРА ТА ІНТЕРНЕТ 5G

Передбачається, що з 5G будуть легко інтегруватися наявні RAT (GSM, HSPA, LTE і WiFi) та нові, винайдені для смуг mmWave. Технологія mmWave зробить революцію у мобільній індустрії не тільки завдяки великому обсягу доступного спектру в цій смузі (що уможливило використання бездротових каналів Gbps), але також завдяки зменшенню розмірів антен, що дає змогу виготовляти антенні решітки з сотнями або тисячами антенних елементів. Інтелектуальні антени з формуванням променя та можливістю фазированої решітки будуть використовуватися для направлення променя антени у потрібне місце з високою точністю, повернутого електронним способом за допомоги зсуву фази. Технологія mmWave забезпечить надширокі смугові транзитні з'єднання для передачі трафіку до малих базових або ретрансляційних станцій, забезпечуючи додаткову гнучкість розгортання для операторів порівняно з провідною (мідною або оптоволоконною) транзитною лінією. Поряд з розробленням нових RAT і розгортанням дуже щільних невеликих осередків, наявні RAT будуть продовжувати розвиватися, щоб забезпечити вищу енергоефективність. Отже, технологія mmWave, дуже щільна мережа HetNet, віртуалізація RAN і масивний MTC — все це є головними напрямками, які розглядають для модернізації стільникової системи для досягнення можливостей 5G [26].

Передбачається, що пристрої користувача 5G будуть багаторежимними інтелектуальними пристроями. Вони будуть досить розумними, щоб автономно вибирати правильний інтерфейс для підключення до мережі на основі якості каналу, заряду батареї, енергоефективності різних RAN і вимог до якості обслуговування у програмному забезпеченні. Ці розумні й ефективні 5G пристрої зможуть підтримувати 3D-мультимедіа зі швидкістю до 10 Гбіт / с.

Хмарне обчислення потенційно може бути застосовано до RAN та мобільних користувачів, які можуть формувати віртуальний пул ресурсів для керування мережею. Перенесення застосунків через хмару ближче до кінцевого користувача знижує затримку зв'язку під час керування в реальному часі. Сучасна концепція хмарної мережі в основному включає центри оброблення даних. Віртуалізація мобільних мереж підштовхне цю концепцію до транзитного з'єднання і RAN, щоб уможливити спільне використання транзитних з'єднань та базових станцій між різними операторами.

Сучасний Інтернет надає багату палітру послуг [18], що включає: мультимедійні розваги (аудіо, відео та онлайн-ігри високої чіткості), персоналізацію (застосунки, які за присутністю забезпечують визначення свого місцезнаходження), соціальні системи (форуми, контакти, Facebook, Messenger), вкрай

важливі програми (електронна комерція, електронна охорона здоров'я, громадська безпека). Майже кожний фізичний об'єкт, який ми бачимо (одяг, автомобілі, поїзди тощо), буде підключено до мобільної системи, створивши Інтернет речей (IoT) [27]. Усі види послуг і застосунки, від низької пропускну здатності (дані датчиків та IoT) до вищої (потоківідео високої чіткості), повинні бути сумісні для підтримки різних затримок і пристроїв. Наприклад, інтерактивне відео, потоки відеоконференцій, застосунки VoIP (Voice over IP — голосовий зв'язок за Інтернет протоколом) вимагають не більше за 150 мс затримки, 30 мс тремтіння і не більше за 1% втрати пакетів, щоб підтримувати оптимальну якість сприйняття користувачем.

Стає зрозумілим, що в мережах зв'язку настає переломний момент з поступовим впровадженням програмно визначеної мережі (SDN) та віртуалізації мережевих функцій для забезпечення необхідної гнучкості та реактивності. Так, SDN пропонує відокремити площину керування мережею від площини даних (наприклад, у хмарі), а віртуалізація мережі дає можливість створювати безліч різних функцій логічної мережі над однією загальною фізичною інфраструктурою.

Ці підходи надали змогу скоротити розрив між фізичним та цифровим світом і уможливили інтегрування пристроїв у великомасштабні платформи, що складають Smart City, Smart Agricole та багато інших сценаріїв. У них інформацію, яку отримують від різних типів давачів (наприклад, температура, вологість, забруднення, відео), об'єднано з алгоритмами керування для вироблення автоматичних рішень виконавчих пристроїв (наприклад, зміна світлофорів для зменшення забруднення CO₂ в перенаселених районах в Smart Traffic, оптимізація споживання води в сценаріях Smart Utilities або автоматизація поливу сільськогосподарських культур в сценаріях «Розумне землеробство»).

Зазначені аспекти зумовлено зростанням залежності від хмарних обчислень, коли різні моделі, такі як програмне забезпечення як послуга (SaaS), платформа як послуга (PaaS), інфраструктура як послуга (IaaS), мережеві операції і послуги, віртуально розміщують в Інтернеті [28]. Зокрема, SaaS є модель хмарного сервісу для доставки програмного забезпечення, де програмне забезпечення і відповідні дані розміщуються в хмарі, а доступ може бути виконано за допомогою простої навігації у браузері. Крім того, модель PaaS дає можливість надавати послуги нищого рівня, такі як операційна система, веб-сервер або інтерпретатор комп'ютерної мови. Наприклад, використовуючи PaaS, програмісти можуть розробляти власні програми, не встановлюючи важке програмне забезпечення на власних комп'ютерах. Крім того, модель IaaS надає мережеві інфраструктури, включаючи сервери в центрах оброблення даних (DC), які клієнти можуть використовувати в хмарах на платній основі (наприклад, Elastic Compute Cloud від Amazon). Отже, оскільки віртуалізація дає змогу емулювати комп'ютерне апаратне забезпечення, то кілька таких віртуальних комп'ютерів можуть одночасно працювати на одному фізичному комп'ютері, всю інфраструктуру і мережевий транспорт буде ефективно надано в якості служби з різними сценаріями, починаючи від мережі підприємства до поліпшення всього керування інтернет-провайдером. Це долає наявні бар'єри для збільшення пропускну здатності сервісів. Замість того, щоб вимагати від провайдера фізичного розширення ресурсів, треба покладатися на загальний віртуалізований розподілений пул ресурсів мережі, оброблення та зберігання даних.

Забезпеченість співпраці і тенденція до контекстно-орієнтованих мереж відкрили нові можливості в сфері хмарних сервісів, що виходять за рамки D2D («від пристрою до пристрою»), це так звані комунікації «пристрій-хмара» [1]. Фактично, пропозиція загальних ресурсів безлічі клієнтів стала реальністю ще на початку 1990-х років. Згодом, з розширенням мережевих клієнт-серверних комунікацій ця парадигма перетворилася у термін «хмара». В останнє десятиліття цей підхід також називався AAS, або «сервісом», в результаті чого одним з найбільш поширених явищ було використання SAAS (Software As A Service). Сприйняття мобільних пристроїв змістилося з орієнтованого на користувача мультимедійного засобу зв'язку на просто «ресурс», який може запропонувати безліч послуг з точки зору обчислювальної потужності, зберігання і контексту. Тому, якщо цей ресурс може стати частиною хмари і сформувати пул віртуальних ресурсів, то це може зіграти провідну роль як технологічна і сервісна платформи для 5G і вище. Наприклад, в сценарії хмарних обчислень окремі вузли оброблення забезпечують обчислювальну потужність для пулу ресурсів хмари, який, в свою чергу, є доступним споживачеві послуг. Однак розташування вузлів, які підтримують програму, або їхні фізичні реалізації не мають значення для споживача, оскільки важливим є тільки доступ до пулу загальних ресурсів хмари. Це дає змогу постачальнику послуг оптимізувати місце розміщення, конфігурацію і планування доступності ресурсів [29].

Віртуальний хмарний пул, включаючи мобільні пристрої, уможливорює надання додаткових ресурсів, які є доступними тільки в мобільному контексті, таких як бездротовий зв'язок, виконавчі механізми та інші різні функції. Включення самих мобільних пристроїв в пули ресурсів різних потенційних хмарних сервісів забезпечує більшу гнучкість.

Загальноприйнятим для більшості сучасних сценаріїв є те, що окремі вузли обмінюються даними з використанням бездротових ліній ближньої дії крім підключення до каналу далекого зв'язку, наприклад, стільникових мереж або мереж точок доступу. Отже, компроміс між передачею на великі і на короткі відстані є звичайним явищем. Бездротові глобальні мережі зазвичай є стільниковими мережами. Крім того, є можливими інші типи з'єднання: прямі двоточкові або двоточкові бездротові з'єднання, які основано на мікрохвильовому або оптичному зв'язку з використанням технологій прямої видимості (LOS).

НОВІ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗДРОВОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ 5G

За останні 5 років технології мобільного зв'язку 5G зробили неймовірний стрибок у своєму розвитку, особливо в бік підтримки робототехніки промислового виробництва. Інтернет речей (IoT), раніше розглянутий як окремий об'єкт досліджень, став частиною вивчення кіберфізичних систем (CPS).

Кіберфізична система (Cyber Physical Systems — CPS) складається з набору пристроїв, які взаємодіють один з одним та з фізичним світом [30]. CPS об'єднує обчислювальні і комунікаційні аспекти разом з методами контролю і моніторингу. Основною метою CPS є керування фізичним процесом за допомоги зворотного зв'язку і адаптація до нових умов в реальному часі. Різні програми CPS можна знайти практично у всіх сферах людського життя, таких як виробничі системи, інтелектуальні мережі, робототе-

хніка, транспортні системи, медичні пристрої, військові, домашні мережі, інтелектуальні будівлі тощо. Прикладом кіберфізичної системи є розумна фабрика, в якій механічні системи, роботи, сировина і продукти між собою взаємодіють. Ця взаємодія надає можливість машинному інтелекту здійснювати моніторинг і контроль операцій на всіх рівнях підприємства.

CPS містить мережу зв'язку, людино-машинні інтерфейси і механічні, електричні та електронні гетерогенні елементи, які керують програмним забезпеченням. Це складне завдання — зрозуміти взаємодію фізичного, кібернетичного і людського світів. Системні моделі будуть визначати еволюцію кожного стану системи у часі. Всеосяжна модель буде необхідна для інтеграції відповідних системних моделей під час розгляду всіх можливих динамічних взаємодій. Вона є керувальною програмою, яка забезпечує детерміновану поведінку для кожної підсистеми. Поточні інструменти проектування необхідно постійно оновлювати, щоб врахувати взаємодію між різними системами, їхніми інтерфейсами та абстракціями.

Починаючи з 2011 р., Німеччина впроваджує свою програму «Industry 4.0», яка активно використовує в промисловості інтелектуальні роботи, адаптивне виробництво і системи самонавчання [31]. В рамках цієї ініціативи було розроблено багато принципово нових концепцій, які привели до квантового стрибку в мережі людей, машин, роботів та продуктів. Лідери виробництва об'єднують інформаційні технології та операційні технології для створення цінності абсолютно новими способами. Кіберфізичні виробничі лінії є найпередовішими сьогодні, але будуть стандартом завтрашнього дня. Комбінація бездротових давачів і високопродуктивних мереж зв'язку, таких як 5G, грає ключову роль у цьому процесі, забезпечуючи збір даних з рівня цеху (виробничі лінії) і передачу даних в хмарні системи для безперервного моніторингу та контролю. Водночас, обчислення в кіберфізичній системі виконуються в потужному, інтелектуальному та розподіленому обчислювальному середовищі, яке називають платформою Industrial Cloud, що вбудована в мережу і живиться даними. Цифрування заводських операцій, що забезпечується технологіями CPS, дає можливість цьому сприяти. Цифрові інструменти зможуть контролювати всі процеси виробництва, збираючи дані з тисячі давачів, щоб створити цифрове зображення реалізованого товару, яке зазвичай називають «цифровою тінню».

ВИСНОВКИ

Високоякісний бездротовий зв'язок має важливе значення для концепції сучасного цифрового підприємства. Дротяний зв'язок зі складними кабелями був би неможливий в цьому постійно мінливому оточенні через те, що модернізація кабелю тягне за собою високі експлуатаційні витрати. Бездротовий зв'язок поєднає всі фізичні елементи виробничого підприємства з машинними (обчислювальними) елементами, спроможними збирати та обробляти величезні обсяги даних з хмарою, яка відповідає за ці операції. Можливість підключення безлічі зовнішніх пристроїв з використанням LTE-з'єднань в умовах електромагнітних перешкод та за суворих вимог до затримок виконання технологічних процесів дає змогу стверджувати, що технологія бездротового зв'язку 5G є необхідною та незамінною в дослідженнях і виробництві.

Розгортання мереж 5G, бізнес моделі операторів і конкретні сценарії все ще знаходяться на ранній стадії розроблення навіть на передових споживчих ринках. Зауважимо, що технологія 5G не тільки надає нові можливості операторам, але й забезпечує значне розширення спектру послуг для користувачів.

Багато країн усвідомили стратегічну важливість бездротового зв'язку 5G і розробили національні плани його розвитку, щоб допомогти своєчасному розгортанню нових мереж 5G, а також, щоб стимулювати появу нових послуг. Водночас, особлива увага приділяється орієнтації на конкретні потреби місцевого ринку. Подібні ініціативи можуть включати створення комітетів на високому рівні з метою прийняття нормативної бази і спонсування національних випробувальних майданчиків для тестування 5G.

На всій території України впроваджується технологія мобільного бездротового зв'язку 4G. Розгортання технології 5G є питанням недалекого майбутнього, воно знаходиться на стадії тестування та розроблення [33].

Планується кілька етапів впровадження мереж 5-го покоління: спочатку запрацює бездротовий зв'язок 5G NR Non stand-alone, який буде використовувати вже наявну мережу 4G LTE eNB; потім технологія зв'язку 5G отримає власні частоти для збільшення пропускної спроможності та швидкості передачі інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rodriguez J. (Ed.) *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Wiley, 2015. 333 p. ISBN: 1118867521, 9781118867525.
2. Pankaj Sharma. Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network. *IJCSMC*. 2013. Vol. 2. no 8. P. 47–53. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/8e32/078c7b0848c5e8c573861878cdb417e89e.pdf>
3. Liu L., Chen R., Geirhofer S. Downlink MIMO in LTE-Advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO. *IEEE Communications Magazine*. 2012. № 50(2) P. 140–147.
4. Jordan R. and Abdallah C.T. Wireless Communications and Networking: An Overview *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2002. Vol. 44. no. 1. 185–193.
5. IEEE, “Approved Draft Standard for IT – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – LAN/MAN – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications – Amd 4: Enhancements for Very High Throughput for operation in bands below 6GHz”. 2013. P. 1–456.
6. Palaskas Y., Ravi A. and Pellerano S. ‘MIMO Techniques for High Data Rate Radio Communications’, *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, 2008. CICC 2008.
7. Hu Fei. Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective. CRC Press, 2016. 561 p. ISBN-10: 1498739547. ISBN-13: 978-1498739542. URL: https://www.broadcom.com/docs/press/80211ac_for_Enterprise.pdf
8. *Broadcom*. World's First 5G WiFi 802.11ac SoC. 2012. URL: https://www.broadcom.com/docs/press/80211ac_for_Enterprise.pdf
9. Wallace J.W. and Jensen M.A. Mutual Coupling in MIMO Wireless Systems: A Rigorous Network Theory Analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2004. Vol. 3. no. 4. P. 1317–1325.
10. *Qualcomm* (2013a) 1000x: More Spectrum – Especially for Small Cells. URL: <https://www.qualcomm.com/documents/1000x-more-spectrum-especially-small-cells>
11. Yavuz M., Meshkati F., Nanda S. Interference Management and Performance Analysis of UMTS/HSPA+ Femtocells. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 6. no. 9.
12. Tudzarov A., Janevski T. Functional Architecture for 5G Mobile Networks. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2011. № 3(2): P. 65–78.

13. Zahir T., Arshad K., Nakata A. and Moessner K. Interference Management in Femto-cells. *Communications Surveys & Tutorials*. 2013. Vol. 15. no. 1. P. 293–311.
14. 3GPP, ‘Telecommunication Management; Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements’, TS 32.500 (Release 11), 2011.
15. Feng S. and Seidel E. Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution. *NOMOR whitepaper*, May 2010.
16. METIS . 2012. Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Twenty Information Society 5G. FP7 ICT project. URL: <https://www.metis2020.com>
17. Fettweis G. and Alamouti S. 5G: Personal Mobile Internet beyond What Cellular Did to Telephony. *IEEE Communications Magazine* 2014. № 52(2). P. 140–145.
18. Xiang Wei, Zheng Kan et al. (Eds.) 5G Mobile Communications. Springer, 2016. 690 p. ISBN 10 3319342061. ISBN 13 978-978-3319342061.
19. Rajagopal, S., Abu-Surra, S., Pi, Z. and Khan, F. Antenna Array Design for Multi-Gbps mmWave Mobile Broadband Communication. Samsung, *IEEE Globecom*. 2011.
20. Rusek F., Persson D., Lau B.K. Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2013. Vol. 30 no. 1. P. 40–60.
21. Bizaki H.K. (Ed.) Towards 5G Wireless Networks: A Physical Layer Perspective. *ExLi4EvA*, 2016. 235 p. ISBN: 9535128345.
22. Pirmoradian M., Adigun O. and Politis C. Adaptive Power Control Scheme for Energy Efficient Cognitive Radio Networks IEEE ICC 2012 Workshop on Cognitive Radio and Cooperation for Green Networking (10–15th of June 2012, Ottawa, Canada). Ottawa, 2012.
23. ITU, ‘GSR 2012: Spectrum Policy in a Hyper-connected Digital Mobile World’, 2012. URL: <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/toolkit/docs/Document/4030>
24. Gur G. and Alagoz F. Green Wireless Communications via Cognitive Dimension: An Overview. *Network, IEEE*. Vol. 25. no. 2. P. 50–56, March–April 2011.
25. Chowdhury N. M. K. and Boutaba R. Network Virtualization: State of the Art and Research Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2009. № 47(7). P. 20–26.
26. Osseiran A., Monserrat J.F., Marsch P., Dohler M., Nakamura T. (ed.) 5G Mobile and Wireless Communications Technology. Cambridge University Press, 2016. 410 p. ISBN 978-1107130098.
27. Mavromoustakis C., Mastorakis G., Batalla J. (edit.) Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies. Springer, 2016. 499 p. ISBN 978-3319309118.
28. Gold N., Mohan A., Knight C. and Munro M. Understanding Service-Oriented Software *IEEE Software*. 2004. Vol. 21. no. 2. P. 71–77.
29. Fitzek F.H.P. and Katz M. Mobile Clouds: Exploiting Distributed Resources in Wireless, Mobile and Social Networks, Hoboken, NJ, 2014. ISBN: 978-0-470-97389-9.
30. Platzer A. Logical Foundations of Cyber-Physical Systems. *Springer*, Cham, 2018. 659 p. ISBN 978-3-319-63587-3.
31. Sabella R., Thuelig A., Carrozza M.C., Ippolito M. Industrial automation enabled by robotics, machine intelligence and 5G. 2018. URL: <https://www.ericsson.com/en/ericsson-technology-review/archive/2018/industrial-automation-enabled-by-robotics-machine-intelligence-and-5g>
32. Перри Ли. Архитектура интернета вещей. *ДМК-Пресс*, 2019. 456 с. ISBN 978-5-97060-672-8.
33. Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Дика Н.В. Дослідження вимог до стільникових мереж нового покоління та можливості їх розгортання в Україні. *Проблеми інформатизації та управління*. 2016. № 2(54). С. 52–59.

Отримано 03.07.2019

REFERENCES

1. Rodriguez J. (Ed.) *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Wiley, 2015.
2. Pankaj Sharma. Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network. *IJCSMC*. 2013. Vol. 2, no 8. pp. 47–53.
3. Liu L., Chen R., Geirhofer S. Downlink MIMO in LTE-Advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO. *IEEE Communications Magazine*. 2012. № 50(2). pp. 140–147.

4. Jordan R. and Abdallah C.T. Wireless Communications and Networking: An Overview. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2002. Vol. 44, no 1, pp.185–193.
5. Approved Draft Standard for IT – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – LAN/MAN – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications – Amd 4: Enhancements for Very High Throughput for operation in bands below 6GHz”. 2013. pp. 1–456.
6. Palaskas Y., Ravi A. and Pellerano S. MIMO Techniques for High Data Rate Radio Communications, *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, 2008. CICC 2008.
7. Hu Fei. Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective. CRC Press, 2016.
8. World's First 5G WiFi 802.11ac SoC. 2012. URL: https://www.broadcom.com/docs/press/80211ac_for_Enterprise.pdf
9. Wallace J.W. and Jensen M.A. Mutual Coupling in MIMO Wireless Systems: A Rigorous Network Theory Analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2004. Vol. 3, no 4, pp. 1317–1325.
10. More Spectrum – Especially for Small Cells. URL: <https://www.qualcomm.com/documents/1000x-more-spectrum-especially-small-cells>
11. Yavuz M., Meshkati F., Nanda S. Interference Management and Performance Analysis of UMTS/HSPA+ Femtocells. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 6, no 9.
12. Tudzarov A., Janevski T. Functional Architecture for 5G Mobile Networks. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2011, no 3(2), pp. 65–78.
13. Zahir T., Arshad K., Nakata A. and Moessner K. Interference Management in Femtocells. *Communications Surveys & Tutorials*. 2013. Vol. 15, no 1, pp. 293–311.
14. Telecommunication Management; Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements, TS 32.500 (Release 11), 2011.
15. Feng S. and Seidel E. Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution. *NOMOR whitepaper*, May 2010.
16. Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Two Information Society 5G. FP7 ICT project. URL: <https://www.metis2020.com>
17. Fettweis G. and Alamouti S. 5G: Personal Mobile Internet beyond What Cellular Did to Telephony. *IEEE Communications Magazine*. 2014, no 52(2), pp. 140–145.
18. Xiang Wei, Zheng Kan et al. (Eds.) *5G Mobile Communications*. Springer, 2016. 690 p.
19. Rajagopal, S., Abu-Surra, S., Pi, Z. and Khan, F. Antenna Array Design for Multi-Gbps mmWave Mobile Broadband Communication. Samsung, *IEEE Globecom*. 2011.
20. Rusek F., Persson D., Lau B.K. Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2013. Vol. 30, no 1, pp. 40–60.
21. Bizaki H.K. (Ed.) *Towards 5G Wireless Networks: A Physical Layer Perspective*. ExLi4EvA, 2016.
22. Pirmoradian M., Adigun O. and Politis C. Adaptive Power Control Scheme for Energy Efficient Cognitive Radio Networks. IEEE ICC 2012 Workshop on Cognitive Radio and Cooperation for Green Networking (10–15th of June 2012, Ottawa, Canada). Ottawa, 2012.
23. GSR 2012: Spectrum Policy in a Hyper-connected Digital Mobile World, 2012. URL: <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/toolkit/docs/Document/4030>
24. Gur G. and Alagoz F. Green Wireless Communications via Cognitive Dimension: An Overview. *Network, IEEE*. Vol. 25, no. 2, pp. 50–56, March–April 2011.
25. Chowdhury N. M. K. and Boutaba R. Network Virtualization: State of the Art and Research Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2009, no 47(7), pp. 20–26.
26. Osseiran A., Monserrat J.F., Marsch P., Dohler M., Nakamura T. (ed.) *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. Cambridge University Press, 2016.
27. Mavromoustakis C., Mastorakis G., Batalla J. (edit.) *Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies*. Springer, 2016.
28. Gold N., Mohan A., Knight C. and Munro M. Understanding Service-Oriented Software. *IEEE Software*. 2004. Vol. 21, no. 2, pp. 71–77.

29. Fitzek F.H.P. and Katz M. *Mobile Clouds: Exploiting Distributed Resources in Wireless, Mobile and Social Networks*. NJ: Hoboken, 2014.
30. Platzer A. *Logical Foundations of Cyber-Physical Systems*. Springer, Cham, 2018. 659 p.
31. Sabella R., Thuelig A., Carrozza M.C., Ippolito M. Industrial automation enabled by robotics, machine intelligence and 5G. 2018. URL: <https://www.ericsson.com/en/ericsson-technology-review/archive/2018/industrial-automation-enabled-by-robotics-machine-intelligence-and-5g>
32. Perry Lee. *The architecture of the Internet of things*. DMK-Press, 2019. (in Russian).
33. Odarchenko R.S., Abakumova A.O., Dyka N.V. Doslidzhennya vymoht do stilnykovykh merezh novoho pokolinnya ta mozhlyvosti yikh rozhortannya v Ukraini. *Problems of Informatization and Management*. 2016. Vol. 2(54), pp. 52–59. (in Ukrainian).

Received 03.07.2019

Гриценко В.И., член-корреспондент НАН Украины,
директор Международного научно-учебного центра
информационных технологий и систем
НАН Украины и МОН Украины
e-mail: vig@irtc.org.ua
Суровцев И.В., д-р. техн. наук, старш. науч. сотр.,
зав. отд. экологических цифровых систем
e-mail: dep175@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com
Бабак О.В., канд. техн. наук, старш. науч. сотр.,
старш. науч. сотр. отд. экологических цифровых систем
e-mail: dep175@irtc.org.ua
Международный научно-учебный центр
информационных технологий и систем
НАН Украины и МОН Украины,
пр. Акад. Глушкова 40, г. Киев, 03187, Украина

СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ 5G

Введение. Высокоскоростная мобильная система связи 5G активно развивается во многих странах мира. Важно понимать научные и технические предпосылки беспроводной технологии 5G, чтобы эффективно использовать их в новых интеллектуальных информационных технологиях.

Цель статьи — проанализировать архитектурные особенности, методы коммуникации и задачи, положенные в основу проектирования технологии 5G.

Результаты. Показано, какие конкретные технические и технологические проблемы должны быть решены для достижения широких возможностей мобильной связи 5G. Вскоре технология 5G будет стандартизирована и внедрена во всем мире, включая Украину. Возможность подключения множества внешних устройств в условиях электромагнитных помех с помощью LTE-соединений в случае распределения на большой площади и при суровых требованиях к задержкам технологических процессов позволяет утверждать, что беспроводная технология 5G является необходимой и незаменимой в исследованиях и производстве.

Выводы. Беспроводные технологии 5G и облачные вычисления являются необходимыми условиями для создания скоростной мобильной связи, киберфизических систем и предоставления широкого спектра услуг потребителям.

Ключевые слова: технология 5G, мобильная связь, архитектура связи 5G, Интернет, киберфизические системы.

Gritsenko V.I., Corresponding Member of NAS of Ukraine,
Director of 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
e-mail: vig@irtc.org.ua
Surovtsev I.V., DSc (Engineering),
Head of the Ecological Digital Systems Department
e-mail: dep175@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com
Babak O.V., PhD (Engineering), Senior Researcher
of the Ecological Digital Systems Department
e-mail: dep175@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,
40, Acad. Glushkov av., 03187, Kyiv, Ukraine

5G WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM

Introduction. The 5G high-speed mobile communication system is actively developing in many countries around the world. It is important to understand the scientific and technical prerequisites of 5G wireless technology in order to effectively utilize them in the new intelligent information technology.

The purpose of the paper is to describe in an accessible way the architectural features, communication methods, the Internet and the tasks that underlie 5G.

Results. It is shown that specific technical and technological problems have to be solved in order to reach the wide possibilities of 5G mobile communication. At the same time, 5G technology will soon be standardized and implemented around the world, including Ukraine. The ability to connect many external devices in conditions of electromagnetic interference using LTE connections in the case of distribution over a large area and with strict requirements for process delays makes it possible to state that 5G wireless technology is necessary and indispensable in research and production.

Conclusions. Wireless technology 5G and cloud computing are prerequisites for creating high-speed mobile communications, cyber-physical systems and providing a wide range of services to consumers.

Keywords: *technology 5G, mobile communication, communication architecture 5G, Internet, cyberphysical systems.*

DOI: <https://10.15407/kvt197.03.020>

UDC 517.977: 534.121.2

V.R. BARSEGHYAN, DSc (Phys. and Math.), Professor,
Leading Researcher of the Institute of Mechanics
of the National Academy of Sciences of Armenia,
Professor of the Faculty of Mathematics
and Mechanics of Yerevan State University
email: barseghyan@sci.am
Yerevan State University, Institute of Mechanics of NAS of Armenia
18, Bakunts st., 0033, Yerevan, Republic of Armenia

THE PROBLEM OF CONTROL OF MEMBRANE VIBRATIONS WITH NON-SEPARATED MULTIPOINT CONDITIONS AT INTERMEDIATE MOMENTS OF TIME

Introduction. Many control processes from various fields of science and technology lead to the necessity to study multipoint boundary value problems of control, in which, along with classical boundary conditions, non-separated multi-point intermediate conditions are also given. A characteristic feature of multipoint boundary value problems of control is the presence of non-separated conditions at several intermediate points of the study interval. Such control problems have important applied and theoretical value, a necessity naturally arises for their investigation in various settings. In this article, the problem of control of vibrations of a rectangular membrane with given initial, final conditions and non-separated values of the deflection function and velocities at intermediate moments of time is considered.

The purpose of the paper is to develop a constructive approach to construct a function of control action to control the vibrations of a rectangular membrane with given initial, final conditions and non-separated (non-local) values of the deflection and velocities of membrane points at intermediate moments of time.

Results. By the method of separation of variables, the problem is reduced to the problem of control of ordinary differential equations with given initial, final, and non-separated multipoint intermediate conditions. Using the methods of the theory of control of finite-dimensional systems with multipoint intermediate conditions, a control action to control vibrations of a rectangular membrane is constructed.

Conclusion. The problem of control of the vibrations of a rectangular membrane with given non-separated values of the deflection function and velocities at intermediate moments of time is solved by using the methods of the theory of control of finite-dimensional systems with multipoint intermediate conditions.

Keywords: control of vibrations, membrane vibration, intermediate values, non-separated multipoint conditions.

INTRODUCTION

One of the most common processes in nature and technology are oscillatory processes, which are modeled by the wave equations [1–4]. At the same time, in practice, control problems often arise when it is necessary to generate the desired vibration form that satisfies intermediate conditions. Many control processes lead to the necessity to study multipoint boundary value problems, in which, along with the classical boundary (initial and final) conditions, non-separated (non-local) multipoint intermediate conditions are given [5–15]. Non-separated multipoint boundary value problems, on the one hand, arise as mathematical models of real processes, and on the other hand, for many equations correct formulation of local boundary value problems is impossible. The nonseparability of multipoint conditions may be, in particular, due to the impossibility in practice to measure the parameters of the state of an object instantaneously or at its individual points.

Numerous examples of technological processes leading to the problems of control of systems with distributed parameters were considered in [1–3] and various methods of solutions were proposed. The control problems of oscillatory processes, with both external and boundary control actions under various types of boundary conditions are considered in [4, 7–14]. In [7–12] problems of control of vibrations of a string and membrane with given intermediate (local) states with the help of external forces acting on the systems were considered. The problems of control of distributed systems with given non-separated multipoint (non-local) conditions at intermediate moments of time are less explored to date.

The purpose of the paper is to develop a constructive approach to construct a function of control action for controlling vibrations of a rectangular membrane with given initial, final conditions and non-separated (non-local) deflection values and velocities of membrane points at intermediate times.

THE FORMULATION OF THE PROBLEM

Consider a homogeneous, elastic, rectangular membrane, the edges of which are fixed. Let distributed forces act on the membrane with a density $u(x, y, t)$ perpendicular to the surface of the membrane, under the action of which the membrane will vibrate. We restrict ourselves to the consideration of small vibrations of the membrane.

The state of the membrane is described by the function $Q(x, y, t)$, $0 \leq x \leq b$, $0 \leq y \leq c$, $0 < t < T$, which for $0 < x < b$, $0 < y < c$ и $0 < t < T$ is characterized by the following equation:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) + u(x, y, t) \quad (1)$$

with homogeneous boundary conditions

$$Q(0, y, t) = 0, \quad Q(b, y, t) = 0, \quad Q(x, 0, t) = 0, \quad Q(x, c, t) = 0, \quad 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

and satisfying initial and final conditions

$$Q(x, y, 0) = \varphi_0(x, y), \quad \left. \frac{\partial Q}{\partial t} \right|_{t=0} = \psi_0(x, y), \quad 0 \leq x \leq b, \quad 0 \leq y \leq c, \quad (3)$$

$$Q(x, y, T) = \varphi_T(x, y) = \varphi_{m+1}(x, y), \quad \left. \frac{\partial Q}{\partial t} \right|_{t=T} = \psi_T(x, y) = \psi_{m+1}(x, y), \quad (4)$$

$$0 \leq x \leq b, \quad 0 \leq y \leq c.$$

On the left hand side of equation (1) the function $u(x, y, t)$ - density of force, which is the control action, $a^2 = \frac{T_0}{\rho}$, where T_0 - tension, and ρ - membrane density. It is assumed that the function $u(x, y, t) \in L_2(\Omega)$, where $\Omega = \{(x, y, t) : x \in [0, b], y \in [0, c], t \in [0, T]\}$.

Let at some intermediate moments of time $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_m < t_{m+1} = T$ on the values of the membrane deflection function non-separated (non-local) conditions are given in the following form:

$$\sum_{k=1}^m f_k Q(x, y, t_k) = \alpha(x, y), \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^m e_k \left. \frac{\partial Q(x, y, t)}{\partial t} \right|_{t=t_k} = \beta(x, y), \quad (6)$$

where f_k and e_k — given values ($k = 1, \dots, m$), $\alpha(x, y)$ and $\beta(x, y)$ — some known functions.

Necessary condition for existence of the classical solution of the formulated problem (1)–(6) is a condition of compatibility of boundary, initial, intermediate and final conditions. Therefore it is supposed that $\varphi_0(x, y)$, $\psi_0(x, y)$, $\varphi_T(x, y)$, $\psi_T(x, y)$, $\alpha(x, y)$ and $\beta(x, y)$ are given smooth functions satisfying the compatibility conditions.

In general, it is possible that at some moments of time t_k ($k = 1, \dots, m$) in the conditions (5), (6) either the values of the deflection function or values of derivatives of that function are present, i.e. it is not mandatory that at each moment of time t_k ($k = 1, \dots, m$) in the conditions (5), (6) functions $Q(x, y, t_k)$ and $\left. \frac{\partial Q(x, y, t)}{\partial t} \right|_{t=t_k}$ are present at the same time. In those case we will consider that

the corresponding coefficients f_k or e_k are equal to zero. In particular, assuming that $f_2 = e_1 = 0$ and $f_1 = e_2 = 1$, conditions (5) and (6) take the following form:

$$Q(x, y, t_1) = \alpha(x, y), \quad \left. \frac{\partial Q(x, y, t)}{\partial t} \right|_{t=t_2} = \beta(x, y).$$

The control problem of membrane vibrations with given non-separated values of the deflection function and velocities at intermediate moments of time t_k ($k=1, \dots, m$) can be formulated as follows: among the possible controls $u(x, y, t)$, $0 \leq x \leq b$, $0 \leq y \leq c$, $0 \leq t \leq T$ it is required to find a control that transfers membrane vibrations (1) with boundary conditions (2) from a given initial state (3) to a given final state (4), ensuring the satisfaction of non-separated multipoint intermediate conditions (5), (6).

It is assumed that system (1) with constraints (2) - (6) over the time interval $[0, T]$ is completely controllable [5, 16].

THE SOLUTION OF THE PROBLEM

To build a solution to the formulated problem, we are looking for a solution to the equation (1) with boundary conditions (2) in the following form:

$$Q(x, y, t) = \sum_{k,n=1}^{\infty} Q_{kn}(t) \sin \frac{k\pi}{b} x \sin \frac{n\pi}{c} y. \quad (7)$$

Apparently, to determine $Q(x, y, t)$ it suffices to determine $Q_{kn}(t)$, where $k, n = 1, 2, \dots$. We represent the function $u(x, y, t)$ in the form of Fourier series

$$u(x, y, t) = \sum_{k,n=1}^{\infty} u_{kn}(t) \sin \frac{k\pi}{b} x \sin \frac{n\pi}{c} y. \quad (8)$$

Let us substitute decomposition (7), (8) into the relation (1). By virtue of the orthogonality of the system of eigenfunctions $\left\{ \sin \frac{k\pi}{b} x \sin \frac{n\pi}{c} y \right\}$, where $k, n = 1, 2, \dots$, it follows that coefficients of Fourier $Q_{kn}(t)$ satisfy the countable system of ordinary differential equations

$$\ddot{Q}_{kn}(t) + \lambda_{kn}^2 Q_{kn}(t) = u_{kn}(t), \quad \lambda_{kn}^2 = a^2 \left[\left(\frac{k\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{c} \right)^2 \right], \quad (9)$$

$$k, n = 1, 2, \dots$$

and the following initial, non-separated multipoint intermediate and final conditions:

$$Q_{kn}(0) = \varphi_{kn}^{(0)}, \quad \dot{Q}_{kn}(0) = \psi_{kn}^{(0)}, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^m f_j Q_{kn}(t_j) = \alpha_{kn}, \quad \sum_{j=1}^m e_j \dot{Q}_{kn}(t_j) = \beta_{kn}, \quad (11)$$

$$Q_{kn}(T) = \varphi_{kn}^{(T)} = \varphi_{kn}^{(m+1)}, \quad \dot{Q}_{kn}(T) = \psi_{kn}^{(T)} = \psi_{kn}^{(m+1)}, \quad (12)$$

where $Q_{kn}(t)$, $\varphi_{kn}^{(0)}$, $\psi_{kn}^{(0)}$, $\varphi_{kn}^{(m+1)}$, $\psi_{kn}^{(m+1)}$, $u_{kn}(t)$, α_{kn} and β_{kn} denote Fourier coefficients, corresponding to the functions $Q(x, y, t)$, $\varphi_0(x, y)$, $\psi_0(x, y)$, $\varphi_{m+1}(x, y)$, $\psi_{m+1}(x, y)$, $u(x, y, t)$, $\alpha(x, y)$ and $\beta(x, y)$.

The general solution of equation (9) with initial conditions (10) and its time derivative have the following form:

$$Q_{kn}(t) = \varphi_{kn}^{(0)} \cos \lambda_{kn} t + \frac{1}{\lambda_{kn}} \psi_{kn}^{(0)} \sin \lambda_{kn} t + \frac{1}{\lambda_{kn}} \int_0^t u_{kn}(\tau) \sin \lambda_{kn}(t - \tau) d\tau, \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{kn}(t) = -\lambda_{kn} \varphi_{kn}^{(0)} \sin \lambda_{kn} t + \psi_{kn}^{(0)} \cos \lambda_{kn} t + \int_0^t u_{kn}(\tau) \cos \lambda_{kn}(t - \tau) d\tau.$$

Now, taking into account the intermediate non-separated (11) and final (12) conditions using the approaches given in [6, 7], from equation (13), we obtain that the functions $u_{kn}(\tau)$ for each k and n must satisfy the following system of equalities:

$$\begin{aligned} \int_0^T u_{kn}(\tau) \sin \lambda_{kn}(T - \tau) d\tau &= C_{1kn}(T), \\ \int_0^T u_{kn}(\tau) \cos \lambda_{kn}(T - \tau) d\tau &= C_{2kn}(T), \\ \sum_{j=1}^m f_j \int_0^{t_j} u_{kn}(\tau) \sin \lambda_{kn}(t_j - \tau) d\tau &= C_{1kn}^{(m)}(t_1, \dots, t_m), \\ \sum_{j=1}^m e_j \int_0^{t_j} u_{kn}(\tau) \cos \lambda_{kn}(t_j - \tau) d\tau &= C_{2kn}^{(m)}(t_1, \dots, t_m), \end{aligned} \quad (14)$$

where

$$\begin{aligned} C_{1kn}(T) &= \lambda_{kn} \varphi_{kn}^{(m+1)} - \lambda_{kn} \varphi_{kn}^{(0)} \cos \lambda_{kn} T - \psi_{kn}^{(0)} \sin \lambda_{kn} T, \\ C_{2kn}(T) &= \psi_{kn}^{(m+1)} + \lambda_{kn} \varphi_{kn}^{(0)} \sin \lambda_{kn} T - \psi_{kn}^{(0)} \cos \lambda_{kn} T, \\ C_{1kn}^{(m)}(t_1, \dots, t_m) &= \lambda_{kn} \left[\alpha_{kn} - \sum_{j=1}^m f_j \left(\varphi_{kn}^{(0)} \cos \lambda_{kn} t_j + \frac{1}{\lambda_{kn}} \psi_{kn}^{(0)} \sin \lambda_{kn} t_j \right) \right], \\ C_{2kn}^{(m)}(t_1, \dots, t_m) &= \beta_{kn} - \sum_{j=1}^m e_j \left(-\lambda_{kn} \varphi_{kn}^{(0)} \sin \lambda_{kn} t_j + \psi_{kn}^{(0)} \cos \lambda_{kn} t_j \right). \end{aligned} \quad (15)$$

We introduce the following functions

$$h_{1kn}(\tau) = \sin \lambda_{kn}(T - \tau), \quad h_{2kn}(\tau) = \cos \lambda_{kn}(T - \tau), \quad 0 \leq \tau \leq T$$

$$h_{1kn}^{(m)}(\tau) = \sum_{j=1}^m f_j h_{1kn}^{(j)}(\tau)$$

$$h_{1kn}^{(j)}(\tau) = \begin{cases} \sin \lambda_{kn}(t_j - \tau) & \text{when } 0 \leq \tau \leq t_j, \\ 0 & \text{when } t_j < \tau \leq t_{m+1} = T, \end{cases} \quad (16)$$

$$h_{2kn}^{(m)}(\tau) = \sum_{j=1}^m e_j h_{2kn}^{(j)}(\tau),$$

$$h_{2kn}^{(j)}(\tau) = \begin{cases} \cos \lambda_{kn}(t_j - \tau) & \text{when } 0 \leq \tau \leq t_j, \\ 0 & \text{when } t_j < \tau \leq t_{m+1} = T. \end{cases}$$

Then the integral relations (14) with the help of the function (16) are written as follows:

$$\int_0^T u_{kn}(\tau) h_{1kn}(\tau) d\tau = C_{1kn}(T), \quad \int_0^T u_{kn}(\tau) h_{2kn}(\tau) d\tau = C_{2kn}(T),$$

$$\int_0^T u_{kn}(\tau) h_{1kn}^{(m)}(\tau) d\tau = C_{1kn}^{(m)}(t_1, \dots, t_m), \quad \int_0^T u_{kn}(\tau) h_{2kn}^{(m)}(\tau) d\tau = C_{2kn}^{(m)}(t_1, \dots, t_m), \quad (17)$$

$$k, n = 1, 2, \dots$$

Thus, the required functions $u_{kn}(\tau)$, $\tau \in [0, T]$, for each k and n must satisfy the integral relations (17).

Using the following notation

$$H_{kn}(\tau) = \begin{pmatrix} h_{1kn}(\tau) \\ h_{2kn}(\tau) \\ h_{1kn}^{(m)}(\tau) \\ h_{2kn}^{(m)}(\tau) \end{pmatrix}, \quad \eta_{kn} = \begin{pmatrix} C_{1kn}(T) \\ C_{2kn}(T) \\ C_{1kn}^{(m)}(t_1, \dots, t_m) \\ C_{2kn}^{(m)}(t_1, \dots, t_m) \end{pmatrix} \quad (18)$$

we re-write integral relations (17) in the form:

$$\int_0^T H_{kn}(t) u_{kn}(t) dt = \eta_{kn}. \quad (19)$$

From relation (19) (or (17)) it follows that for each harmonic, the motion described by equation (9) with conditions (10) - (12) is completely controllable if and only if for any given vector η_{kn} (18) it is possible to find a control $u_{kn}(t)$, $t \in [0, T]$, satisfying condition (19) (or (17)).

We introduce notation

$$S_{kn} = \int_0^T H_{kn}(t) (H_{kn}(t))^T dt = \begin{pmatrix} S_{11}^{(kn)} & S_{12}^{(kn)} & S_{13}^{(kn)} & S_{14}^{(kn)} \\ S_{21}^{(kn)} & S_{22}^{(kn)} & S_{23}^{(kn)} & S_{24}^{(kn)} \\ S_{31}^{(kn)} & S_{32}^{(kn)} & S_{33}^{(kn)} & S_{34}^{(kn)} \\ S_{41}^{(kn)} & S_{42}^{(kn)} & S_{43}^{(kn)} & S_{44}^{(kn)} \end{pmatrix}, \quad (20)$$

where $H_{kn}(t)(H_{kn}(t))^T$ – outer product of vectors. Henceforth the letter « T » in the superscript denotes transpose operation.

Let's assume that $\det S_n \neq 0$. Then, following [5, 17], for each $k, n = 1, 2, \dots$ the function $u_{kn}(t)$, $t \in [0, T]$, satisfying the integral relation (19), can be written as

$$u_{kn}(t) = (H_{kn}(t))^T S_{kn}^{-1} \eta_{kn} + v_{kn}(t), \quad (21)$$

where $v_{kn}(t)$ – some vector function such that

$$\int_0^T H_{kn}(t) v_{kn}(t) dt = 0. \quad (22)$$

The elements of the matrix S_n , according to (20) and the notation (16), (18), have the following forms:

$$\begin{aligned} s_{11}^{(kn)} &= \int_0^T (h_{1kn}(\tau))^2 d\tau = \int_0^T (\sin \lambda_{kn}(T-\tau))^2 d\tau, \\ s_{12}^{(kn)} &= s_{21}^{(kn)} = \int_0^T h_{1kn}(\tau) h_{2kn}(\tau) d\tau = \int_0^T \sin \lambda_{kn}(T-\tau) \cos \lambda_{kn}(T-\tau) d\tau, \\ s_{13}^{(kn)} &= s_{31}^{(kn)} = \int_0^T h_{1kn}(\tau) h_{1kn}^{(m)}(\tau) d\tau = \int_0^T \sin \lambda_{kn}(T-\tau) \left(\sum_{j=1}^m f_j h_{1kn}^{(j)}(\tau) \right) d\tau, \\ s_{14}^{(kn)} &= s_{41}^{(kn)} = \int_0^T h_{1kn}(\tau) h_{2kn}^{(m)}(\tau) d\tau = \int_0^T \sin \lambda_{kn}(T-\tau) \left(\sum_{j=1}^m e_j h_{2kn}^{(j)}(\tau) \right) d\tau = \\ &= \sum_{j=1}^m e_j \int_0^T \sin \lambda_{kn}(T-\tau) h_{2kn}^{(j)}(\tau) d\tau = \sum_{j=1}^m e_j \int_0^{t_j} \sin \lambda_{kn}(T-\tau) \cos \lambda_{kn}(t_j-\tau) d\tau, \\ s_{23}^{(kn)} &= s_{32}^{(kn)} = \int_0^T h_{2kn}(\tau) h_{1kn}^{(m)}(\tau) d\tau = \int_0^T \cos \lambda_{kn}(T-\tau) \left(\sum_{j=1}^m f_j h_{1kn}^{(j)}(\tau) \right) d\tau, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
 s_{22}^{(kn)} &= \int_0^T (h_{2kn}(\tau))^2 d\tau = \int_0^T (\cos \lambda_{kn}(T-\tau))^2 d\tau, \\
 s_{24}^{(kn)} &= s_{42}^{(kn)} = \int_0^T h_{2kn}(\tau) h_{2kn}^{(m)}(\tau) d\tau = \int_0^T \cos \lambda_{kn}(T-\tau) \left(\sum_{j=1}^m e_j h_{2kn}^{(j)}(\tau) \right) d\tau = \\
 &= \sum_{j=1}^m e_j \int_0^T \cos \lambda_{kn}(T-\tau) h_{2kn}^{(j)}(\tau) d\tau = \sum_{j=1}^m e_j \int_0^{t_j} \cos \lambda_{kn}(T-\tau) \cos \lambda_{kn}(t_j-\tau) d\tau, \\
 s_{33}^{(kn)} &= \int_0^T (h_{1kn}^{(m)}(\tau))^2 d\tau = \int_0^T \left(\sum_{j=1}^m f_j h_{1kn}^{(j)}(\tau) \right)^2 d\tau, \\
 s_{34}^{(kn)} &= s_{43}^{(kn)} = \int_0^T h_{1kn}^{(m)}(\tau) h_{2kn}^{(m)}(\tau) d\tau = \int_0^T \left(\sum_{j=1}^m f_j h_{1kn}^{(j)}(\tau) \right) \left(\sum_{j=1}^m e_j h_{2kn}^{(j)}(\tau) \right) d\tau, \\
 s_{44}^{(kn)} &= \int_0^T (h_{2kn}^{(m)}(\tau))^2 d\tau = \int_0^T \left(\sum_{j=1}^m e_j h_{2kn}^{(j)}(\tau) \right)^2 d\tau.
 \end{aligned}$$

Note that, according to the notation (16), we will have

$$\begin{aligned}
 h_{1kn}^{(m)}(t) &= \begin{cases} \sum_{j=1}^m f_j \sin \lambda_{kn}(t_j - t), & 0 \leq t \leq t_1 \\ \sum_{j=2}^m f_j \sin \lambda_{kn}(t_j - t), & t_1 < t \leq t_2 \\ \dots & \\ \sum_{j=m-1}^m f_j \sin \lambda_{kn}(t_j - t), & t_{m-2} < t \leq t_{m-1} \\ f_m \sin \lambda_{kn}(t_m - t), & t_{m-1} < t \leq t_m \\ 0, & t_m < t \leq t_{m+1} = T \end{cases}, \\
 h_{2kn}^{(m)}(t) &= \begin{cases} \sum_{j=1}^m e_j \cos \lambda_{kn}(t_j - t), & 0 \leq t \leq t_1 \\ \sum_{j=2}^m e_j \cos \lambda_{kn}(t_j - t), & t_1 < t \leq t_2 \\ \dots & \\ \sum_{j=m-1}^m e_j \cos \lambda_{kn}(t_j - t), & t_{m-2} < t \leq t_{m-1} \\ e_m \cos \lambda_{kn}(t_m - t), & t_{m-1} < t \leq t_m \\ 0, & t_m < t \leq t_{m+1} = T \end{cases}.
 \end{aligned}$$

Therefore, taking into account the notation (16) and (18), the control action $u_{kn}(t)$, $t \in [0, T]$, according to (21), is represented in the following form:

$$u_{kn}(t) = \begin{cases} \left(\sin \lambda_{kn}(T-t) \quad \cos \lambda_{kn}(T-t) \quad \sum_{j=1}^m f_j \sin \lambda_{kn}(t_j-t) \quad \sum_{j=1}^m e_j \cos \lambda_{kn}(t_j-t) \right) \times \\ \quad \times S_{kn}^{-1} \eta_{kn} + v_{kn}(t), \quad 0 \leq t \leq t_1 \\ \left(\sin \lambda_{kn}(T-t) \quad \cos \lambda_{kn}(T-t) \quad \sum_{j=2}^m f_j \sin \lambda_{kn}(t_j-t) \quad \sum_{j=2}^m e_j \cos \lambda_{kn}(t_j-t) \right) \times \\ \quad \times S_{kn}^{-1} \eta_{kn} + v_{kn}(t), \quad t_1 < t \leq t_2 \\ \dots \\ \left(\sin \lambda_{kn}(T-t) \quad \cos \lambda_{kn}(T-t) \quad f_m \sin \lambda_{kn}(t_m-t) \quad e_m \cos \lambda_{kn}(t_m-t) \right) \times \\ \quad \times S_{kn}^{-1} \eta_{kn} + v_{kn}(t), \quad t_{m-1} < t \leq t_m \\ \left(\sin \lambda_{kn}(T-t) \quad \cos \lambda_{kn}(T-t) \quad 0 \quad 0 \right) \times \\ \quad \times S_{kn}^{-1} \eta_{kn} + v_{kn}(t), \quad t_m < t \leq t_{m+1} = T \end{cases}$$

Substituting the obtained expressions $u_{kn}(t)$ into (13), we obtain $Q_{kn}(t)$ on the time interval $t \in [0, T]$, and from formulas (7) and (8) we obtain the functions of the deflection, $Q(x, y, t)$, and control, $u(x, y, t)$. Thus, the explicit expressions for the control function $u(x, y, t)$ have the form:

for $0 \leq t \leq t_1$

$$u(x, y, t) = \sum_{k,n=1}^{\infty} \left[\left(\sin \lambda_{kn}(T-t) \quad \cos \lambda_{kn}(T-t) \quad \sum_{j=1}^m f_j \sin \lambda_{kn}(t_j-t) \quad \sum_{j=1}^m e_j \cos \lambda_{kn}(t_j-t) \right) \times \right. \\ \left. \times S_{kn}^{-1} \eta_{kn} + v_{kn}(t) \right] \sin \frac{k\pi}{b} x \sin \frac{n\pi}{c} y,$$

for $t_1 < t \leq t_2$

$$u(x, y, t) = \sum_{k,n=1}^{\infty} \left[\left(\sin \lambda_{kn}(T-t) \quad \cos \lambda_{kn}(T-t) \quad \sum_{j=2}^m f_j \sin \lambda_{kn}(t_j-t) \quad \sum_{j=2}^m e_j \cos \lambda_{kn}(t_j-t) \right) \times \right. \\ \left. \times S_{kn}^{-1} \eta_{kn} + v_{kn}(t) \right] \sin \frac{k\pi}{b} x \sin \frac{n\pi}{c} y,$$

...

for $t_{m-1} < t \leq t_m$

$$u(x, y, t) =$$

$$= \sum_{k,n=1}^{\infty} \left[\begin{pmatrix} \sin \lambda_{kn}(T-t) & \cos \lambda_{kn}(T-t) & f_m \sin \lambda_{kn}(t_m-t) & e_m \cos \lambda_{kn}(t_m-t) \end{pmatrix} \times \right. \\ \left. \times S_{kn}^{-1} \eta_{kn} + v_{kn}(t) \right] \sin \frac{k\pi}{b} x \sin \frac{n\pi}{c} y,$$

for $t_m < t \leq t_{m+1} = T$

$u(x, y, t) =$

$$= \sum_{k,n=1}^{\infty} \left[\begin{pmatrix} \sin \lambda_{kn}(T-t) & \cos \lambda_{kn}(T-t) & 0 & 0 \end{pmatrix} S_{kn}^{-1} \eta_{kn} + v_{kn}(t) \right] \sin \frac{k\pi}{b} x \sin \frac{n\pi}{c} y.$$

Thus, having explicit expressions for the control function (which is a piecewise continuous function), using the above formulas, the deflection function of the membrane can be found.

CONCLUSION

In this article the problem of control of the vibrations of a rectangular membrane with given non-separated values of the deflection function and velocities at intermediate moments of time by the method of separation of variables, is reduced to the problem of control of countable ordinary differential equations with given initial, final, and non-separated multipoint intermediate conditions. The solution to the problem is constructed by using the methods of the theory of control of finite-dimensional systems with multipoint intermediate conditions.

REFERENCES

1. Butkovskiy A.G. *Methods of the systems control with distributed parameters*. Moscow: Nauka. 1975. (in Russian).
2. Sirazetdinov T.K. *Systems optimization with distributed parameters*. Moscow: Nauka. 1977. (in Russian)
3. Znamenskaya, L.N. *Control of elastic vibrations*. Moscow: FIZMATLIT. 2004. (in Russian)
4. Kopets M.M. Optimal control of vibrations of a rectangular membrane. *Kibernetika i vychislitelnaâ tehnika*. 2014. Iss. 177, pp. 28–42. (in Russian).
5. Barseghyan V.R. *Control of Compound Dynamic Systems and of Systems with Multipoint Intermediate Conditions*. Moscow: Nauka. 2016. (in Russian).
6. Barseghyan V.R. and Barseghyan T.V. On an Approach to the Problems of Control of Dynamic System with Nonseparated Multipoint Intermediate Conditions. *Automation and Remote Control*, 2015, Vol. 76, no 4, pp. 549–559.
7. Barseghyan V.R., Saakyan, M. A. The optimal control of wire vibration in the states of the given intermediate periods of time. *Proc. of NAS RA: Mechanics*, 2008, 61(2), pp. 52–60. (in Russian)
8. Barseghyan V.R. Optimal control of a membrane vibration with fixed intermediate states. *Proceedings of YSU*. 1998. 188 (1), pp. 24–29. (in Russian).
9. Barseghyan V.R. On the problem of boundary control of string oscillations with given states at intermediate moments of time. *Proceedings The XIth All-Russian Congress on Basic Problems of Theoretical and Applied Mechanics* (Kazan, 20-24th of Aug, 2015), Kazan, 2015, part 1, pp. 354–356. (in Russian).
10. Barseghyan V.R. About one problem of optimal boundaery control of string vibrations with restrictions in the intermediate moment of time. *Proceedings of the 11th International Chetaev Conference. Analytical mechanics, stability and control* (Kazan, 14 – 18th of June, 2017). Kazan, 2017. Vol. 3, part 1, pp. 119–125. (in Russian).

11. Korzyuk V.I., Kozlovskia I.S. Two-point boundary problem for the equation of string vibration with the given velocity at the certain moment of time. *Proceedings of the Institute of Math. NAS of Belarus*. 2010. 18(2), pp. 22–35. (in Russian).
12. Korzyuk V.I., Kozlovskia I.S. Two-point boundary problem for the equation of string vibration with the given velocity at the certain moment of time. *Proceedings of the Institute of Math. NAS of Belarus*. 2010. 19(1). pp. 62–70. (in Russian).
13. Makarov A.A., Levkin D.A. Multipoint boundary value problem for pseudodifferential equations in multilayer. *Vistnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Mathematics, Applied Mathematics and Mechanics*. 2014. № 1120. Vol. 69, pp. 64–74. (in Ukrainian).
14. Assanova A.T., Imanchiev A.E On the solvability of a nonlocal boundary value problem for a loaded hyperbolic equations with multi-point conditions. *Bulletin of the Karaganda University. Series: Mathematics*. 2016, no 1 (81), pp. 15–20. (in Russian).
15. Bakirova E.A., Kadirbayeva Zh.M. On a Solvability of Linear Multipoint Boundary Value Problem for the Loaded Differential Equations. *Izvestiya NAS RK. Ser. fiz.-mat.*, 2016, Vol. 5, no 309, pp. 168–175. (in Russian).
16. Krasovsky N.N. *The Theory of Motion Control*. Moscow: Nauka. 1968. (in Russian).
17. Zubov V.I. *Lectures on the Theory of Control*. Moscow: Nauka. 1975. (in Russian).

Received 06.05.2019

ЛІТЕРАТУРА

1. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами М.: Наука, 1975. 568 с.
2. Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами М.: Наука, 1977. 480 с.
3. Знаменская Л.Н. Управление упругими колебаниями М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 176 с.
4. Копец М.М. Оптимальное управление колебаниями прямоугольной мембраны. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2014. Вып. 177. С. 28–42.
5. Барсегян В.Р. Управление составных динамических систем и систем с многоточечными промежуточными условиями М.: Наука, 2016. 230 с.
6. Барсегян В.Р., Барсегян Т.В. Об одном подходе к решению задач управления динамических систем с неразделенными многоточечными промежуточными условиями *Автоматика и телемеханика*. 2015. № 4. С. 3–15.
7. Барсегян В.Р., Саакян М.А. Оптимальное управление колебаниями струны с заданными состояниями в промежуточные моменты времени *Известия НАН РА. Механика*. 2008. Т. 61. № 2. С. 52–60.
8. Барсегян В.Р. Об оптимальном управлении колебаниями мембраны при фиксированных промежуточных состояниях *Уч. записки ЕГУ*. 1998. № 1(188). С. 24–29.
9. Барсегян В.Р. О задаче граничного управления колебаниями струны с заданными состояниями в промежуточные моменты времени XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник докладов, (Казань, 20–24 августа, 2015). Казань, 2015. С. 354–356.
10. Барсегян В.Р. Об одной задаче граничного оптимального управления колебаниями струны с ограничениями в промежуточные моменты времени «Аналитическая механика, устойчивость и управление»: труды XI Международной Четаевской конференции. Т. 3. Ч. I. (Казань, 13–17 июня, 2017). Казань, 2017. С. 119–125.
11. Корзюк В.И., Козловская И.С. Двухточечная граничная задача для уравнения колебания струны с заданной скоростью в некоторый момент времени. I *Труды Ин-та мат. НАН Беларуси*. 2010. Т. 18. № 2. С. 22–35.
12. Корзюк В.И., Козловская И.С. Двухточечная граничная задача для уравнения колебания струны с заданной скоростью в некоторый момент времени. II *Труды Ин-та мат. НАН Беларуси*. 2011. Т. 19. № 1. С. 62–70.
13. Макаров А.А., Левкин Д.А. Многоточечная краевая задача для псевдодифференциальных уравнений в полислое *Вісн. ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Серія: Математика, прикладна математика і механіка*. 2014. № 1120. Вып. 69. С. 64–74.

14. Асанова А.Т., Иманчиев А.Е. О разрешимости нелокальной краевой задачи для нагруженных гиперболических уравнений с многоточечными условиями *Вест. Карагандинского университета*. Серия: Математика. 2016. № 1(81). С. 15–20.
15. Бакирова Э.А., Кадирбаева Ж.М. О разрешимости линейной многоточечной краевой задачи для нагруженных дифференциальных уравнений *Изв. НАН РК. Сер. физ.-мат.* 2016. № 5. С. 168–175.
16. Красовский Н.Н. Теория управления движением М.: Наука, 1968. 476 с.
17. Зубов В.И. Лекции по теории управления М.: Наука, 1975. 496 с.

Отримано: 06.05.2019

В.Р. Барсегян, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
провід. наук. співроб. Інституту механіки НАН Вірменії,
професор факультету математики і механіки
Єреванського державного університету
email: barseghyan@sci.am
Єреванський державний університет,
Інститут механіки НАН Вірменії
вул. Бакунца, 8, м. Єреван, 0033, Республіка Вірменія

ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ КОЛИВАННЯМИ МЕМБРАНИ З НЕРОЗДІЛЕНИМИ БАГАТОТОЧКОВИМИ УМОВАМИ У ПРОМІЖНІ МОМЕНТИ ЧАСУ

Вступ. Характерною особливістю багатоточкових крайових задач контролю є наявність нерозділених умов у кількох проміжних точках інтервалу дослідження. Такі проблеми керування мають важливе прикладне і теоретичне значення, природно виникає необхідність їхнього дослідження в різних умовах. У статті розглянуто проблему контролю коливань прямокутної мембрани із заданими початковими, кінцевими умовами та нерозділеними значеннями функції перегину та швидкостей у проміжні моменти часу.

Метою статті є розроблення конструктивного підходу до побудови функції керувальної дії для контролю коливань прямокутної мембрани із заданими початковими, кінцевими умовами та нерозділеними (не локальними) значеннями перегину та швидкостями мембранних точок в проміжні моменти часу.

Результати. Методом поділу змінних задача зводиться до задачі керування звичайними диференціальними рівняннями із заданими початковими, кінцевими та нерозділеними багатоточковими проміжними умовами. За допомогою методів теорії керування кінцевомірними системами з багатоточковими проміжними умовами побудовано керувальну дію для контролю коливань прямокутної мембрани.

Висновки. Задача керування коливаннями прямокутної мембрани із заданими нерозділеними значеннями функції відхилення та швидкостей у проміжні моменти часу вирішується за допомогою методів теорії керування кінцево-розмірними системами з багатоточковими проміжними умовами.

Ключові слова: керування коливаннями, коливання мембрани, проміжні значення, нерозділені багатоточкові умови

В.Р. Барсегян, д-р физ.-мат. наук, проф.,
вед. науч. сотр. Института механики НАН Армении,
профессор факультета математики и механики
Ереванского государственного университета.
email: barseghyan@sci.am
Ереванский государственный университет,
Институт механики НАН Армении
ул. Бакунца, 8, г. Ереван, 0033, Республика Армения

**ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМИ МЕМБРАНЫ
С НЕРАЗДЕЛЕННЫМИ МНОГОТОЧЕЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ
В ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ МОМЕНТЫ ВРЕМЕНИ**

Рассмотрена задача управления колебаниями прямоугольной мембраны с заданными неразделенными значениями функции прогиба и скоростей в промежуточные моменты времени. Методом разделения переменных проблема сводится к задаче управления обыкновенных дифференциальных уравнений с заданными начальными, конечными и неразделенными многоточечными промежуточными условиями. Используя методы теории управления конечномерными системами с многоточечными промежуточными условиями, построено управляющее воздействие.

Ключевые слова: управление колебаниями, колебание мембраны, промежуточные значения, неразделенные многоточечные условия.

DOI: <https://10.15407/kvt197.03.033>

UDC 681.5

L.S. ZHITECKII¹, PhD (Engineering),

Acting Head of the Intelligent Automatic Systems Department

e-mail: leonid_zhiteckii@i.ua

V.N. AZARSKOV², DSc. (Engineering), Professor,

Chief of the Aerospace Control Systems Department,

e-mail: azarskov@nau.edu.ua

K.Yu. SOLOVCHUK³,

Assistant of the Department of Computer Information Technologies and Systems

e-mail: solovchuk_ok@ukr.net

¹ 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,

40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

² National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

1, Kosm. Komarova av., Kyiv, 03680, Ukraine

³ Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine.

24, Pershotravneva av., Poltava, 36011, Ukraine

SOLVING A PROBLEM OF ADAPTIVE STABILIZATION FOR SOME STATIC MIMO SYSTEMS

Introduction. *The adaptive stabilization of some classes of uncertain multivariable static plants with arbitrary unmeasurable bounded disturbances is addressed in this article. The cases where the number of the control inputs does not exceed the number of the outputs are studied. It is assumed that the plant parameters defining the elements of its gain matrix are unknown. Again, the rank of this matrix may be arbitrary. Meanwhile, bounds on external disturbances are supposed to be known. The problem stated and solved in this work is to design adaptive controllers to be able to ensure the boundedness of the all input and output system's signals in the presence of parameter uncertainties.*

The purpose of the paper is to show that it is possible to stabilize any uncertain multivariable static plant which gain matrix may be either square or nonsquare and may have an arbitrary rank remaining unknown for the designer.

Methods. *The methods based on recursive point estimation of unknown plant parameters are utilized to design the adaptive inverse model-based controller.*

Results. *The asymptotic properties of the adaptive controllers have been established. Simulation results have been presented to support the theoretic studies.*

Conclusion. *The adaptive control laws proposed in the paper can guarantee the boundedness of all the signals generated by the feedback control systems. However, this important feature will be achieved via an “overparameterization” of these systems. Nevertheless, the simulation experiments demonstrate their efficiency.*

Keywords: *adaptive control, boundedness, discrete time, estimation algorithm, feedback, multivariable system, uncertainty.*

INTRODUCTION

The problem of efficient control of multivariable systems with arbitrary unmeasurable external disturbances stated several decades ago remains important both from theoretical and practical points of view until recently. Novel results in this scientific area have been reported in numerous papers and generalized in several books including [1–3]. This problem attracts an attention of many researchers dealing with the design of optimal controllers for controlling the so-called multi-inputs multi-outputs (MIMO) system by using different approaches.

Among other methods advanced in the modern control theory, the inverse model-based method that is an extension of the well-known internal model principle seems to be perspective in order to cope with arbitrary unmeasurable disturbances and to optimize some classes of multivariable control systems. It turned out that this method first intuitively advanced in [4] makes it possible to optimize the closed-loop control system containing the MIMO static (memoryless) plants whose gain matrices are square and nonsingular. Since the beginning of the 21st century, a significant progress has been achieved utilizing the inverse model-based approach, e.g., [5] and other works. Nevertheless, it is quite unacceptable if the MIMO plants to be controlled have singular square or else any nonsquare gain matrices because they are noninvertible.

To optimize the closed-loop control system containing an arbitrary MIMO static plant, the pseudoinverse model-based approach has been proposed and substantiated in [6]. Naturally enough that its gain matrix must be known to implement this approach. In practice, however, the plant parameters defining the elements of gain matrices may not be known *a priori*. In this case, the problem of designing the so-called robust multivariable control system may be stated.

The monographs [7–9] give a fairly full picture concerning the results achieved in the robust control theory to the beginning of the 2000s. Within the framework of this theory, the pseudoinverse model-based method has been modified in [10–12] to stabilize some classes of uncertain interconnected linear and nonlinear systems whose gain matrices are arbitrary. (Note that the problem of robust control of some nonlinear one-dimensional static plant has before been solved in the work [13].). Unfortunately, the pseudoinverse model-based controller having fixed parameters may not be suitable if the parameter uncertainty is great enough.

An adaptation concept plays a role of some universal tool to deal with the control of uncertain systems [8, 14–20], et al. This concept has been employed in the papers [21–23] in which adaptive controllers for controlling fix linear and nonlinear multivariable static plants have been designed and studied, assuming that their gain matrices are nonsingular square matrices. The latest results with respect to robust adaptive control of the linear and some nonlinear static plants having one output and several control inputs can be found in [8, chap. 3].

In [24], the adaptive pseudoinverse model-based control has been proposed to stabilize a nonsquare MIMO plant having the gain matrix of full rank in the absence of disturbances. Recently, the problem of the stabilization of single-input multi-outputs (SIMO) static systems with bounded disturbances has been solved in [25]. In [26, 27] the adaptive control systems containing the interconnected plants with both square and nonsquare matrices of the nonfull ranks in the presence of bounded disturbances have been designed and argued.

Difficulties that take place when adaptive control use the point estimation algorithms are how to guarantee the stability (the boundedness) of the closed-loop system [28]. See also [14, 15]. To overcome these difficulties in the case of the singular square system, the so-called fictitious plant to be controlled adaptively has been introduced in the closed-loop circuit [26]. The idea of the simultaneous adaptive control of the true and of fictitious plants advanced in this work turned out fruitful to deal with adaptive stabilization of any MIMO static plants irrespective of the ranks of their gain matrices [27].

The purpose of the paper is to generalize results obtained in [26, 27] and to show that within the framework of the adaptive approach, it is possible to stabilize the arbitrary MIMO static uncertain plant without knowledge concerning both the elements and also rank of its gain matrix.

STATEMENT OF THE PROBLEM

Let

$$y_n = Bu_{n-1} + v_{n-1} \quad (1)$$

be the equation describing a MIMO plant with measurable m -dimensional output vector, unmeasured m -dimensional disturbance vector and the r -dimensional control vectors related to the n th discrete time ($n=1, 2, \dots$) are $y_n = [y_n^{(1)}, \dots, y_n^{(m)}]^T$, $v_n = [v_n^{(1)}, \dots, v_n^{(m)}]^T$ and $u_n = [u_n^{(1)}, \dots, u_n^{(r)}]^T$, respectively. B represents some time-invariant $m \times r$ gain matrix given by

$$B = \begin{pmatrix} b^{(11)} & \dots & b^{(1r)} \\ \dots & \dots & \dots \\ b^{(m1)} & \dots & b^{(mr)} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Consider the class of MIMO plants, where the number r of the control inputs is not less than two, but does not exceed the number m of the outputs, i.e., $2 \leq r \leq m$.

The following assumptions with respect to the gain matrix B and the sequences $\{v_n^{(i)}\} = v_0^{(i)}, v_1^{(i)}, \dots$ are made.

A1. The elements of the matrix B in (2) are all unknown. However, there are some interval estimates

$$\underline{b}^{(ij)} \leq b^{(ij)} \leq \bar{b}^{(ij)}, \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, r \quad (3)$$

with the known upper and lower bounds $\underline{b}^{(ij)}$ and $\bar{b}^{(ij)}$, respectively. This implies that B may be singular, in principle.

A2. The rank of B remaining unknown, in general, may be arbitrary number which satisfies

$$1 \leq \text{rank } B \leq r \quad (= \min \{r, m\}). \quad (4)$$

A3. $\{v_n^{(i)}\}$ ($i = 1, \dots, m$) are all the arbitrary scalar sequences bounded in modulus according to

$$|v_n^{(i)}| \leq \varepsilon_i < \infty, \quad (5)$$

where ε_i s are constant. For simplicity of exposition, it is assumed that they are known.

Denote by $y^0 = [y^{0(1)}, \dots, y^{0(m)}]^T$ the desired m -dimensional output vector. Without loss of generality, suppose $|y^{0(1)}| + \dots + |y^{0(m)}| \neq 0$ implying that $0 < \|y^0\| < \infty$ ($y^{0(i)} \equiv \text{const} \quad \forall i = 1, \dots, m$).

Define the output error vector

$$e_n = y^0 - y_n. \quad (6)$$

of the current errors $e_n^{(i)} = y^{0(i)} - y_n^{(i)}$ for each i th output $y_n^{(i)}$ giving $e_n = [e_n^{(1)}, \dots, e_n^{(m)}]^T$. Then the control objective is to design an adaptive controller stabilizing the unknown plant (1). More exactly within the framework of assumptions A1) – A3), it is required to guarantee the ultimate boundedness of the sequences $\{e_n\}$ and $\{u_n\}$ in the form

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \|e_n\| < \infty, \quad (7)$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \|u_n\| < \infty. \quad (8)$$

THE CASE OF SQUARE NONSINGULAR GAIN MATRICES

Suppose that B is a square nonsingular $r \times r$ matrix meaning $r = m$ and

$$\det B \neq 0. \quad (9)$$

In this case, the control law may be chosen as in [17, sect. 4.2] setting

$$u_n = u_{n-1} + B_n^{-1} e_n, \quad (10)$$

where e_n is given by (6), and B_n^{-1} denotes the matrix obtained via the inversion of the current estimate matrix B_n for unknown B .

According to [17, sect. 4.2], the rows of B_n defining the vectors $b_n^{(i)} = [b_n^{(i1)}, \dots, b_n^{(ir)}]^T$ ($i = 1, \dots, r$) are updated by exploiting the recursive adaptation algorithm

$$b_n^{(i)} = \begin{cases} b_{n-1}^{(i)} & \text{if } |e_n^{(i)}| \leq \varepsilon_i^0, \\ b_{n-1}^{(i)} - \gamma_n^{(i)} \frac{e_n^{(i)} - \bar{\varepsilon}_i \operatorname{sign} e_n^{(i)}}{\|\nabla u_{n-1}\|_2^2} \nabla u_{n-1} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

In this expression, $e_n^{(i)}$ represents the i th component of e_n given by (6). $\|x\|_2$ denotes the Euclidean norm of some s -dimensional vector $x = [x^{(1)}, \dots, x^{(s)}]^T$ determined as $\|x\|_2 = \sqrt{[x^{(1)}]^2 + \dots + [x^{(s)}]^2}$. The variable $\nabla u_n := u_n - u_{n-1}$ is the increment of u_n . ε_i^0 s are arbitrary fixed numbers satisfying

$$\varepsilon_i^0 > \bar{\varepsilon}_i = 2\varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, r. \quad (12)$$

The coefficients $\gamma_n^{(i)}$ s are chosen as

$$0 < \underline{\gamma}^{(i)} \leq \gamma_n^{(i)} \leq \bar{\gamma}^{(i)} < 2 \quad (13)$$

to ensure

$$\det B_n \neq 0. \quad (14)$$

The asymptotical behavior of the adaptive control algorithm (10), (11) together with (12) to (14) is given in the theorem below.

Theorem 1. Consider the closed-loop stabilization system containing the plant (1) and the feedback adaptive controller described in the expressions (10)–(14). If the conditions (5) and (9) are satisfied then the control objectives (7) and (8) are achieved.

Proof. Follows from the results presented in [14, subsect. 4.2.3]. \square

THE CASE OF SQUARE SINGULAR GAIN MATRICES

Let B be a square singular $r \times r$ matrix, i.e.,

$$\det B = 0. \quad (15)$$

Basic idea to deal with a matrix B satisfying (15) is the transition from the adaptive identification of the true plant having the singular gain matrix B to the adaptive identification of a *fictitious* plant with the nonsingular gain matrix \tilde{B} of the form

$$\tilde{B} = B + \delta_0 I_r, \quad (16)$$

where I_r denotes the identity $r \times r$ matrix and δ_0 is a fixed quantity [26].

Although \tilde{B} as well as B remain unknown, the requirement

$$\det \tilde{B} \neq 0 \quad (17)$$

can always be satisfied by the suitable choice of δ_0 in (16). In fact, each i th eigenvalue $\lambda_i(B)$ of B lies in one of the r closed regions of the complex z -plane consisting of all the Geršgorin discs [29, p. 146]:

$$|z - b^{(ii)}| \leq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^r |b^{(ij)}|, \quad i=1, \dots, r. \quad (18)$$

Since, at least, one of the eigenvalues $\lambda_i(B)$ is equal to zero (due to the singularity of B), by virtue of (17) there are the numbers

$$\underline{\beta}^{(i)} := b^{(ii)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^r |b^{(ij)}|, \quad \bar{\beta}^{(i)} := b^{(ii)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^r |b^{(ij)}| \quad (19)$$

such that if

$$|b^{(i1)}| + \dots + |b^{(ir)}| \neq 0, \quad (20)$$

then either $\underline{\beta}^{(i)} \leq 0$ but $\bar{\beta}^{(i)} > 0$ or $\underline{\beta}^{(i)} < 0$ but $\bar{\beta}^{(i)} \geq 0$. These numbers are defined as the intersection of the i th Geršgorin disc with the real axis of the complex z -plane as show in Figs 1 and 2, respectively, left. In both cases, $\underline{\beta}^{(i)} \bar{\beta}^{(i)} \leq 0$ if (20) is satisfied because $\underline{\beta}^{(i)}$ and $\bar{\beta}^{(i)}$ cannot have the same sign.

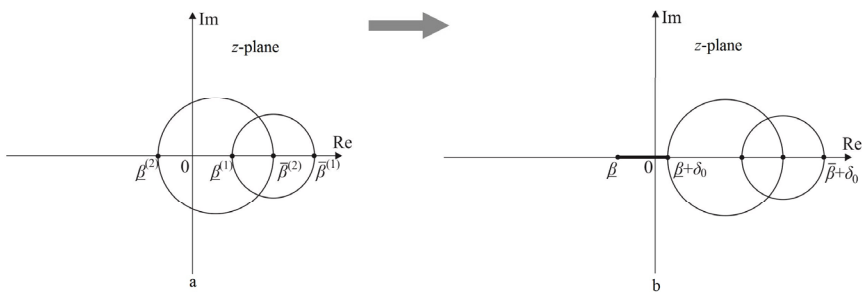


Fig. 1. The Geršgorin discs for $r=2$ in the case $|\underline{\beta}^{(2)}| < |\bar{\beta}^{(1)}|$

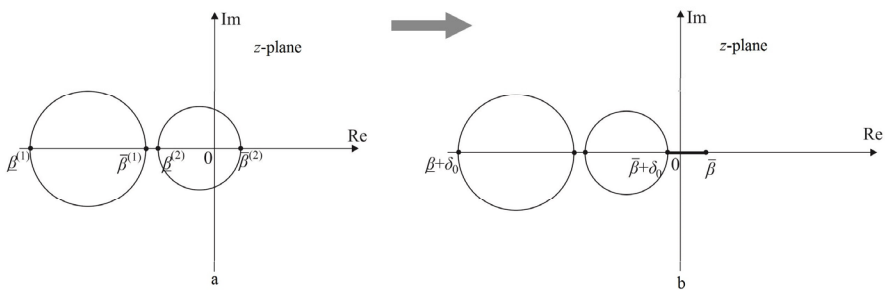


Fig. 2. The Geršgorin discs for $r=2$ in the case $|\bar{\beta}^{(2)}| < |\underline{\beta}^{(1)}|$

Denoting

$$\underline{\beta} := \min \{\beta^{(1)}, \dots, \beta^{(r)}\}, \quad \bar{\beta} := \max \{\bar{\beta}^{(1)}, \dots, \bar{\beta}^{(r)}\}, \quad (21)$$

consider the following two cases: a) $|\underline{\beta}| < |\bar{\beta}|$; b) $|\underline{\beta}| > |\bar{\beta}|$ (The case when $|\underline{\beta}| = |\bar{\beta}|$ can be combined with any two cases.) In order to go to the gain matrix \tilde{B} of the fictitious plant having the form (16) in the case a), it is sufficient to shift the Geršgorin disc (18) right taking

$$\delta_0 > |\underline{\beta}|, \quad (22)$$

as shown in Fig. 1, right. In the case b), the discs (9) need to be shifted left according to

$$\delta_0 < -|\bar{\beta}|. \quad (23)$$

See Fig. 2, right. In both cases, the nonsingularity of \tilde{B} is guaranteed. Nevertheless, the conditions (22) and (23) cannot be satisfied, as yet. In fact, the numbers $\underline{\beta}$ and $\bar{\beta}$ given by the expressions (21) depend of $\beta^{(i)}$ and $\bar{\beta}^{(i)}$ s defined by (19). But they are unknown because $b^{(ij)}$ s are all unknown.

The following actions are proposed to choose a number δ_0 satisfying (17). Introduce

$$\begin{aligned} \beta_{\min}^{(i)} &:= \underline{b}^{(ii)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^r \max \{|\underline{b}^{(ij)}|, |\bar{b}^{(ij)}|\}, \\ \bar{\beta}_{\max}^{(i)} &:= \bar{b}^{(ii)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^r \max \{|\underline{b}^{(ij)}|, |\bar{b}^{(ij)}|\}, \end{aligned} \quad (24)$$

minimizing and maximizing in $b^{(ij)} \in [\underline{b}^{(ij)}, \bar{b}^{(ij)}]$ the right sides of (19) for $\beta^{(i)}$ and $\bar{\beta}^{(i)}$, respectively.

Further, the number δ_0 is found to satisfy the conditions

$$\begin{aligned} \delta_0 &> -\beta_{\min} \quad \text{if} \quad |\beta_{\min}| < |\bar{\beta}_{\max}|, \\ \delta_0 &< -\bar{\beta}_{\max} \quad \text{if} \quad |\beta_{\min}| > |\bar{\beta}_{\max}|, \end{aligned} \quad (25)$$

where $\beta_{\min}, \bar{\beta}_{\max}$ represent some quantities defined as follows:

$$\begin{aligned} \beta_{\min} &:= \min \{\beta_{\min}^{(1)}, \dots, \beta_{\min}^{(r)}\}, \\ \bar{\beta}_{\max} &:= \max \{\bar{\beta}_{\max}^{(1)}, \dots, \bar{\beta}_{\max}^{(r)}\}. \end{aligned} \quad (26)$$

It can be clarified that if (25) together with (24) and (26) will be satisfied then the condition (17) will without fail be ensured.

After determining the quantity δ_0 we can proceed to the consideration of the fictitious plant. Since the input variables $u_n^{(1)}, \dots, u_n^{(r)}$ and the disturbances $v_n^{(1)}, \dots, v_n^{(N)}$ of both true plant and fictitious plant are the same, this feature makes it possible to describe our fictitious plant by the equation

$$\tilde{y}_n = \tilde{B}u_{n-1} + v_{n-1}, \quad (27)$$

similar to (1). In this equation, $\tilde{y}_n = [\tilde{y}_n^{(1)}, \dots, \tilde{y}_n^{(r)}]^T$ denotes the output vector of the fictitious plant.

It is interesting that the components of \tilde{y}_n can be measured while the components of v_n in (28) remain unmeasurable. In fact, substituting (16) into (27) due to (1) we produce

$$\tilde{y}_n = y_n + \delta_0 u_{n-1}. \quad (28)$$

It is seen from (28) that \tilde{y}_n can always be found indirectly having u_n and y_n to be measured.

Now, our problem reduces to the known problem of adaptive control applicable to the fictitious plant (27) with the unknown gain matrix \tilde{B} in the presence of arbitrary bounded disturbances $v_n^{(1)}, \dots, v_n^{(r)}$. Its solving follows the steps of the section above. Namely, the adaptive control law is designed in the form

$$u_n = u_{n-1} + \tilde{B}_n^{-1} \tilde{e}_n, \quad (29)$$

in which, instead of the current estimate B_n of B , another \tilde{B}_n is exploited, and the error vector e_n defined in (6) is replaced by

$$\tilde{e}_n = y^0 - \tilde{y}_n \quad (30)$$

with \tilde{y}_n given by the expression (28).

The adaptive identification algorithm used to determine the estimates \tilde{B}_n may be taken as

$$\tilde{b}_n^{(i)} = \begin{cases} \tilde{b}_{n-1}^{(i)} & \text{if } |\tilde{e}_n^{*(i)}| \leq \varepsilon_i^0, \\ \tilde{b}_{n-1}^{(i)} + \gamma_n \frac{\tilde{e}_n^{*(i)} - \bar{\varepsilon}_i \text{sign} \tilde{e}_n^{*(i)}}{\|\nabla u_{n-1}\|_2^2} \nabla u_{n-1} & \text{otherwise, } i = 1, \dots, r, \end{cases} \quad (31)$$

which is similar to (11). In this algorithm, ε_i^0 and $\bar{\varepsilon}_i$ are given by (12).

$$\tilde{e}_n^{*(i)} = \nabla \tilde{y}_n^{(i)} - \tilde{b}_{n-1}^{(i)T} \nabla u_{n-1} \quad (32)$$

represent the i th component of the identification error \tilde{e}_n^* given as

$$\tilde{e}_n^* = \nabla \tilde{y}_n - \tilde{B}_{n-1} \nabla u_{n-1}, \quad (33)$$

where $\nabla \tilde{y}_n^{(i)} := \tilde{y}_n^{(i)} - \tilde{y}_{n-1}^{(i)}$, and the notation $\tilde{b}_n^{(i)T} := [\tilde{b}_n^{(i1)}, \dots, \tilde{b}_n^{(i\tau)}]$ of the i th row of \tilde{B}_n is introduced. The coefficients $\gamma_n^{(i)}$ s are chosen as in (13) to

$$\det \tilde{B}_n \neq 0. \quad (34)$$

The feedback adaptive robust control system described in the equations (1), (29), (31) is designed as depicted in Fig. 3. In this figure, the notation $\nabla \tilde{y}_n^* := \tilde{B}_{n-1} \nabla u_{n-1}$ is introduced.

The asymptotic properties of the adaptive control system are established in the following theorem.

Theorem 2. Determine δ_0 using the formula (25) together with (24) and (26), and choose an arbitrary initial $\tilde{B}_0 = B_0 + \delta_0 I$ with $B_0 = \{b_0^{(ij)}\}$ whose elements satisfy the conditions $\underline{b}^{(ij)} \leq b_0^{(ij)} \leq \bar{b}^{(ij)}$. Subject to assumptions A1 – A3, the adaptive controller described in the equations (29), (31) together with (28), (30) when applied to the plant (1) yields (7), (8).

Proof. See [26].

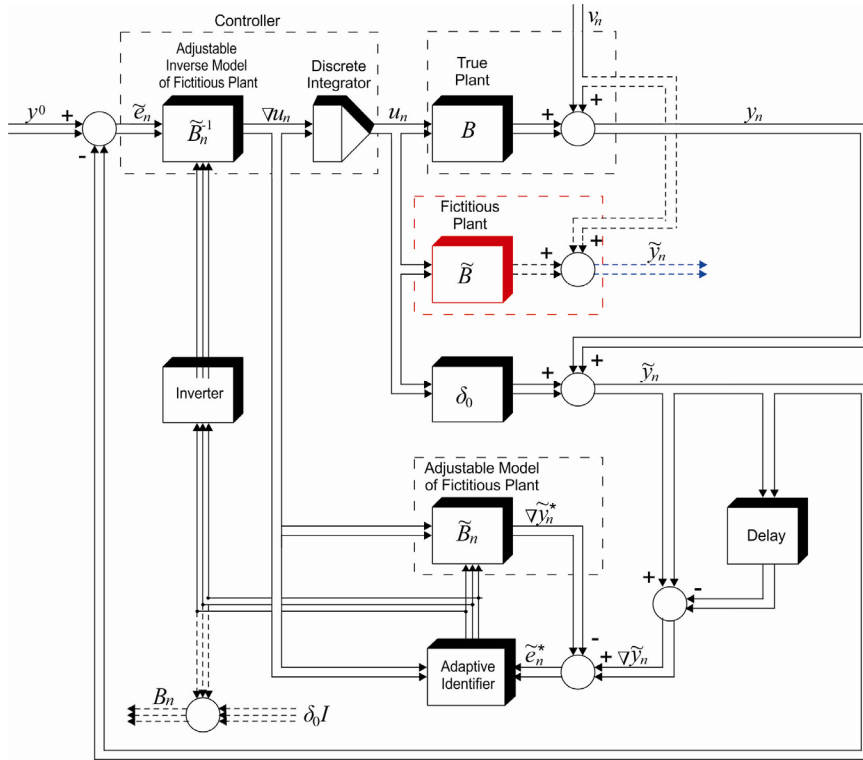


Fig. 3. Configuration of adaptive stabilization system

THE CASE OF NONSQUARE GAIN MATRICES WITH ARBITRARY RANKS

Let B be a nonsquare $m \times r$ matrix of the form (2) with unknown rank satisfying (4). Define the so-called submatrices $B[i_1[k], \dots, i_r[k] | 1, \dots, r] \in \mathbf{R}^{r \times r}$ [29, part I, subsect. 2.2] whose rows represent the rows of B with the numbers $i_1[k], \dots, i_r[k]$ ($1 \leq i_1[k] < \dots < i_r[k] \leq m$). The quantity of these matrices is equal to $N = \binom{m}{r}$. Denoting by $B[k]$ the submatrix which corresponds to a k th subset $\{i_1[k], \dots, i_r[k]\}$, write the equations of some k plants as:

$$y_n[k] = B[k]u_{n-1} + v_{n-1}[k], \quad k = 1, \dots, N, \quad (35)$$

where $y_n[k] = [y_n^{(i_1[k])}, \dots, y_n^{(i_r[k])}]^T \in \mathbf{R}^r$, and $v_n[k] = [v_n^{(i_1[k])}, \dots, v_n^{(i_r[k])}]^T \in \mathbf{R}^r$.

In accordance with the approach proposed in the previous section, pass from (35) to the equations of the fictitious plants described by

$$\tilde{y}_n[k] = \tilde{B}[k]u_{n-1} + v_{n-1}[k], \quad k = 1, \dots, N \quad (36)$$

with the same u_{n-1} and $v_{n-1}[k]$. In these equations, $\tilde{y}_n[k]$ denotes the r -dimensional output vector related to the k th fictitious plant whose gain matrix $\tilde{B}[k]$ is defined as follows:

$$\tilde{B}[k] = B[k] + \delta_0[k]I_r, \quad (37)$$

where $\delta_0[k]$ is a fixed quantity depending on k . This quantity is calculated for each $k = 1, \dots, N$ using the technique described in the previous section. Namely, taking into account the constraints (3), $\delta_0[k]$ can always be found to ensure

$$\det \tilde{B}[k] \neq 0 \quad \forall k = 1, \dots, N. \quad (38)$$

It follows from (35) to (37) that

$$\tilde{y}_n[k] = y_n[k] + \delta_0[k]u_{n-1}. \quad (39)$$

This expression shows that although as $\tilde{B}[k]$ as $B[k]$ remain unknown, however, the components of all N the vectors $\tilde{y}_n[k]$ can indirectly be “measured” after measuring the components of y_n and u_{n-1} , and it is essential.

If the conditions (38) are satisfied, then the problem of the adaptive stabilization of the true plant (1) can be reduced to the problem of simultaneous adaptive stabilization of all N fictitious plants (36) with unknown but nonsingular $r \times r$ gain matrices $\tilde{B}[k]$ ($k = 1, \dots, N$) via forming at each n th time instant a set of N different “potentially” possible controls $u_n[1], \dots, u_n[N]$ and selecting one of them in accordance with certain choice rule [27] given below.

Following to [27], the adaptive control law to be applicable to any fictitious plant is designed in the form

$$u_n[k] = u_{n-1} + \tilde{B}_n^{-1}[k] \tilde{e}_n[k], \quad k = 1, \dots, N, \quad (40)$$

where $\tilde{e}_n[k] = y^0[k] - \tilde{y}_n[k]$ with $y^0[k] = [y^{0(i_1[k])}, \dots, y^{0(i_r[k])}]^T$ defines the output error vector related to the k th fictitious plant at the n th time instant, and $\tilde{B}_n[k] \in \mathbf{R}^{r \times r}$ is the current estimate of unknown $r \times r$ matrix $\tilde{B}[k]$ at the same time instant satisfying

$$\det \tilde{B}_n[k] \neq 0 \quad \forall k = 1, \dots, N. \quad (41)$$

As the adaptation algorithms, the standard recursive procedures for the adaptive identification of each k th fictitious plant (35) described by

$$\tilde{b}_n^{(i)}[k] = \begin{cases} \tilde{b}_{n-1}^{(i)}[k] & \text{if } |\tilde{e}_n^{*(i)}[k]| \leq \varepsilon_i^0, \\ \tilde{b}_{n-1}^{(i)}[k] + \gamma_n^{(i)} \frac{\tilde{e}_n^{*(i)}[k] - \bar{\varepsilon}_i \operatorname{sign} \tilde{e}_n^{*(i)}[k]}{\|\nabla u_{n-1}\|_2^2} \nabla u_{n-1} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (42)$$

$$i = 1, \dots, r, \quad k = 1, \dots, N$$

are proposed. In these algorithms, $\tilde{b}_n^{(i)}[k]$ denotes the r -dimensional estimate vector obtained by transposing the i th row of $\tilde{B}_n[k]$, and

$$\tilde{e}_n^{*(i)}[k] = \tilde{y}_n^{(i)}[k] - \tilde{y}_{n-1}^{(i)}[k] - \tilde{b}_{n-1}^{(i)T}[k] \nabla u_{n-1} \quad (43)$$

represents the scalar variable making sense of the i th component of $\tilde{e}_n^*[k] \in \mathbf{R}^r$ that is the identification error vector related to the k th fictitious plant. The coefficients $\gamma_n^{(i)}$ s are chosen from the ranges $[\underline{\gamma}^{(i)}, \bar{\gamma}^{(i)}]$ (similarly to that in (13)) to ensure the requirement (41).

Next, add the adaptation algorithms described in the formulas (42) together with (43) by an algorithm for estimating unknown B defined as follows:

$$b_n^{(i)} = \begin{cases} b_{n-1}^{(i)} & \text{if } |e_n^{*(i)}| \leq \varepsilon_i^0, \\ b_{n-1}^{(i)} + \gamma_n^{(i)} \frac{e_n^{*(i)} - \bar{\varepsilon}_i \operatorname{sign} e_n^{*(i)}}{\|\nabla u_{n-1}\|_2^2} \nabla u_{n-1} & \text{otherwise, } i = 1, \dots, m, \end{cases} \quad (44)$$

where $b_n^{(i)T}$ represents the i th row of the estimate matrix B_n , and

$$e_n^{*(i)} = y_n^{(i)} - y_{n-1}^{(i)} - b_{n-1}^{(i)T} \nabla u_{n-1} \quad (45)$$

is the i th component of the identification error vector $e_n^* = y_n - y_{n-1} - B_{n-1} \nabla u_{n-1}$ ($\bar{\varepsilon}_i$ and ε_i^0 are given by (12)).

The estimation procedure defined in (44) together with (45) makes it possible to estimate the m predicted output errors $\bar{e}_{n+1}^{(i)}[k]$ ($i=1, \dots, m$) for the each i th output of true plant (1) at any n using the formula

$$|\bar{e}_{n+1}^{(i)}[k]| = |y^{0(i)} - b_n^{(i)T} u_n[k]| + \varepsilon^{(i)}, \quad i=1, \dots, m. \quad (46)$$

The synthesis of the adaptive controller is finished by the choice of the control u_n from the set $\{u_n[1], \dots, u_n[N]\}$ with $u_n[k]$ given by (40). This choice is implemented by the rule giving the minimum of the 1-norm of $\bar{e}_{n+1}[k] = [\bar{e}_{n+1}^{(1)}[k], \dots, \bar{e}_{n+1}^{(m)}[k]]^T$ as

$$u_n = \arg \min_{u_n[k]} \sum_{i=1}^m |\bar{e}_{n+1}^{(i)}[k]|, \quad (47)$$

where $\bar{e}_{n+1}^{(i)}[k]$ s are specified by (46).

Remark. The definition of the 1-norm $\|\cdot\|_1$ can be found in [7, p. 260].

The asymptotic properties of the adaptive controller described in this section are given in theorem below (the main result).

Theorem 3. Consider the feedback control system containing the plant (1) in which $r < m$, and the adaptive controller defined in (42), (47) together with (39), (46) and (41). Using the constants (3), determine $\delta_0[1], \dots, \delta_0[N]$ to satisfy (38). Let assumption A1–A3 be valid. Then, this controller applied to plant (1) guarantees that the control objectives (7) and (8) will be achieved.

Proof. Follows the lines of [14, chap. 4]. (Due to space limitation, details are omitted.)

Note that Theorem 3 does not guarantee that the ultimate error $\lim_{n \rightarrow \infty} \sup \|e_n\|$ will become as in the nonadaptive case when there is no parameter uncertainty and the pseudoinverse model-based controller proposed in [6] can be applied.

SIMULATION

A simulation experiment was conducted to illustrate the performance of the proposed adaptive control in the case when $r=2, m=3$. As the gain matrix,

$$B = \begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 1 \\ 3 & 1.5 \end{pmatrix}$$

with nonfull rank (rank $B = 1$) was taken. Since $N = 3$, it produces the following three submatrices:

$$B[1] = \begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}, \quad B[2] = \begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 3 & 1.5 \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad B[3] = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 1.5 \end{pmatrix}.$$

Further, the three vectors $y_n[1] = [y_n^{(1)}, y_n^{(2)}]^T$, $y_n[2] = [y_n^{(1)}, y_n^{(3)}]^T$ and $y_n[3] = [y_n^{(2)}, y_n^{(3)}]^T$ was introduced to describe the plants (35) having the gain matrices $B[1]$, $B[2]$ and $B[3]$, respectively.

The quantities $\delta_0[1] = 1.1$, $\delta_0[2] = 1.2$ and $\delta_0[3] = 1.3$ guaranteeing $\tilde{B}[k]$ to be nonsingular were derived from (3). The initial $\tilde{B}_0[1]$, $\tilde{B}_0[2]$ and $\tilde{B}_0[3]$ were chosen as $\tilde{B}_0[k] = B_0[k] + \delta_0[k]I_r$ with the initial elements of $B_0[k]$ which were selected from B inside the corresponding ranges $[\underline{b}^{(ij)}, \bar{b}^{(ij)}]$ specified as follows: $b^{(11)} \in [1, 5]$, $b^{(12)} \in [0, 2]$, $b^{(21)} \in [0, 2]$, $b^{(22)} \in [1, 2]$, $b^{(31)} \in [1, 4]$, $b^{(32)} \in [0, 5]$. Namely, we set $b_0^{(11)} = 1$, $b_0^{(12)} = 1$, $b_0^{(21)} = 0$, $b_0^{(22)} = 1.9$, $b_0^{(31)} = 2$, $b_0^{(32)} = 2.1$. The desired output vector was given as $y^0 = [1, 3, 7]^T$.

The performance of the simulated adaptive control system with the disturbance sequences $\{v_n^{(i)}\} = v_0^{(i)}, v_1^{(i)}, \dots$ generated as some pseudorandom i.i.d. variables taken from $-0.1 \leq v_n^{(1)} \leq 0.1$, $-0.2 \leq v_n^{(2)} \leq 0.2$, $-0.08 \leq v_n^{(3)} \leq 0.08$ is presented in Figs. 4 and 5.

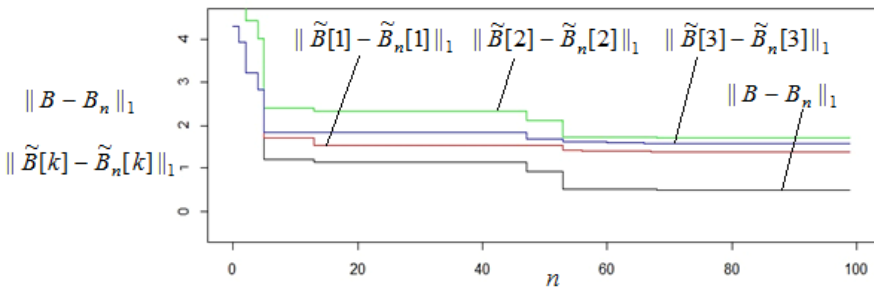


Fig. 4. Variables describing the adaptive estimation processes

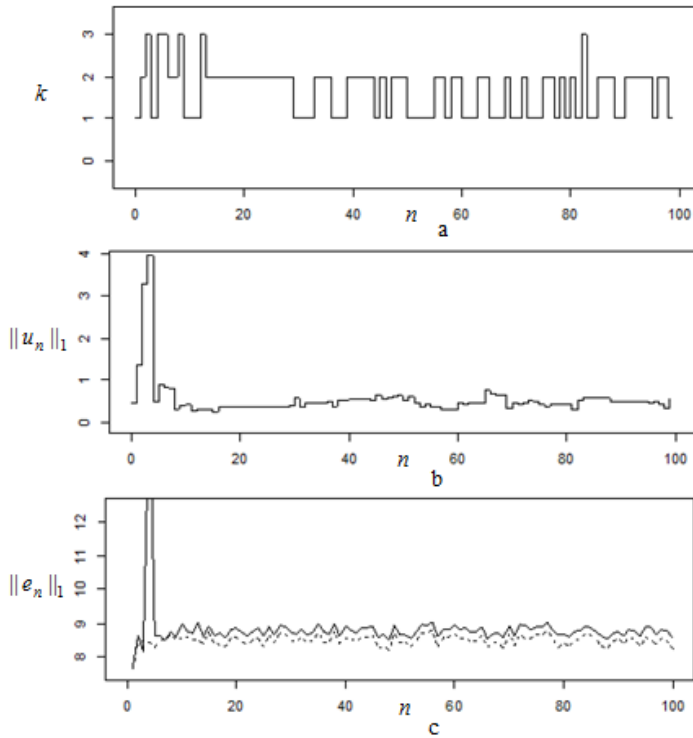


Fig. 5. The behavior of the control system: a) the current number k of control $u_n[k]$ chosen from $\{u_n[1], u_n[2], u_n[3]\}$ at given n ; b) the 1-norm of control vector; c) the 1-norm of output vector in adaptive case (solid line) and in nonadaptive optimal case (dashed line)

Figs. 5, a — c demonstrate that the performance of the proposed adaptive controller applied to the static MIMO plant having some nonsquare gain matrix with nonfull rank is successful enough.

CONCLUSION

It has been established that the adaptive control laws can guarantee the boundedness of all the signals generated by the feedback control systems. However, this important feature will achieve via an “overparameterization” of these systems. Nevertheless, the simulation experiments demonstrate their efficiency.

REFERENCES

1. Maciejowski J. M. *Multivariable Feedback Design*. Wokingham: Addison-Wesley, 1989. 490 p.
2. Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control*. UK, Chichester: Wiley, 1996. 592 p.
3. Albertos P., Sala A. *Multivariable Control Systems: An Engineering Approach*. London: Springer, 2006. 340 p.
4. Pukhov G. E., Zhuk K. D. *Synthesis of Interconnected Control Systems via Inverse Operator Method*. Kiev: Nauk. dumka, 1966. 218 p. (in Russian).
5. Lyubchyk L. M. Disturbance rejection in linear discrete multivariable systems: inverse model approach. Proc. 18th IFAC World Congress (28 Aug–2 Sep, 2011, Milano, Italy). Milano, 2011. P. 7921–7926.

6. Skurikhin V. I., Gritsenko V. I., Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Generalized inverse operator method in the problem of optimal controlling linear interconnected static plants. *Dopovidi NAN Ukrainy* 2014. no. 8. P. 57–66. (in Russian).
7. Polyak, B.T., Shcherbakov, P. S. *Robust Stability and Control*. Moscow: Nauka, 2002. 303 p. (in Russian).
8. Kuntsevich V. M. Control under Uncertainty: Guaranteed Results in Control and Identification Problems. Kyiv: Nauk. dumka, 2006. 264 p. (in Russian).
9. Sokolov V.F. *Robust Control with Bounded Disturbances*. Syktyvkar: Komi Scientific Center, Ural Branch of the RAS, 2011. 218 p. (in Russian).
10. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Pseudoinversion in the problems of robust stabilizing multivariable discrete-time control systems of linear and nonlinear static objects under bounded disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. vol. 49. no. 5, P. 35–48.
11. Zhitetskii L. S., Skurikhin V. I., Solovchuk K. Yu. Stabilization of a nonlinear multivariable discrete-time time-invariant plant with uncertainty on a linear pseudoinverse model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017. vol. 56. no. 5. P. 759–773.
12. Zhiteckii L. S., Azarskov V. N., Solovchuk K. Yu., Sushchenko O. A. Discrete-time robust steady-state control of nonlinear multivariable systems: a unified approach. Proc. 19th IFAC World Congress (24th–29th of Aug, 2014, Cape Town, South Africa). Cape Town, 2014 P. 8140–8145.
13. Bunich A.L. On some nonstandard problems of the synthesis of discrete systems. *Autom. Remote Control*. 2000. no. 6. P. 994–1002.
14. Fomin V. N., Fradkov A. L., Yakubovich V. A. *Adaptive Control of Dynamic Plants*. Moscow: Nauka, 1981. (in Russian).
15. Goodwin G.C., Sin K.S. *Adaptive Filtering, Prediction and Control*. Engewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 1984. 540 p.
16. Landau I. D., Lozano R., M'Saad M. *Adaptive Control*. London: Springer, 1997. 590 p.
17. Zhiteckii L. S., Skurikhin V. I. *Adaptive Control Systems with Parametric and Non-parametric Uncertainties*. Kyiv: Nauk. dumka, 2010. 301 p. (in Russian).
18. Narendra K. S., Annaswamy A. M. *Stable Adaptive Systems*. NY: Dover Publications, 2012. 895 p.
19. Ioannou P., Sun J. *Robust Adaptive Control*. NY: Dover Publications, 2013. 852 p.
20. Åström K. J., Wittenmark B. *Adaptive Control: 2nd Edition*. NY: Dover Publications, 2014. 577 p.
21. Bakan G.M., Volosov V.V., Salnikov N.N. Adaptive control of a linear static plant by a model with unknown parameters. *Kibernetika*. 1984. no. 2. P. 63–68.
22. Lublinskii B.S., Fradkov A.L. Adaptive control of nonlinear statistical processes with an implicit characteristic. *Autom. Remote Control*. 1983. no. 4. P. 510–518.
23. Bakan G.M. Adaptive control of a multi-dimensional static process under nonstatistical uncertainty. *Autom. Remote Control*. 1987. no. 1. P. 76–88.
24. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Adaptive stabilization of some multivariable systems with nonsquare gain matrices of full rank. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2018. no. 2. P. 44–61.
25. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Robust adaptive pseudoinverse model-based control of an uncertain SIMO memoryless system with bounded disturbances. Proc. IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (2nd – 6th of Jul, 2019, UKRCON-2019, Lviv). Lviv, 2019. P. 628–633.
26. Azarskov V.N., Zhiteckii L.S., Solovchuk K.Yu. Parametric identification of the interconnected static closed-loop system: a special case. Proc. 12th All-Russian Control Problems Council (16 – 19 Jun, VSPU-2014), Moscow, 2014 P. 2764–2776.
27. Zhiteckii L.S., Azarskov V.N., Solovchuk K.Yu. Adaptive robust control of interconnected static plants with nonsquare gain matrixes. Proc. 13th All-Russian Control Problems Council (17 – 20 Jun, VSPU-2019), Moscow, 2019. 6 p.
28. Anderson B.D.O., Bitmead R.R., Johnson C.R., Kokotovic P.V., Kosut R.L., Mareels I.M.Y., Praly L., and Riedle B.D. *Stability of Adaptive Systems: Passivity and Averaging Analysis*. USA, Mas.: MIT Press. 1986. 340 p.

29. Marcus M., Minc H. A Survey of Matrix Theory and Matrix Inequalities. Boston: Aliyn and Bacon, 1964. 208p.

Received 30.05.2019

ЛІТЕРАТУРА

1. Maciejowski J. M. Multivariable Feedback Design. Wokinghan: Addison-Wesley, 1989. 409 p.
2. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control. UK, Chichester: Wiley, 1996. 592 p.
3. Albertos P., Sala A. Multivariable Control Systems: an Engineering Approach. London: Springer, 2006. 340p.
4. Пухов Г.Е., Жук К.Д. Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов. Киев: Наук. думка, 1966. 218 с.
5. Lyubchik L. M. Disturbance rejection in linear discrete multivariable systems: inverse model approach. Prep. 18th IFAC World Congress, Milano, 2011. P. 7921–7926.
6. Скурихин В.И., Гриценко В.И., Житецкий Л.С., Соловчук К.Ю. Метод обобщенного обратного оператора в задаче оптимального управления линейными многосвязными статическими объектами. Доклады НАН Украины. 2014. №8. С. 57–66.
7. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
8. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. Киев: Наук. думка, 2006. 264с.
9. Соколов В.Ф. Робастное управление при ограниченных возмущениях. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2011. 218 с.
10. Zhitetskii L. S., Skurikhin V. I., Solovchuk K. Yu. Stabilization of a nonlinear multivariable discrete-time invariant plant with uncertainty on a linear pseudoinverse model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017. vol. 56. no. 5. P. 759–773.
11. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Pseudoinversion in the problems of robust stabilizing multivariable discrete-time control systems of linear and nonlinear static objects under bounded disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. vol. 49. no. 5. P. 35–48.
12. Zhiteckii L. S., Azarskov V. N., Solovchuk K. Yu., Sushchenko O. A. Discrete-time robust steady-state control of nonlinear multivariable systems: a unified approach. Proc. 19th IFAC World Congress (24th – 29th of Aug, 2014, Cape Town, South Africa). Cape Town, 2014 P. 8140–8145.
13. Bunich A.L. On some nonstandard problems of the synthesis of discrete systems. *Autom. Remote Control*. 2000. no. 6. P. 994–1002.
14. Фомин В.Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. 448 с.
15. Goodwin G.C., Sin K.S. *Adaptive Filtering, Prediction and Control*. Engewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 1984. 540 p.
16. Landau I. D., Lozano R., M'Saad M. Adaptive Control. London: Springer, 1997. 590 p.
17. Житецкий Л.С., Скурихин В.И. Адаптивные системы управления с параметрическими и непараметрическими неопределенностями. Киев: Наук. думка, 2010. 301 с.
18. Narendra K. S., Annaswamy A. M. Stable Adaptive Systems. NY: Dover Publications, 2012. 895 p.
19. Ioannou P., Sun J. Robust Adaptive Control. NY: Dover Publications, 2013. 852 p.
20. Åström K. J., Wittenmark B. Adaptive Control: 2nd Edition. NY: Dover Publications, 2014. 577 p.
21. Бакан Г.М., Волосов В.В., Сальников Н.Н. Адаптивное управление линейным статическим объектом по модели с неизвестными параметрами. *Кибернетика*. 1984. № 2. С. 63–68.
22. Lublinskii B.S., Fradkov A.L. Adaptive control of nonlinear statistical processes with an implicit characteristic. *Autom. Remote Control*. 1983. no. 4. P. 510–518.
23. Bagan G.M. Adaptive control of a multi-dimensional static process under nonstatistical uncertainty. *Autom. Remote Control*. 1987. no. 1. P. 76–88.
24. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Adaptive stabilization of some multivariable systems with nonsquare gain matrices of full rank. *Кибернетика и вычислительная техника*, 2018. № 2. P. 44–61.

25. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Robust adaptive pseudoinverse model-based control of an uncertain SIMO memoryless system with bounded disturbances. Proc. IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (2nd–6th of Jul, 2019UKRCON-2019, Lviv). Lviv, Ukraine, 2019, P. 628–633.
26. Азарсков В.Н., Житецкий Л.С., Соловчук К.Ю. Параметрическая идентификация многосвязного статического объекта в замкнутом контуре управления: специальный случай. *Труды 12-го Всероссийского совещания по проблемам управления* (ВСПУ-2014), Москва: ИПУ, 2014. С. 2764–2776.
27. Житецкий Л.С., Азарсков В.Н., Соловчук К.Ю. Адаптивное робастное управление многосвязными статическими объектами с прямоугольными матрицами коэффициентов усиления. *Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления* (ВСПУ-2019), Москва: ИПУ, 2019. 6 с.
28. *S Stability of Adaptive Systems: Passivity and Averaging Analysis* / Anderson B.D.O., Bitmead R.R., Johnson C.R et. al. USA, Mas.: MIT Press. 1986. 340 p.
29. Marcus M., Minc H. A Survey of Matrix Theory and Matrix Inequalities. Boston: Aliyn and Bacon, 1964. 208 p.

Отримано 30.05.2019

Л.С. Житецкий¹, канд. техн. наук,
в.о. зав. відд. інтелектуальних автоматичних систем
e-mail: leonid_zhiteckii@i.ua

В.М. Азарсков², д-р техн. наук, професор,
зав. каф. аерокосмічних систем керування
e-mail: azarskov@nau.edu.ua

К.Ю. Соловчук³, аспірантка,
асистентка каф. комп'ютерних інформаційних
технологій та систем
e-mail: solovchuk_ok@ukr.net

¹ Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних
технологій та систем НАН України і МОН України,
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

² Національний авіаційний університет,
пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03680, Україна

³ Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
пр. Першотравневий, 24, м. Полтава, 36011, Україна

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ОДНІЄЇ ЗАДАЧІ АДАПТИВНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДЕЯКИХ СТАТИЧНИХ МІМО СИСТЕМ

Вступ. У статті розглянуто задачу адаптивної стабілізації деяких класів невизначених багатовимірних статичних об'єктів з довільними невимірними обмеженими збуреннями. Досліджено випадки, коли кількість входів керування не перевищує кількість виходів. Припущено, що параметри об'єкта, що визначають елементи матриці коефіцієнтів підсилення, невідомі. Окрім того, ранг цієї матриці може бути довільним. Водночас, межі зовнішніх збурень повинні бути відомі. Поставлена та вирішена у роботі задача полягає в тому, щоб побудувати адаптивний регулятор, здатний забезпечити обмеженість всіх вхідних і вихідних сигналів системи за наявності параметричних невизначеностей.

Мета статті — показати, що можна стабілізувати довільний невизначений багатовимірний статичний об'єкт, матриця коефіцієнтів підсилення якого може бути квадратною або прямокутною і мати довільний ранг, залишаючись невідомою конструктору системи.

Методи. Методи, що базуються на рекурентному точковому оцінюванні невідомих параметрів об'єкта, використовуються для побудови адаптивного регулятора на основі оберненої моделі.

Результати. Встановлено асимптотичні властивості адаптивних регуляторів. Щоб підкріпити теоретичні дослідження, надано результати моделювання.

Висновки. Адаптивні закони керування, що пропонуються в статті, можуть гарантувати обмеженість всіх сигналів, що генеруються системами керування зі зворотним зв'язком. Однак це важлива властивість буде досягатися за рахунок «зверхпараметризації» цих систем, і модельні експерименти показують їхню ефективність.

Ключові слова: адаптивне керування, обмеженість, дискретний час, алгоритм оцінювання, зворотний зв'язок, багатовимірна система, невизначеність.

Л.С. Житецький¹, канд. техн. наук,

и.о. зав. отд. интеллектуальных автоматических систем

e-mail: leonid_zhiteckii@i.ua

В.Н. Азарсков², д-р. техн. наук, профессор,

зав. кафедрой аэрокосмических систем управления

e-mail: azarskov@nau.edu.ua

К.Ю. Соловчук, аспирантка

ассистентка каф. компьютерных информационных технологий и систем

e-mail: solovchuk_ok@ukr.net

¹Международный научно-учебный центр информационных технологий

и систем НАН Украины и МОН Украины,

пр. Аккад. Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина

²Национальный авиационный университет,

пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, 03680, Украина

³Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,

пр. Первомайский, 24, г. Полтава, 36011, Украина

РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ЗАДАЧИ АДАПТИВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ СТАТИЧЕСКИХ МИМО СИСТЕМ

Введение. В статье рассмотрена задача адаптивной стабилизации некоторых классов неопределенных многомерных статических объектов с произвольными неизмеряемыми ограниченными возмущениями. Исследованы случаи, когда количество входов управления не превышает количество выходов. Предположено, что параметры объекта, определяющие элементы ее матрицы коэффициентов усиления, неизвестны. Кроме того ранг этой матрицы может быть произвольным. Между тем, границы внешних возмущений должны быть известны. Задача, которая была поставлена и решена в работе, состоит в том, чтобы построить адаптивный регулятор, способный обеспечить ограниченность всех входных и выходных сигналов системы при наличии параметрических неопределенностей.

Цель статьи — показать, что можно стабилизировать любой неопределенный многомерный статический объект, матрица коэффициентов усиления которого может быть квадратной или прямоугольной и иметь произвольный ранг, оставаясь неизвестной конструктору системы.

Методы. Методы, основанные на рекуррентном точечном оценивании неизвестных параметров объекта, используются для построения адаптивного регулятора на основе обратной модели.

Результаты. Установлены асимптотические свойства адаптивных регуляторов. Чтобы подкрепить теоретические исследования, представлены результаты моделирования.

Выводы. Адаптивные законы управления, предложенные в статье, могут гарантировать ограниченность всех сигналов, генерируемых системами управления с обратной связью. Однако это важное свойство будет достигаться за счет «зверхпараметризации» этих систем. В тоже время, модельные эксперименты показывают их эффективность.

Ключевые слова: адаптивное управление, ограниченность, дискретное время, алгоритм оценивания, обратная связь, многомерная система, неопределенность.

Medical and Biological Cybernetics

DOI: <https://10.15407/kvt197.03.051>

UDC 577.34:616-006:519.876.5

BONDARENKO M.A., PhD (Phys and Math),
Assistant Professor, the Department of Medical
and Biological Physics and Medical Informatics
e-mail: bondaren.koma3007@gmail.com

KNIGAVKO V.G., DSc (Biology), Professor,
Head of the Department of Medical and Biological
Physics and Medical Informatics
e-mail: vkngavko@gmail.com

ZAYTSEVA O.V., DSc (Biology), Professor,
the Department of Medical and Biological
Physics and Medical Informatics
e-mail: olgvaszay@gmail.com

RUKIN A.S., PhD (Phys and Math),
Senior Lecturer of the Department of Medical
and Biological Physics and Medical Informatics
e-mail: aleksej.rukin@gmail.com
Kharkiv National Medical University
4, Nauky av., Kharkiv, 61022, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING OF DNA DAMAGES IN IRRADIATED CELLS AT DIFFERENT OXYGENATION DEGREES

Introduction. In radiotherapy, the degree of oxygenation of tumors is of vital importance. Tumors with greater oxygenation are much more responsive to radiation therapy than tumors with significant hypoxia: well-oxygenated tumors react 2.5...3 times better. Mathematical modeling of DNA damage of irradiated cells at different degrees of their oxygenation is of current interest.

The purpose of the paper is to develop a mathematical model of DNA damage in irradiated cells at different degrees of their oxygenation; to study the dependence of the number of radiation damages of DNA per unit volume of the irradiated medium on the radiation dose and the concentration of oxygen in the medium; to estimate the cell cycle duration depending on the oxygen concentration.

Results. A mathematical model of oxygen effect in cells in the case of irradiation by X-rays or gamma-radiation is proposed. On the basis of this model, the dependence of the number of radiation DNA damages in the unit volume of the irradiated medium on the radiation dose and the concentration of oxygen in the medium is obtained. Triple damage to DNA molecules is determined by primary radiation damage and attacks of two radicals of oxygen on the DNA molecule.

© BONDARENKO M.A., KNIGAVKO V.G., ZAYTSEVA O.V., RUKIN A.S., 2019

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). Cyb. and comp. eng. 2019. № 3 (197)

The effect of potentially lethal lesions (PLL) on survival of cells under irradiation conditions is studied. The phenomenon of increasing the survival of tumor cells in their irradiation under hypoxia conditions is also due to the phenomenon of potentially lethal lesions. The optimal indicator of the severity of the PLL effect is the cell cycle duration. Thus, the task of modeling PLL was reduced to creation of a mathematical model that allows estimating the value of that indicator depending on the oxygen concentration.

Conclusions. *The mathematical model created in the article allows estimating the number of radiation DNA damages in the unit volume of the irradiated medium on the radiation dose and the concentration of oxygen in the medium. The dependence of the cell cycle duration on the oxygen concentration was obtained.*

Keywords: radiobiology, mathematical modeling, oxygen effect, oxygen enhancement ratio, DNA damage.

INTRODUCTION

The problem of influence of the degree of oxygen effect severity on radiological sensitivity of tumor cells was considered in articles, where both model systems of irradiated DNA in dilute aqueous solutions [1] and irradiated dry DNA and dry nucleoprotein [2, 3] were studied. More rigorous analysis of the oxygen effect is discussed for cells grown in vitro [4, 5].

In radiotherapy, the degree of oxygenation of the tumor is vital [6]. Since the 1950s [7] it has been repeatedly demonstrated that tumors with the greater oxygenation are significantly more responsive to radiation therapy than tumors with significant hypoxia [8–11]. The presence of molecular oxygen significantly increases the effectiveness of radiation therapy in comparison with anoxia and hypoxia. It is known that well-oxidized tumors respond to radiation 2.5–3.0 times better [12], hence, the effect of treatment is potentially enhancing.

Historically, oxygen was called a "dose-changing agent": it turned out that in order to achieve a predetermined level of survival under conditions of hypoxia and under oxygenation, the dose ratio was constant irrespective of the chosen survival rate [5, 13]. This ratio of doses in hypoxic conditions and in conditions of sufficient oxygenation, which causes the same biological effect, is called the oxygen enhancement ratio (OER). For large single doses of X-ray or gamma radiation OER usually takes values from 2.5 to 3.0; for radiations with intermediate values of linear energy transfer (LET) the values of OER are from 1.5 to 2.0; for radiations with high values of LET — 1.0, that is the influence of oxygen does not manifest.

In the dependence curve of OER on the partial pressure of oxygen [14–16] (Fig. 1), the half-maximum sensitivity is demonstrated at partial pressure of oxygen $p \approx 3$ mm Hg, at the same time the maximum value of OER is usually achieved at partial pressures $p > 20$ mm Hg with a slight further increase that essentially does not change the character of this curve [6, 17]. Experiments conducted on cells, yeast and bacteria correspond to the same general curve of OER, which rapidly increases and saturates, corresponding roughly to a hyperbolic dependence on the oxygen tension [6, 13, 18].

If the relative radiosensitivity for completely anoxic tumor cell culture is taken as 1, the addition of even 0.5% ($p = 3$ mm Hg) oxygen to the system increases the radiosensitivity of the cells up to 2. The sensitivity average between the fully hypoxic and the completely normoxic state is achieved for an oxygen tension of about 3 mm Hg, corresponding to approximately 0.5% oxygen. This is more than 10 times lower than the partial pressure of oxygen in normal tissues. This value of 0.5% was called the oxygen "k-value" and was obtained from the oxygen "k-curve" of the relative radiosensitivity plotted on the graph as a function of the oxygen pressure (Fig. 1).

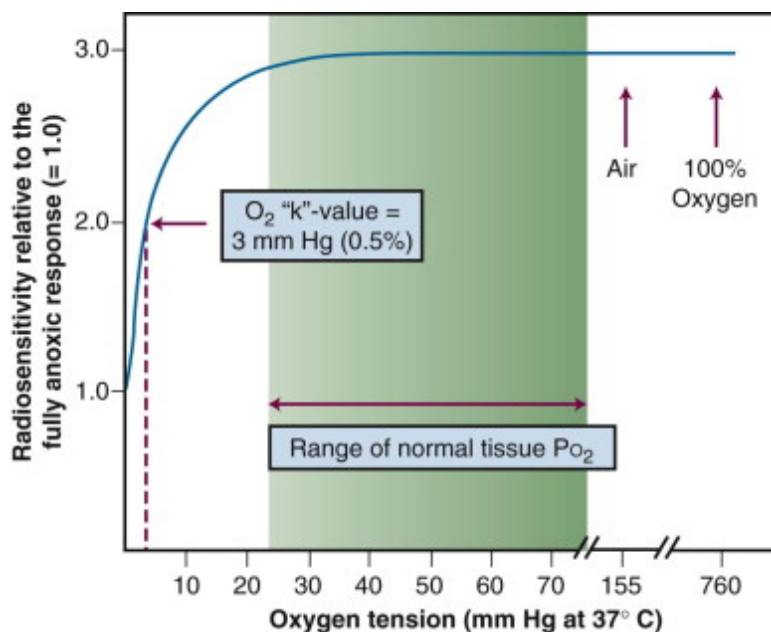


Fig. 1. Dependence of radiosensitivity of tumor cells on oxygen partial pressure (oxygen tension) (k-curve of oxygen)

When the oxygen concentration reaches approximately 2% ($p > 20$ mm Hg), the cells react in the same way as if they are completely oxygenated (i. e., the radiosensitivity is approximately 3.0). The highlighted zone in Fig. 1 represents the range of normal human tissues oxygen concentrations.

For the oxygen effect to occur, molecular oxygen must be present prior to irradiation or within the first few microseconds of irradiation [6, 19]. An increase in OEF does not occur if oxygen is added within a time that exceeds this time limit. The concentration of oxygen needed to achieve maximum sensitization is quite small, which indicates the high efficiency of oxygen as a radiosensitizer. Radiochemical basis of this phenomenon is known as the oxygen fixation hypothesis (OFH) [6, 13, 20].

OFH postulates that in the absence of oxygen the DNA can be restored to the initial (before irradiation) state by donating hydrogen from endogenous reducing agents in the cell, such as glutathione (thiol compound), which absorbs free radicals. This can be considered a type of very rapid chemical recovery. But this recovery is difficult or impossible in the presence of oxygen molecules. When a high-energy photon interacts with a biological substance, it can cause damage in several ways: directly interact with DNA, causing the event of ionization of DNA, or interact with other substances, including water, creating high-energy electrons. These ionizing electrons react with water to form highly reactive hydroxyl radicals ($R\bullet$), which in turn cause damage to the DNA basis. In general, this kind of radical damage is easily chemically restored. However, when these radicals encounter molecular oxygen, they form a peroxy radical $RO_2\bullet$. Such a damage is much more devastating, because it is difficult or impossible to restore [20, 21].

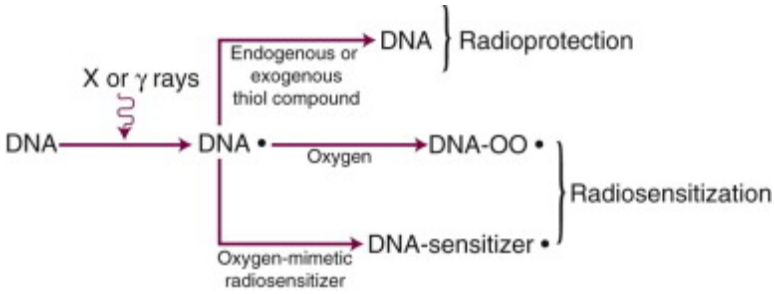


Fig. 2. Schematic representation of the proposed mechanism of oxygen influence.

Thus, the model of radical competition argues that oxygen acts as a radiosensitizer, forming peroxides in DNA that is already damaged by radiation, thereby fixing the damage. In the absence of oxygen, the DNA can be restored to the original state by hydrogen donation from endogenous reducing agents in the cell, such as glutathione. The schematic representation of the proposed mechanism is shown in Fig. 2.

MATHEMATICAL MODEL OF OXYGEN EFFECT

Taking into account the results of previous investigations of the mechanism of the oxygen effect [22–28] and classical experiments [14–16], in this work a model of DNA damage of cells during irradiation with ionizing radiation depending on the degree of oxygenation is proposed, based on a mechanistic approach to understanding this phenomenon.

Specifically, an estimation of the probability of DNA breaks formation of the irradiated cells depending on the radiation dose and on the concentration of oxygen in the irradiated medium is considered.

Let us introduce the designations. D is the radiation dose; c is the concentration of oxygen in the medium containing irradiated objects; n is the number of potential damages per unit volume of the medium caused by irradiation; N is the number of DNA breaks formed in a unit volume of medium. We assume that n is directly proportional to the value of D . More precisely, we will assume that $n = \kappa D$, where κ is a coefficient whose magnitude depends on the type and energy of radiation.

The question why a potential damage interacts with oxygen molecules and what kind of interaction occurs is quite complicated.

A potential damage is likely to be an excited portion of a macromolecule. As a result, it can participate in orientation interactions with an oxygen molecule. However, one cannot deny the possibility of involvement of potential damages in induction and dispersion interactions. All these interactions are characterized by the interaction energy proportional to the value r^{-6} , where r is the distance between the interacting objects.

Thus, the interaction of a potential damage with the oxygen molecule at a selected time point can occur only in the small spherical or almost spherical region of the irradiated medium. Let V be the volume, and R - the radius of this region, $V = \frac{4}{3}\pi R^3$.

Since potential damages are fixed on the surface of some macromolecules, their interaction with oxygen molecules can occur only due to diffusion motion and, as the result, appearance of an oxygen molecule in one of the above-mentioned regions with a radius R containing potential damages.

The interaction forces between oxygen molecules and other molecules of the medium (except potential damages) are obviously small (in any case, from the point of view of the processes under consideration) and can be neglected.

Let V_0 be the maximum volume of the environment in which an oxygen molecule can meet a potential damage and interact with it during a time period T . It is obvious that

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi(uT)^3, \quad (1)$$

where u is the diffusion motion velocity of the oxygen molecule.

Let us consider one molecule of oxygen from the volume and determine the probability p of the fact that during the time T this molecule will reach the region of interaction of the oxygen molecule and a potential damage. The volume of the region in which this interaction may occur is equal to

$$V_1 = \pi R^2 u T. \quad (2)$$

Then the probability that the specified oxygen molecule reacts with the potential damage equals

$$p = \frac{V_1}{V_0} = \frac{3R^2}{4(uT)^2}. \quad (3)$$

Let v be the number of oxygen molecules in the volume V_0 . Then

$$v = cV_0. \quad (4)$$

The probability that an arbitrarily chosen oxygen molecule will not react with potential damage equals $1 - p$. The probability that none of the molecules in the volume V_0 will react with potential damage is equal to $(1 - p)^v$. Then the probability of transformation of a potential DNA damage into a DNA break equals

$$p_p = 1 - (1 - p)^v. \quad (5)$$

Consequently, the number N of DNA breaks per unit volume of the medium irradiated with X-ray or gamma radiation, depending on the dose of radiation D and the concentration c of oxygen in the medium, is determined by the formula

$$N = n \cdot p_p = n \cdot (1 - (1 - p)^v) = \kappa D \cdot (1 - (1 - p)^{cV_0}). \quad (1)$$

It is clear that in the general case, the number of damages may vary, and this quantity of damages depends on the degree of oxygenation of the medium in which the cells are located. It is also clear that the probability of damage occurring at other equal conditions is the greater, the higher the degree of oxygenation of the environment.

As is well known, in order to take into account this factor, an indicator named oxygen enhancement factor (OEF) was introduced, which shows how many times the degree of damage to the DNA at normoxia is greater than that at hypoxia [22-24]. But at the same time, there is no explanation in the literature why the maximum OEF value for photon radiation cannot be more than 3.

There is no generally accepted answer to the question. However, it can be assumed that since oxygen in water is a biradical, the maximum possible triple damage to DNA molecules is determined by both their primary radiation damage and the attack on the DNA molecule by two radicals of the oxygen molecule.

Nowadays there is increasing evidence [4] that oxygen does not always modify the dose equally. Several studies have shown that the OEF for rarely ionizing radiation is lower at low doses than at high doses. Lower OEF values for doses per single fraction in the range commonly used in radiotherapy were obtained indirectly from clinical and experimental oncology data and directly in cell culture experiments. It was suggested that lower values of OEF are the result of the age dependence of the oxygen effect, which is almost identical to the age dependence of radiosensitivity and the duration of the cell cycle. Assuming that cells in the G1 phase of the cell cycle have a lower OEF than cells in the S phase, and since cells in the G1 phase are also more radiosensitive, it can be concluded that they will be disposed to dominate in the low dose area of the cell survival curve.

We estimated the value of such an indicator as the cell cycle duration (τ) of tumor cells during reparation of double-stranded DNA breaks, depending on their degree of oxygenation. This indicator most adequately reflects the severity of the process of potentially lethal lesions (PLL) that must be taken into account in radiotherapy [22, 23].

In this work we assume that any factor that slows the passage of irradiated cells in the stages of the cell cycle is associated with an increase in the amount of reparation of radiation DNA damage in these cells, and this increase in the amount of DNA reparation, in turn, increases the probability of cell survival [29–31]. The assumption of the universality of the discussed effect suggests that the known phenomenon of increasing the survival of tumor cells in their irradiation under hypoxia is also associated with the phenomenon of potentially lethal lesions (PLL). From the above, it follows that the optimal indicator of severity of the PLL effect is the cell cycle duration (τ). Thus, the task of PLL modeling is reduced to the construction of a mathematical model that allows us to estimate the magnitude of this indicator.

In this work, we consider only effects caused by irradiation of cells by photon (X-ray or gamma) radiation.

Initially, under the phenomenon of PLL one meant increasing the survival of irradiated cells if they were exposed to irradiation not in the nutrient medium, but in water. Probably the most convincing explanation for this effect is the assumption that lack of a nutrient in cells causes a slowdown in the passage of cells through the stages of the cell cycle, and this slowdown leads to an increase in the volume of reparation of double-stranded breaks (DB) in the DNA of irradiated cells. In turn, increasing the amount of reparation leads to increasing of irradiated cells survival.

If we accept this interpretation of the essence of the PLL phenomenon, we can assume that it has a more universal character. Namely, it can be assumed that any factors that slow down the cell cycle increase the amount of DNA

reparation and, consequently, increase the survival of cells. In favor of this hypothesis, one can cite the well-known phenomenon in radiotherapy, when the radiation resistance of tumor cells increases with increasing degree of hypoxia.

The above considerations are the basis for constructing a mathematical model of the PLL phenomenon.

First of all, let us decide what indicator will reflect the discussed effect most accurately. Taking into account our assumption that the degree of deceleration of the cell cycle determines the survival of irradiated cells, the duration τ of the cell cycle can be used as this indicator.

Regardless of the degree of hypoxia, the cell needs to consume a certain amount of oxygen for the separation. It is clear that the oxygen consumption rate of the cell depends on the concentration of oxygen in the pericellular medium.

Experimentally, the dependence of the rate of oxygen consumption by the cell on the concentration of oxygen in the medium is given in [23] (Fig. 3). Along the X axis there is the oxygen tension (pO₂), mm Hg; along the Y axis there is the rate of oxygen consumption, $\mu\ell$ of oxygen (under normal conditions) per minute, calculated for 106 cells.

From [23], as well as from the results of our earlier studies [24–26], it follows that the graph of this experimental dependence can be adequately approximated by two linear segments (if the tissue necrosis is not taken into account), one of these segments describing the normoxic area of the discussed function graph, and the other one – the hypoxic area (Fig. 4).

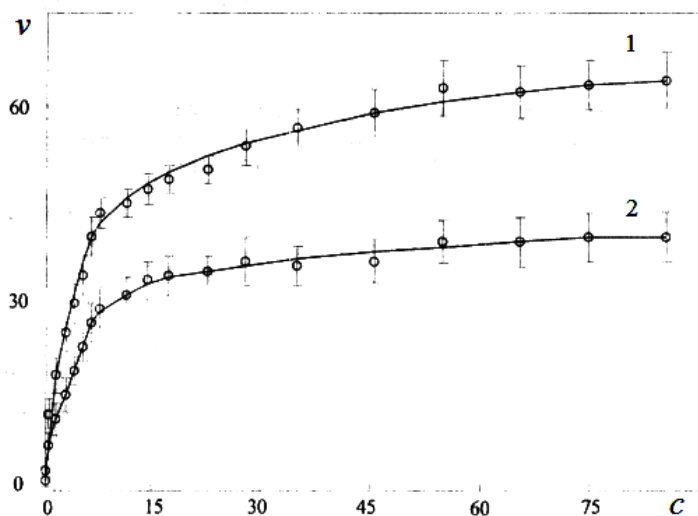


Fig. 3. Experimental dependence of the oxygen consumption rate of normoxic (1) and hypoxic (2) Chinese hamster cells on the oxygen tension in the pericellular medium.

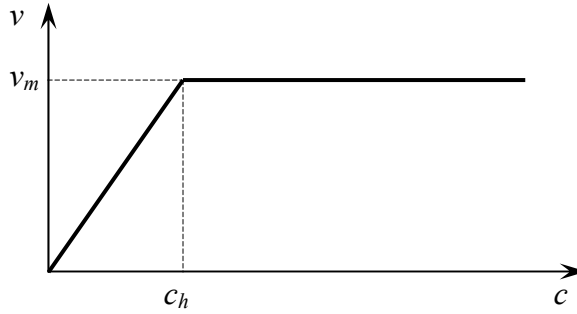


Fig. 4. Approximation of the dependence shown in Fig. 3.

The hypoxic area we are interested in is mathematically described as follows:

$$v = \frac{v_m c}{c_h}, \quad (7)$$

where v is the mass rate of oxygen consumption by the cell, v_m is the maximum value (in the case of normoxia) of the value of v , c is the oxygen concentration in the medium, c_h is the threshold value of the oxygen concentration between normoxia and hypoxia.

The complexity of further modeling is determined by the fact that the value of v consists of two functionally different components. One of them (v_l) is the rate of oxygen consumption spent for maintaining the current life of the cells. This value is constant. Another component (v_{pr}) is the rate of oxygen consumption spent on the preparation and implementation of cell division. This particular component is important for further modeling.

Obviously,

$$v_{pr} = v - v_l = \frac{v_m c}{c_h} - v_l. \quad (8)$$

Hence at $c = \frac{c_h v_l}{v_m}$ the value $v_{pr} = 0$ and we can write

$$v_{pr} = \frac{v_m (c - c_l)}{c_h}, \quad (9)$$

where c_l is the concentration of oxygen needed to maintain the cell's current activity.

Let M be the mass of oxygen needed by the cell for preparation and implementation of division. It is obvious that $M = \tau \cdot v_{pr}$.

The desired value τ can be calculated using the formula and then converted using the above approximation to the following form

$$\tau = \frac{M}{v_{pr}} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{M \cdot c_h}{c - c_{pr}}. \quad (11)$$

The obtained formula for evaluating the cell cycle duration of tumor cells as an index of severity of the PLL effect shows the dependence of τ on the concentration of oxygen in the medium, the threshold concentration value between normoxia and hypoxia, the oxygen concentration needed to maintain the current life of the cells, as well as the mass of oxygen necessary for the cell to prepare and implement its division.

CONCLUSIONS

A mathematical model of oxygen effect in cells is proposed in case of irradiation by X-ray or gamma-radiation. On the basis of this model, the dependence of the number of radiation damages of DNA in the unit volume of the irradiated medium on the radiation dose and the oxygen concentration in the medium was obtained.

In general, the number of damages can be different and depends on the degree of oxygenation of the medium in which the cells are located. The probability of damage occurring at other equal conditions is the higher, the higher the degree of oxygenation of the medium.

The well-known fact that the maximum value of the OEF for photon radiation cannot be greater than 3 is explained this way. Since oxygen in water is a biradical, the triple damage to DNA molecules is determined by primary radiation damage and attacks on the DNA molecule by two radicals of the oxygen molecule.

The effect of potentially lethal injuries on survival of cells under irradiation conditions is studied. Any factor that slows down the passage of irradiated cells through the stages of the cell cycle is associated with an increase in the amount of DNA radiation damage reparation in these cells, which in turn increases the likelihood of cell survival. The phenomenon of increasing the survival of tumor cells at their irradiation under hypoxia conditions is also due to the phenomenon of potentially lethal lesions. The above suggests that the optimal indicator of the severity of the PLL effect is the cell cycle duration. Thus, the task of modeling the PLL was reduced to construction of a mathematical model that allows estimating the value of the indicator depending on the concentration of oxygen.

REFERENCES

1. Alper E. Introduction to Liquid-Liquid Extraction with Chemical Reaction. *Proceedings of NATO ASI on "Mass transfer with chemical reaction in multiphase systems*, Turkey. 1981. Vol. 72/73, pp. 577–611.
2. Van der Schans G.P., van Loon A.A., Groenendijk R.H., Baan R.A. Detection of DNA Damage in Cells Exposed to Ionizing Radiation by Use of Anti-single-stranded DNA Monoclonal Antibody. *Int. J. of Radiat. Biology*. 1989. Vol. 55(5), pp. 747–760.
3. Lücke-Huhle C., Braun A., Hagen U. Oxygen effect in gamma-irradiated DNA. *Z. Naturforsch B*. 1970. Vol. 25(11), pp. 1264–1268.
4. M. Zeman. Biologic Basis of Radiation Oncology. *Clinical Radiation Oncology (Third Edition)*. 2012, pp. 3–42.
5. Ewing D. The oxygen fixation hypothesis: a reevaluation. *Am. J. Clin. Oncol*. 1998. Vol. 21, pp. 355–361.

6. Hall E., Giaccia A. *Radiobiology For The Radiologist*. 6th ed. Philadelphia: Lippincott William and Wilkins, 2006.
7. Gray L., Conger A., Ebert M., Hornsey S., Scott O. The concentration of oxygen dissolved in tissues at the time of irradiation as a factor in radiotherapy. *Br. J. Radiol.* 1953. Vol. 26, pp. 638–648.
8. Evans S.M., Koch C.J. Prognostic significance of tumor oxygenation in humans. *Cancer Lett.* 2003. Vol. 195, pp. 1–6.
9. Vaupel P., Mayer A. Hypoxia in cancer: significance and impact on clinical outcome. *Cancer Metastasis Rev.* 2007. Vol. 26, pp. 225–239.
10. Wilson W.R., Hay M.P. Targeting hypoxia in cancer therapy. *Nat. Rev. Cancer.* 2011. Vol. 11, pp. 393–410.
11. Knigavko V.G., Bondarenko M.A., Zaytseva O.V. The Generalized Mutation Theory of Oncogenesis. *Journal of Clinical and Diagnostic Research.* 2018. Vol. 12(11), pp. XE01–XE04.
12. Bentzen S., Gregoire V. Molecular–imaging–based dose painting – a novel paradigm for radiation therapy prescription. *Semin. Radiat. Oncol.* 2011. Vol. 21, pp. 101–110.
13. Howard-Flanders P., Alper T. The sensitivity of microorganisms to irradiation under controlled gas conditions. *Radiat. Res.* 1957. Vol. 7, pp. 518–540.
14. Koch C.J., Stobbe C.C., Bump E.A. The effect on the Km for radiosensitization at 0 °C of thiol depletion by diethylmaleate pretreatment: quantitative differences found using the radiation sensitizing agent misonidazole or oxygen. *Radiat. Res.* 1984. Vol. 98, pp. 141–153.
15. Whillans A.D.W., Hunt J.W., Whillans D.W. A Rapid–mixing comparison of the mechanisms of radiosensitization by oxygen and misonidazole in CHO cells. *Radiat. Res.* 1982. Vol. 90, pp. 126–141.
16. Ling C. C., Michaels H. B., Gerweck L. E., Epp E. R., Peterson E. C. Oxygen sensitization of mammalian cells under different irradiation conditions. *Radiat. Res.* 1981. Vol. 86, pp. 325–340.
17. Wouters B.G., Brown J.M. Cells at intermediate oxygen levels can be more important than the ‘hypoxic fraction’ in determining tumor response to fractionated radiotherapy. *Radiat. Res.* 1997. Vol. 147, pp. 541–550.
18. Chapman J.D., Dugle D.L., Reuvers A.P., Meeker B.E., Borsa J. Letter: studies on the radiosensitizing effect of oxygen in Chinese hamster cells. *Int. J. Radiat. Biol. Relat. Stud. Phys. Chem. Med.* 1974. Vol. 26, pp. 383–389.
19. Howard-Flanders P., Moore D. The time interval after pulsed irradiation within which injury to bacteria can be modified by dissolved oxygen: I. A search for an effect of oxygen 0.02 s after pulsed irradiation. *Radiat. Res.* 1958. Vol. 9, pp. 422–437.
20. Bertout J., Patel S., Simon M. The impact of O₂ availability on human cancer. *Nat. Rev. Cancer.* 2008. Vol. 8, pp. 967–975.
21. Michael B.D., O’Neill P.A. Sting in the tail of electron tracks. *Science.* 2000. Vol. 287, pp. 1603–1604.
22. Yarmonenko S.P., Vainson A.A., Magdon E. Oxygen effect and radiation therapy of tumors. Moscow: Medicine, 1980. (in Russian).
23. Voloshina E.A., Mescherikova V.V. Oxygen effect and adaptation reactions of cells. *Radiobiology.* 1979. Vol. 19, no. 2, pp. 283–285 (in Russian).
24. Knigavko V.G., Bondarenko M.A., Buts V.G. Diffusion of oxygen in a malignant tumor during the early stage of its development (spheroid stage). *Biophysical Bulletin.* 2000. Vol. 2(7), pp. 55–59 (in Russian).
25. Bondarenko M.A., Knigavko V.G., Gordienko V.G., Protsenko E.V., Knigavko A.V. Modeling of oxygen diffusion and consumption processes in malignant tumor strands. *Biophysical Bulletin.* 2001. Vol. 1(8), pp. 81–85 (in Russian).
26. Knigavko V.G., Bondarenko M.A., Ponomarenko N.S., Radzishavska E.B. Mathematical simulation of oxygen diffusion and consumption in a flat malignant tumor. *Ukrainian Journal of Radiology.* 2008. Vol. 16, no. 1, pp. 61–65 (in Ukrainian).
27. Knigavko V.G., Bondarenko M.A. Mathematical modeling of oxygen diffusion and consumption in a malignant tumor. *Biophysics.* 2005. V. 30, no. 3, pp. 544–549 (in Russian).

28. Bondarenko M., Knigavko V., Zaytseva O. Approach to evaluate the risk of cancer for different number of tumor suppressor genes in the individual. *East European Journal of Physics*. 2018. Vol. 5, no. 2, pp. 23–26.
29. Grimes D.R., Kelly C., Bloch K., Partridge M.A method for estimating the oxygen consumption rate in multicellular tumour spheroids. *J. R. Soc. Interface*. 2014. V. 11.
30. Tannock I. Oxygen diffusion and the distribution of cellular radiosensitivity in tumours. *Br. J. Radiol*. 1972. Vol. 45, pp. 515–524.
31. Grimes D. R., Fletcher A. G., Partridge M. Oxygen consumption dynamics in steady-state tumour models. *R. Soc. Open Sci*. 2014. Vol. 1.

Received 29.03.2019

JIITEPATYPA

1. Alper E. Introduction to Liquid–Liquid Extraction with Chemical Reaction. *Proceedings of NATO ASI on “Mass transfer with chemical reaction in multiphase systems”*, Turkey. 1981. Vol. 72/73. P. 577–611.
2. Van der Schans G.P., van Loon A.A., Groenendijk R.H., Baan R.A. Detection of DNA Damage in Cells Exposed to Ionizing Radiation by Use of Anti–single–stranded DNA Monoclonal Antibody. *Int. J. of Radiat. Biology*. 1989. Vol. 55(5). P. 747–760.
3. Lücke-Huhle C., Braun A., Hagen U. Oxygen effect in gamma–irradiated DNA *Z. Naturforsch B*. 1970. Vol. 25(11). P. 1264–1268.
4. M. Zeman. Biologic Basis of Radiation Oncology. *Clinical Radiation Oncology (Third Edition)*. 2012. P. 3–42.
5. Ewing D. The oxygen fixation hypothesis: a reevaluation. *Am. J. Clin. Oncol*. 1998. Vol. 21. P. 355–361.
6. Hall E., Giaccia A. Radiobiology For The Radiologist. 6th ed. Philadelphia : Lippincott William and Wilkins, 2006. 546 p.
7. Gray L., Conger A., Ebert M., Hornsey S., Scott O. The concentration of oxygen dissolved in tissues at the time of irradiation as a factor in radiotherapy. *Br. J. Radiol*. 1953. Vol. 26. P. 638–648.
8. Evans S.M., Koch C.J. Prognostic significance of tumor oxygenation in humans. *Cancer Lett*. 2003. Vol. 195. P. 1–6.
9. Vaupel P, Mayer A. Hypoxia in cancer: significance and impact on clinical outcome. *Cancer Metastasis Rev*. 2007. Vol. 26. P. 225–239.
10. Wilson W.R., Hay M.P. Targeting hypoxia in cancer therapy. *Nat. Rev. Cancer*. 2011. Vol. 11. P. 393–410.
11. Knigavko V. G., Bondarenko M. A., Zaytseva O. V. The Generalized Mutation Theory of Oncogenesis. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*. 2018. Vol. 12(11). P. XE01–XE04.
12. Bentzen S., Gregoire V. Molecular–imaging–based dose painting – a novel paradigm for radiation therapy prescription. *Semin. Radiat. Oncol*. 2011. Vol. 21. P. 101–110.
13. Howard-Flanders P, Alper T. The sensitivity of microorganisms to irradiation under controlled gas conditions. *Radiat. Res*. 1957. Vol. 7. P. 518–540.
14. Koch C.J., Stobbe C.C., Bump E.A. The effect on the Km for radiosensitization at 0 °C of thiol depletion by diethylmaleate pretreatment: quantitative differences found using the radiation sensitizing agent misonidazole or oxygen. *Radiat. Res*. 1984. Vol. 98. P. 141–153.
15. Whillans A.D.W., Hunt J.W., Whillans D.W. A Rapid–mixing comparison of the mechanisms of radiosensitization by oxygen and misonidazole in CHO cells. *Radiat. Res*. 1982. Vol. 90. P. 126–141.
16. Ling C.C., Michaels H.B., Gerweck L.E., Epp E. R., Peterson E.C. Oxygen sensitization of mammalian cells under different irradiation conditions. *Radiat. Res*. 1981. Vol. 86. P. 325–340.
17. Wouters B.G., Brown J.M. Cells at intermediate oxygen levels can be more important than the ‘hypoxic fraction’ in determining tumor response to fractionated radiotherapy. *Radiat. Res*. 1997. Vol. 147. P. 541–550.

18. Chapman J.D., Dugle D.L., Reuvers A.P., Meeker B.E., Borsa J. Letter: studies on the radiosensitizing effect of oxygen in Chinese hamster cells. *Int. J. Radiat. Biol. Relat. Stud. Phys. Chem. Med.* 1974. Vol. 26. P. 383–389.
19. Howard-Flanders P., Moore D. The time interval after pulsed irradiation within which injury to bacteria can be modified by dissolved oxygen: I. A search for an effect of oxygen 0.02 s after pulsed irradiation. *Radiat. Res.* 1958. Vol. 9. P. 422–437.
20. Bertout J., Patel S., Simon M. The impact of O₂ availability on human cancer. *Nat. Rev. Cancer.* 2008. Vol. 8. P. 967–975.
21. Michael B.D., O'Neill P.A. Sting in the tail of electron tracks. *Science.* 2000. Vol. 287. P. 1603–1604.
22. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А., Магдон Э. Кислородный эффект и лучевая терапия опухолей. М. : Медицина, 1980. 247 с.
23. Волошина Е.А., Мещерикова В.В. Кислородный эффект и адаптационные реакции клеток. *Радиобиология.* 1979. Т. 19. Вып. 2. С. 283–285.
24. Книгавко В.Г., Бондаренко М.А., Буц В.Г. Диффузия кислорода в злокачественной опухоли на раннем этапе ее развития (этапе сфероиды). *Біофізичний вісник.* 2000. Вип. 2(7). С. 55–59.
25. Бондаренко М.А., Книгавко В.Г., Гордиенко В.Г., Проценко Е.В., Книгавко А.В. Моделирование процессов диффузии и потребления кислорода в тяжках злокачественных опухолей. *Біофізичний вісник.* 2001. Вип. 1 (8). С. 81–85.
26. Книгавко В.Г., Бондаренко М.А., Пономаренко Н.С., Радзішевська Є.Б. Математичне моделювання процесів дифузії та споживання кисню у злоякісній пухлині плоскої форми. *Укр. радіол. журн.* 2008. Т. 16, № 1. С. 61–65.
27. Книгавко В.Г., Бондаренко М.А. Математическое моделирование диффузии и потребления кислорода в злокачественной опухоли. *Биофизика.* 2005. Т. 50, вып. 3. С. 544–549.
28. Bondarenko M., Knigavko V., Zaytseva O. Approach to evaluate the risk of cancer for different number of tumor suppressor genes in the individual. *East European Journal of Physics.* 2018. Vol. 5, No. 2. P. 23–26.
29. Grimes D.R., Kelly C., Bloch K., Partridge M. A method for estimating the oxygen consumption rate in multicellular tumour spheroids. *J. R. Soc. Interface.* 2014. V. 11. Article ID: 20131124.
30. Tannock I. Oxygen diffusion and the distribution of cellular radiosensitivity in tumours. *Br. J. Radiol.* 1972. Vol. 45. P. 515–524.
31. Grimes D.R., Fletcher A.G., Partridge M. Oxygen consumption dynamics in steady-state tumour models. *R. Soc. Open Sci.* 2014. Vol. 1. Article ID: 140080.

Отримано 29.03.2019

Бондаренко М.А., канд. фіз.-мат. наук,
доцент кафедри медичної та біологічної фізики
і медичної інформатики
e-mail: bondaren.koma3007@gmail.com

Кнігавко В.Г., д-р. біол. наук, професор,
зав. кафедри медичної та біологічної фізики
і медичної інформатики
e-mail: vknigavko@gmail.com

Зайцева О.В., д-р біол. наук,
професор кафедри медичної та біологічної фізики
і медичної інформатики
e-mail: olgvaszay@gmail.com

Рукін О.С., канд. фіз.-мат. наук,
старш. викладач кафедри медичної та біологічної
фізики і медичної інформатики
e-mail: aleksej.rukin@gmail.com
Харківський національний медичний університет
пр. Науки 4, м. Харків, 61022, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ДНК ОПРОМІНЕНИХ КЛІТИН ЗА РІЗНОГО СТУПЕНЯ ЇХНЬОЇ ОКСИГЕНАЦІЇ

Вступ. У радіотерапії ступінь оксигенації пухлин має життєво важливе значення. Пухлини з більшою оксигенацією набагато сильніше реагують на променеву терапію, ніж пухлини зі значною гіпоксією: добре оксигеновані пухлини реагують в 2,5-3 рази краще. Математичне моделювання пошкодження ДНК опромінених клітин за різного ступеня їхньої оксигенації має значний інтерес.

Метою статті є розроблення математичної моделі пошкодження ДНК в опромінених клітинах за різного ступеня їх оксигенації; вивчення залежності кількості радіаційних ушкоджень ДНК на одиницю об'єму опроміненого середовища від дози опромінення та концентрації кисню в середовищі; оцінювання тривалості клітинного циклу залежно від концентрації кисню.

Результати Запропоновано математичну модель дії кисню в клітинах у разі опромінення рентгенівськими променями або гамма-випромінюванням. На основі цієї моделі отримують залежність кількості пошкоджень радіаційної ДНК в одиничному об'ємі опроміненого середовища від дози опромінення та концентрації кисню в середовищі. Потрійне пошкодження молекул ДНК визначається первинним радіаційним ураженням та атаками двох радикалів кисню на молекулу ДНК.

Вивчено вплив потенційно летальних уражень (ПЛУ) на виживання клітин в умовах опромінення. Феномен підвищення виживання пухлинних клітин у разі їх опромінення в умовах гіпоксії також зумовлено явищем потенційно летальних уражень. Оптимальним показником тяжкості ефекту ПЛУ є тривалість клітинного циклу. Отже, завдання моделювання ПЛУ зводилося до створення математичної моделі, яка дає можливість оцінити значення цього показника залежно від концентрації кисню.

Висновки. Запропоновано математичну модель кисневого ефекту в клітинах у разі опромінення їх рентгенівським або гамма-випромінюванням. На основі цієї моделі було отримано залежність числа радіаційних пошкоджень ДНК в одиниці об'єму опроміненого середовища від дози випромінювання та концентрації кисню в середовищі. Пояснено факт, що максимальне значення коефіцієнта кисневого підсилення для фотонних випромінювань не може бути більше трьох. Вивчено вплив потенційно летальних пошкоджень на виживаність клітин в умовах опромінення. Оптимальним показником вираженості ефекту потенційно летальних пошкоджень є тривалість клітинного циклу. Побудовано математичну модель, що дає змогу оцінити величину цього показника залежно від концентрації кисню.

Ключові слова: радіобіологія, математичне моделювання, кисневий ефект, коефіцієнт кисневого підсилення, пошкодження ДНК.

Бондаренко М.А., канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры медицинской и биологической
физики и медицинской информатики
e-mail: bondaren.koma3007@gmail.com

Книгавко В.Г., д-р биол. наук, профессор,
зав. кафедры медицинской и биологической
физики и медицинской информатики
e-mail: vknigavko@gmail.com

Зайцева О.В., д-р биол. наук, профессор кафедры
медицинской и биологической физики и
медицинской информатики
e-mail: olgvaszay@gmail.com

Рукин А.С., канд. физ.-мат. наук,
старш. преподаватель кафедры медицинской
и биологической физики и медицинской информатики
e-mail: aleksej.rukin@gmail.com
Харьковский национальный медицинский университет
пр. Науки 4, г. Харьков, 61022, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДНК ОБЛУЧЕННЫХ КЛЕТОК ПРИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ИХ ОКСИГЕНАЦИИ

Предложена математическая модель кислородного эффекта в клетках при облучении их рентгеновским или гамма-излучением. На основе этой модели получена зависимость числа радиационных повреждений ДНК в единице объема облученной среды от дозы излучения и концентрации кислорода в среде. Объяснен факт, что максимальное значение коэффициента кислородного усиления для фотонных излучений не может быть больше 3. Изучено влияние потенциально летальных повреждений на выживаемость клеток в условиях облучения. Оптимальным показателем выраженности эффекта потенциально летальных повреждений является продолжительность клеточного цикла. Построена математическая модель, которая позволяет оценить величину этого показателя в зависимости от концентрации кислорода.

Ключевые слова: радиобиология, математическое моделирование, кислородный эффект, коэффициент кислородного усиления, повреждение ДНК.

DOI: <https://10.15407/kvt197.03.065>

UDC 519.8.812.007

N.I. ARALOVA, PhD (Engineering), Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Controlled Processes Optimization
email: aralova@ukr.net

A.A. ARALOVA, PhD (Phys and Math.),
Researcher of the Department of Methods for Discrete Optimization,
Mathematical Modelling and Analyses of Complex Systems
email: aaaralova@gmail.com
Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine,
40, Acad. Glushkov av., 03187, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODELS OF CONFLICT CONTROLLED PROCESSES UNDER FUNCTIONAL SELF-ORGANIZATION OF THE RESPIRATORY SYSTEM

Introduction. Modern human life imposes more stringent requirements for ability to adapt to increasingly complex conditions, such as unfavorable environmental conditions, potential danger, increased responsibility, extreme physical exertion and their combined effect. This leads to a decrease in exercise tolerance, unfavorable changes in hemodynamic parameters, and disorders in the functional activity of other body organs and tissues. The decisive role in the adaptation of the organism to physical and psycho-emotional stress belongs to the oxygen transport system. However, at present, the possibilities of instrumental methods are rather limited, moreover, they can only characterize the state of the body at the current moment, and not predict its reserve capabilities in case of disturbances in the internal and external environment, in the process of recovery and rehabilitation.

Partially, this gap can be filled by mathematical models of the functional respiratory system, which allow to imitate disturbances of the internal and external environment of an organism in the dynamics of the respiratory cycle and, thus, predict possible controlling actions of the organs of self-regulation of the organism when adapting to these disturbances.

The purpose of the paper is to build a mathematical model of a functional respiration system that simulates resolving a conflict situation between executive and managing bodies of self-regulation in the conflict for oxygen, which allows predicting the parameters of self-organization of the respiratory system under internal and external disturbances.

Results. A mathematical model of mass transfer and mass transfer of respiratory gases in the human body is presented in the form of a system of non-linear differential equations, which is a controlled dynamic system, the state of which is determined at each time point by oxygen and carbon dioxide stresses in each structural link of the respiratory system (alveoli, blood and tissues). The control (self-regulation) of the condition under permanent or at a given time interval of the current disturbance (high functional activity of certain groups of tissues) is carried

out by the self-regulation organs — respiratory muscles that form the necessary level of ventilation to compensate for the resulting hypoxic states, cardiac muscle providing the minute blood volume, and smooth muscles, vessels, vasodilation and vasoconstriction which contributes to the distribution of systemic blood flow through the organs and tissues. There are also passive mechanisms of self-regulation: the concentration of hemoglobin in the blood, myoglobin in skeletal and cardiac muscles, their ability to oxygenate, the concentration of buffer bases in the blood etc. It is assumed that the decision on the choice of the values of compensating influences is made by the decision center based on the information activity and degree of oxygen deficiency, excessive accumulation of carbon dioxide in all tissue regions of the body, is transmitted to the executive bodies of self-regulation, increases their functional activity, which ensures the implementation of the main function of respiration.

Conclusion. The per-set mathematical model of the FRS allows the researcher to analyze the oxygen and carbon dioxide regimes of body in dynamics at various levels of functional load and under various environmental conditions; to form such regimes of the external respiration system, which contribute to an increase in the oxygen supply in the body and thereby increase the resource of the cardiac muscle during the regulation of hypoxic states that occur when the combined effects of hypobaric hypoxia and hypermetabolic hypoxia; predict the state of the body during various physical efforts and evaluate the effectiveness of the preparation process; plan and distribute heavy loads, taking into account the functionality of the individual and depending on the prevailing situations. The work presents the results of numerical experiments with a model for simulating internal (physical activity) and external (hypoxic hypoxia) disturbances on the human body.

Keywords: conflict-controlled processes, a functional system of respiration, functional self-organization of the respiratory system, adaptation to stress.

INTRODUCTION

It is known that the human body adapts to the changing conditions of vital activity, no matter how extreme they are. All human activity is carried out under certain environmental conditions and in certain neuromuscular stress, characterized by human exposure to a number of factors that alter the physiological and functional parameters.

Body functions can be performed only when the environment meets its needs, can normally be carried out only under the condition that the environment meets their needs. If environmental conditions become unfavorable and complicate human activity, it leads to reduced exercise tolerance, adverse changes in hemodynamic, functional disorders of the activities of other organs and tissues. Combined with such factors as increased responsibility, the potential danger of surprise, novelty, increased intellectual complexity, these conditions due to the large load on the psyche can cause excessive stress adaptation systems of the organism, various reactions and adverse psychological state.

It is known that a decisive role in the body's adaptation to physical and emotional load belongs to oxygen transport system [1]. Comprehensive study of oxygen supply systems of human body in the process of adaptation to the new conditions of life and new activities reveals the leading units in the cascade of compensatory reactions and evaluate the functional reserves of the organism.

Currently, however, the possibility of only instrumental methods are rather limited, besides, they can only characterize the condition of the body only in the moment, not possible to predict its reserve under perturbations of internal and external environment, in the process of recovery and rehabilitation.

Partially fill this gap may mathematical model of the respiratory system [2,3,4] allowing to simulate the dynamics of the respiratory cycle perturbation internal and external environment, and thus possible to predict the reaction of the organism to these disturbances.

All of the functional systems of the body somehow react in response to the disturbing internal or external influences, trying to stabilize. Naturally, they interact with one another, despite the contradictions between the goals and interests. Development of the theory of dynamic games, optimal control theory and numerical optimization methods have created the preconditions for the creation of mathematical, algorithmic and software for simulation of various disturbances. Mathematical models of functional systems and simulation complement system experimental and clinical data obtained by the tool.

MATHEMATICAL MODEL

Presented model describes the transport and mass exchange of respiratory gases in various respiratory system links — airway, alveolar spaces of the lungs, the blood of lung and tissue capillaries, arterial and mixed venous blood, tissue vessels and organs (brain, heart, respiratory and skeletal muscle, and other tissues and organs) and compensating feedback mechanisms of self (the quantity of ventilation, cardiac output and systemic organ (tissue), blood flow, stabilizing the functional state of the organism and given the level of its functional activity.

As the phase variables by which the estimated state functional breathing and circulation system selected oxygen partial pressure of respiratory gases, carbon dioxide and nitrogen in the respiratory tract ($p_{RW}O_2$, $p_{RW}CO_2$, $p_{RW}N_2$) and alveolar spaces (p_AO_2 , p_ACO_2 , p_AN_2) and the voltage in the arterial (p_aO_2 , p_aCO_2 , p_aN_2), mixed venous ($p_{\bar{v}}O_2$, $p_{\bar{v}}CO_2$, $p_{\bar{v}}N_2$), blood pulmonary capillaries ($p_{lc}O_2$, $p_{lc}CO_2$, $p_{lc}N_2$), tissue blood capillaries ($p_{ct_i}O_2$, $p_{ct_i}CO_2$, $p_{ct_i}N_2$) and tissue fluids ($p_{t_i}O_2$, $p_{t_i}CO_2$, $p_{t_i}N_2$).

Depending on mathematical modeling purposes, for evaluating the functional status of the system the apparatus of the differential equations with lumped or distributed parameters is used. In this case the mathematical model functional respiratory system is used to study the mechanisms of self-regulation and adaptation to internal and external disturbances, the dynamic partial pressures and respiratory gases stresses in the organism described by a system of ordinary differential equations. They are based on the principles of mass balance and flow continuity.

The parametric form can be written as follows:

$$\begin{aligned} \frac{dp_iO_2}{d\tau} &= \varphi(p_iO_2, p_iCO_2, \eta_i, \dot{V}, Q, Q_{t_i}, G_{t_i}O_2, q_{t_i}O_2) \\ \frac{dp_iCO_2}{d\tau} &= \varphi(p_iO_2, p_iCO_2, \eta_i, \dot{V}, Q, Q_{t_i}, G_{t_i}CO_2, q_{t_i}CO_2), \end{aligned} \quad (1)$$

where the functions φ and ϕ described in detail in [3,4], \dot{V} — ventilation, η — the degree of oxygen saturation of hemoglobin, Q — the space velocity of the system and Q_{t_i} — local blood flow, $q_{t_i} O_2$ — rate of oxygen consumption i — the tissue reservoir $q_{t_i} CO_2$ — the rate of release of carbon dioxide in i - st fabric reservoir. Velocity $G_{t_i} O_2$ oxygen from the blood stream into the tissue and $G_{t_i} CO_2$ carbon dioxide from the tissue into the blood is determined by the relation:

$$G_{t_i} = D_{t_i} S_{t_i} (p_{ct_i} - p_{t_i}), \quad (2)$$

where D_{t_i} — gas permeability coefficients throe the air-blood barrier, S_{t_i} — surface area of gas transfer.

The purpose of the control [5] is output perturbed system in a stationary mode in which the relations

$$|G_{t_i} O_2 - q_{t_i} O_2| \leq \varepsilon_1, |G_{t_i} CO_2 + q_{t_i} CO_2| \leq \varepsilon_2, \quad (3)$$

where $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ predefined sufficiently small positive number. Thus on the control parameters are imposed restrictions

$$0 \leq \dot{V} \leq \dot{V}_{\max}, 0 \leq Q \leq Q_{\max}, 0 \leq Q_{t_i} \leq Q, \sum_{i=1}^m Q_{t_i} = Q, \quad (4)$$

where m — the number of vessels in the body tissue.

In addition, to resolve a conflict between the executive regulation (respiratory muscles, cardiac muscles and smooth muscles of blood vessels), which are at the same time oxygen consumers and other tissues and organs [5] introduced ratios

$$q_{resp.m.} O_2 = f(V), q_{card.m.} O_2 = \phi(Q), q_{sm.m.} O_2 = \varphi(Q). \quad (5)$$

As a criterion for considering the functional regulation

$$I = \min_{\substack{0 \leq \dot{V} \leq \dot{V}_{\max} \\ 0 \leq Q_{t_i} \leq Q_{\max} \\ \tau_0}} \int_{\tau_0}^T [\rho_1 \sum_{t_i} \lambda_{t_i} (G_{t_i} O_2 - q_{t_i} O_2)^2 + \rho_2 \sum_{t_i} \lambda_{t_i} (G_{t_i} CO_2 + q_{t_i} CO_2)^2] d\tau, \quad (6)$$

$$i = \overline{1, m}$$

where τ_0 — the beginning of the impact of disturbance on the system, T — the duration of the exposure, ρ_1 and ρ_2 — coefficients characterizing the particular sensitivity to hypoxia and hypercapnia, λ_{t_i} — the coefficients reflecting the morphological features of a particular tissue reservoir i .

This control minimizes the total cost of the oxygen in the body and in every region of the tissue, as well as the accumulation of carbon dioxide.

Essentially, the model FSD is a controlled dynamic system whose state is determined at each time point voltages oxygen and carbon dioxide in each structural unit of the respiratory system (alveoli, blood and tissue). Control (autoregulation) state at constant or at a predetermined time interval of the current perturbation (high

functional activity of the individual groups of tissues) is carried out by executive bodies selfregulation — respiratory muscles, forming the desired ventilation level to compensate for emerging hypoxic states, cardiac muscle, providing minute volume of blood and smooth muscles vascular tissue, vasodilatation and vasostriction which facilitates flow distribution system for body and tissues.

In addition to these active mechanisms of self-regulation in the model there are passive mechanisms: concentration of hemoglobin in the blood, myoglobin in skeletal and cardiac muscles, their ability to oxygenation, concentration of the buffer bases in the blood, etc. It is expected that the decision on the choice of the quantities of compensating actions taken center of decision-making on based on information about the level of functional activity and the degree of oxygen deficiency, excess accumulation of carbon dioxide in all parts of the tissue of the organism, is transferred to executive bodies of self-control, increasing their functional activity, which ensures the implementation of the basic functions of breathing.

MATHEMATICAL MODEL OF THE SHORT-TERM ADAPTATION

Short-term adaptation is almost instantaneous formation of functional systems of response to changing conditions or type of activity. Typically, the change of activity, the conditions under which flows human activity associated with a change in the level of metabolism, the metabolic processes in the tissues, the saturation level gases (oxygen, carbon dioxide, nitrogen and other trace gases) of blood and tissue fluid. Therefore a mathematical model of functional respiratory system sequentially describing the dynamics of oxygen stress, nitrogen, carbon dioxide in the body structures — the airway, the alveolar space, pulmonary capillary blood, arterial blood, blood tissue capillaries, tissue fluid and mixed venous blood to the respiratory cycle — becomes an effective tool for studying the state of the organism to various conditions of its activities. Especially it makes it possible to assess the development of hypoxia, acidosis in various structures of the body — blood, organs and tissues, which is not always possible to determine by experimentation in the laboratory or clinic.

As noted above, a functional respiratory system is seen as a controlled dynamic system. Each of nonlinear differential equations in the system, describes the changes in oxygen tension, carbon dioxide or nitrogen in these links the structure of the respiratory system in the respiratory cycle. All equations combined in describe mass transport and mass transfer of respiratory gases are controlled by the dynamic part of the respiratory system. The change in the respiratory gas in the respiratory system voltages structures significantly affect the magnitude of alveolar ventilation V (and its defining — the value of the respiratory lung volume, duration of inhalation, pause and exhalation), the volume flow rate of the system Q and the volumetric flow rate in the capillary beds of organs and tissues $Q_{e_{ui}}$, $i = \overline{1, m}$. Therefore V Q $Q_{e_{ui}}$ can be regarded as control parameters of the model. It is known that V formed as a result of the work of the respiratory muscles, Q determined by the work of the heart muscle, and Q_{ti} , $i = \overline{1, m}$ is the work of the smooth muscle tissue vessels. Therefore, it is reasonable to assume that the management of the operation of the respiratory

system includes mechanisms for decision-making, forming structures of the brain, the executive bodies of the regulation — the respiratory muscles, heart and vascular smooth muscle tissue.

Perturbation acting on the respiratory system function can be subdivided into external — changing the composition of the breathing gas, the ambient pressure and the internal — changes in the intensity of metabolic processes in the tissues and organs, which are indicators of oxygen utilization rate ($q_{t_i} O_2$) and carbon dioxide gas ($q_{t_i} CO_2$). Regulation problem (self-, shortadaptation) of the respiratory system function is to derive the mass transfer of gases perturbed dynamical system in a new steady state which is stable to the conditions prevailing living organism.

Thus, the mathematical model of the short-term adaptation of functional respiratory system is a dynamic system management task. You must specify:

- the initial state of the system, characterized by phase variables: $p_A O_2, p_A CO_2, p_{lc} O_2, p_{lc} CO_2, p_a O_2, p_a CO_2, p_{ct_i} O_2, p_{ct_i} CO_2, p_{t_i} O_2, p_{t_i} CO_2, p_{\bar{v}} O_2, p_{\bar{v}} CO_2$, in the moment τ_0 , the start of exposure of disturbing factors on the system, the external and / or internal;
- the range of the control parameters:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{\min} &\leq \dot{V} \leq \dot{V}_{\max} \\ Q_{\min} &\leq Q \leq Q_{\max} \\ Q_{Cl_{\min}} &\leq Q_{Cl} \leq Q_{Cl_{\max}}, j = \overline{1, m} \\ \sum_{j=1}^m Q_{Cl} &= Q \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

- terminal region, a region of stable conditions for new living conditions, defined by the relation:

$$\begin{aligned} |G_{t_i} O_2 - q_{t_i} O_2| &\leq \varepsilon_{t_i} O_2, i = \overline{1, m} \\ |G_{t_i} CO_2 + q_{t_i} CO_2| &\leq \varepsilon_{t_i} CO_2, i = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (8)$$

where $\varepsilon_{1ti}, \varepsilon_{2ti}$ — sufficiently small positive value.

Fulfillment of the conditions (8) ensures the stabilization of the oxygen pressure and carbon dioxide in the blood and tissues of the washer, which leads to the establishment of a new steady state.

Easy to see [6], so that the problem formulated short adaptation unit has a plurality of solutions. Any set $V, Q, Q_{t_i} i = \overline{1, m}$, (7), sooner or later leads to a state of a dynamic system, characterized by the condition (8), but the level of hypoxia and the degree of accumulation of carbon dioxide in the tissue will be more or less pronounced. We assume that the optimal set of control parameters $V, Q, Q_{t_i} i = \overline{1, m}, \sum_i Q_{t_i} = Q$ is a set of (7), which provides motion on the

trajectories of the perturbed dynamical system minimizes the function:

$$I = \int_{\tau_0}^T (\rho_1 (\sum_{t_i} \lambda_{t_i} (G_{t_i} O_2 - q_{t_i} O_2))^2 + (\rho_2 \sum_{t_i} \lambda_{t_i} (G_{t_i} CO_2 + q_{t_i} CO_2))^2) d\tau, \quad (9)$$

where ρ_1 and ρ_2 sensitivity coefficients to hypoxia and hypercapnia, respectively, and λ_{t_i} factors which characterize the functional — morphological features of each organ or tissue in the region. In this model it is assumed that

$$\lambda_{t_i} = \phi\left(\frac{V_{ct_i}}{V_t}\right), \quad (10)$$

which means that the recorded blood fullness unit volume of the tissue container. Thus modeled prevailing in the evolutionary process a vital importance of organ and tissue.

Upper limit T in functional (9) is usually given a sufficiently small time (hundredths of seconds), since the short-term adaptation takes place almost instantaneously. If the condition (8) will occur in the $\tau < T$, the value

$$I_1 = \int_{\tau_0}^T (\rho_1 (\sum_{t_i} \lambda_{t_i} (G_{t_i} O_2 - q_{t_i} O_2))^2 + (\rho_2 \sum_{t_i} \lambda_{t_i} (G_{t_i} CO_2 + q_{t_i} CO_2))^2) d\tau \quad (11)$$

is almost equal to 0 and has little effect on the final value I .

It should be noted that the sensitivity coefficients ρ_1 and ρ_2 (9) are individual. For their establishment for a particular organism it is necessary to determine experimentally in a state of rest qO_2 and qCO_2 the whole organism, V and Q , measure $p_a O_2$ and $p_a CO_2$. Then the model with the parameter values established solves the problem of identification of functional (6) by changing the procedure ρ_1 and ρ_2 to obtain values $p^{mod}_a O_2$, $p^{mod}_a CO_2$ set equal to the experimentally $p_a O_2$ and $p_a CO_2$ respectively.

Computational experiments conducted with short-term adaptation of the mathematical model allow us to establish the specificity of the regulatory body's reactions to specific types of disturbances. Table 1 shows the data of oxygen and carbon dioxide stress calculations, the values of the flow rates of blood flow in the tissues during exercise and hypoxic hypoxia.

Analysis of the results of computational experiments with short-term adaptation model shows that under various conditions of vital activity required some kind of reaction of the circulatory system. Thus, in the simulation exercise volumetric blood flow velocity rises more than five times, increasing the value of volumetric blood flow in vital organs, although as a percentage of relations are not changed, except for the working skeletal muscles. Almost all organs and tissue oxygen tension regions stabilized at a lower level, and the carbon dioxide pressure – at a higher, indicating the development of the body hypoxia and hypercapnia.

Otherwise, short-term adaptation mechanisms to respond to the conditions when a person inhales hypoxic mixture. The volumetric flow rate under these conditions increases by about 5 – 10 ml / s, although a huge increase in reserve.

Table 1. Regulatory body reaction and oxygen tension, and carbon dioxide at various perturbation types (short-term adaptation)

Type of perturbation	Parameters	Tissues (pO_2 and pCO_2 in mm Hg, Q in ml/s)					
		Brain	heart	liver	kidneys	skeletal muscles	other tissues
Exercise stress 600 kgm / min	O_2	26,2	15,7	43,8	60,5	13,0	37,2
	CO_2	51,1	57,2	50,2	45,0	54,0	47,8
	Q_{ti}	23,5	29,5	42,6	16,0	298,8	11,4
hypoxic hypoxia $p_aO_2=70$. $p_aCO_2=30$	O_2	32,2	20,8	38,1	44,0	26,0	36,1
	CO_2	30,0	33,5	30,4	28,2	40,5	44,1
	Q_{ti}	14,5	5,6	24,5	21,5	21,0	10,5

The explanation of this fact (which coincides with the actual measurements) so that a substantial increase in the volumetric flow rate of the system, of course, would stabilize. $p_{ti}O_2, i = \overline{1, m}$ at a higher level, but it would lead to a drop in $p_{ti}CO_2, i = \overline{1, m}$ in tissues, to wash out the carbon dioxide in the body. The structure of the functional (11) takes into account both the hypoxic and hypercapnic stimuli regulating and determination $Q, Q_{ti}, i = \overline{1, m}$ conducted on the basis of a compromise. Hypoxia develops in the body, but there is no significant leaching of carbon dioxide.

MATHEMATICAL MODEL OF THE MEDIUM-TERM ADAPTATION

The mathematical model of the process of medium-term period of adaptation occurs when the disturbing factors act on the functional respiratory system either continuously or intermittently for a sufficiently long period of time (weeks, months). At this stage, except for short-term work arrangements to adapt, develop additional adaptive mechanisms that allow in response to outrage the best organization of metabolic functions in the tissues. It is known that the oxygen utilization in tissue reservoirs released the energy needed to do the work of muscles, supporting — motor system, maintain the basic functions of the organs. Part of the energy is released as heat and other species. Therefore, the rate of oxygen consumption in the tissues can be represented as:

$$q_{ti}O_2 = q_{ti}^{\phi}O_2 + q_{ti}^mO_2, \quad (12)$$

where $q_{ti}^{\phi}O_2$ — rate of consumption of oxygen necessary to perform a predetermined level functions of organs and tissues; $q_{ti}^mO_2$ — ate of oxygen consumption, providing the allocation of heat and other forms of energy.

We can assume that for the work of a certain intensity $q_{t_i}^\phi O_2 = \text{const}, i = \overline{1, m}$, while the second component may be reduced due to better organization of functions in the tissue region. We assume that

$$q_{t_{adapt_i}}^m O_2(\tau) = \left(q_{t_{adapt_i}}^m O_2 - q_{t_{crit_i}}^m O_2 \right) * e^{-k\tau} + q_{t_{crit_i}}^m O_2, \quad i = \overline{1, m} \quad (13)$$

$$q_{t_{crit_i}}^m O_2 < q_{t_{adapt_i}}^m O_2,$$

where $q_{t_{adapt_i}}^m O_2$ — constituent rate of oxygen consumption, which is used to extract thermal energy in the adapted organism; $q_{t_{adapt_i}}^m$ — non-adapted to the body; $q_{t_{crit_i}}^m O_2$ — rate of consumption of oxygen required to isolate the minimum amount of power while maintaining the heat balance in the adaptation.

The mechanism of medium adaptation presented by the relations (12) – (13) similar to person learning a certain type of work. The longer person performs the same kind of work, the better he does it with less effort.

Another mechanism is the adaptation medium change mechanism sensitivity coefficient to hypoxia ρ_1 and to hypercapnia ρ_2 .

It can be assumed, that

$$\rho_{1_{adapt}} = \left(\rho_{1_{adapt}} - \rho_{1_{crit}} \right) e^{-k_1\tau} + \rho_{1_{crit}} \quad (14)$$

$$\rho_{2_{adapt}} = \left(\rho_{2_{adapt}} - \rho_{2_{crit}} \right) e^{-k_2\tau} + \rho_{2_{crit}}, \quad (15)$$

where $\rho_{1_{kpum}}$ and $\rho_{2_{kpum}}$ minimum sensitivity coefficients to hypoxia and hyperoxia providing hypercapnic hypoxia and stimulation with the short adaptation mechanisms; k_1 and k_2 — individual coefficients of the adaptation for a particular organism. Note that if $q_{t_i}^m O_2$, $q_{t_{adapt_i}}^m O_2$, $q_{t_{adapt_i}}^m O_2$ — the value of the biophysical, the ρ_1 and ρ_2 have a purely mathematical sense, but in a real organism clearly manifested their expression ensured by a system of different physiological mechanisms.

The mechanisms of medium-term adaptation in certain conditions of vital activity (impact of hypoxic hypoxia, hyperbaria) include erythropoiesis inclusion process — production of red blood cells by the bone marrow and release them into the blood or sequestration of erythrocytes, reducing them in the unit of blood volume. Mathematical model adaptation medium-term is the adaptation medium-term model for hypoxia supplemented by (13) – (15). As noted above, the short-term adaptation to hypoxia model is an optimal control problem dynamic system whose solution objectively difficult — a large number of differential equations governing parameters. It is possible to solve the optimization problem for such a system only at short time intervals (minutes). The medium-term adaptation occurs at longer intervals (days, weeks). Therefore, the use of simulation model of the system becomes ineffective. For this purpose,

Table 2. Regulatory body reactions and the oxygen pressure and carbon dioxide at various perturbation types (medium-term adaptation)

Type of perturbation	Parameters	Tissues (pO_2 and pCO_2 in mm Hg., Q in ml/s)					
		Brain	heart	liver	kidneys	skeletal muscles	other tissues
Exercise stress 600 kgm / min	O_2	28,1	16,1	44,2	62,3	13,3	37,0
	CO_2	50,0	55,7	50,0	44,1	52,8	46,5
	Q_{ti}	22,3	28,0	41,8	15,8	287,7	10,8
hypoxic hypoxia $p_aO_2=70,5$. $p_aCO_2=30$	O_2	33,0	22,6	39,2	45,1	27,0	36,4
	CO_2	30,0	32,8	28,9	28,1	38,8	42,8
	Q_{ti}	13,5	5,4	23,1	20,6	20,5	9,81

and has developed a new system of algebraic relations to predict the behavior of the respiratory system function at a sufficiently large time intervals.

Analysis of the mathematical model adaptation medium-term shows that the inclusion into the model relationships (13) – (15) increases the resource executive bodies regulation, in many cases, return values V , Q , Q_{ti} to levels they accepted the change to the life conditions.

Results of computational experiments with the mathematical model adaptation medium shown in Table 2.

Note that the results of the modeling process medium adaptation to physical exercise performed under conditions at which $q_{ti}^m O_2$ was 5% of the level in the non-adapted organism. Similarly, data obtained by simulation under conditions of hypoxic hypoxia ($\rho_{adapt} = 0,95\rho_{nadapt}$). The simulation results suggest that hypercapnia and hypoxia occurs in both cases, the values of pO_2 in tissues at a higher level than in the short-term adaptation, although levels $Q_{ti}, i = \overline{1, m}$. Decreased compared with calculated by short adaptation.

Returning to the same conditions of life, i.e. readaptation process, it proceeds at a significantly larger time interval and, in essence, is a process of long-term adaptation to a situation in which the influence of hypoxia is reduced.

MATHEMATICAL MODEL OF THE LONG-TERM ADAPTATION

Undoubtedly, the structural trace in the body's long-term adaptation leaves to the existing and effects on the body conditions of life. Regular high-intensity exercise, long-term stay in the mountains leads to a change in the mass of organs and tissues, especially those of the executive regulation of bodies such as the respiratory muscles and the heart muscle. Therefore, it can be assumed that the presence of functional (9)

$$\lambda_{t_i} = \varphi \left(\frac{V_{ct_i}}{V_{t_i} + \Delta V_{t_i}} \right), i = \overline{1, m}. \quad (16)$$

Accordingly, the change of the equation describing the changes in oxygen tension, and carbon dioxide in the tissue regions:

$$\frac{dp_{t_i} O_2}{d\tau} = \frac{1}{(V_{t_i} + \Delta V_{t_i}) \cdot \left(\alpha_{l_{t_i}} + \gamma_{Mb} Mb \frac{\partial \eta_{t_i}}{\partial p_{t_i}} \right)} (G_{t_i} O_2 - q_{t_i} O_2), \quad (17)$$

$$\frac{dp_{t_i} CO_2}{d\tau} = \frac{1}{(V_{t_i} + \Delta V_{t_i}) \alpha_{2_{t_i}}} (G_{t_i} CO_2 + q_{t_i} CO_2). \quad (18)$$

The analysis of equations (17), (18) and functional (9) shows that the reaction mechanisms of regulation, as a result of short-term adaptation, during long-term adaptation will be directed to oxygen stress stabilization and carbon dioxide in the tissue reservoirs at a higher level than it was during adaptation medium. In this case, the resources of the executive management bodies are significant, which allows to increase the volume and intensity of physical activity.

CONCLUSIONS

The model, which describes the mass transfer and mass exchange of respiratory gases in various parts of the respiratory system and the compensating effects of blood flow self-regulating mechanisms that stabilize the functional state of the body at a given level of its functional activity, is a controlled dynamic system, the state of which is determined at each moment by the stresses of oxygen and carbon dioxide in each structural link of the respiratory system (alveoli, blood and tissues). Regulation (self-regulation) of the state at a constant or at a given time interval of the current disturbance (high functional activity of individual tissue groups) is carried out by the executive bodies of self-regulation - the respiratory muscles, which form the necessary level of ventilation to compensate for the occurring hypoxic conditions, the heart muscle, which provides the minute volume of blood and smooth muscles tissue vessels.

This approach has been used on practice to calculate the self-organizational respiratory system of functional parameter of persons at internal and external disturbances and can be used in the practice of occupational medicine and sports (athletes skilled in cyclic sports and combat sports, mountaineers, the operators of continuous interaction between systems) to predict functional status of persons engaged in extreme kinds of activities, the process of fatigue and recovery.

REFERENCES

1. *The secondary tissue hypoxia*. Ed. A.Z. Kolchinskaya. Kyiv: Nauk. Dumka. 1983. (in Russian).
2. Kolchinskaya A.Z., Missyura A.G., Mankovskaya I. *Breathing and oxygen regimes dolphins*. Kyiv, 1980. (in Russian).
3. Onopchuk, Yu.N., Gritsenko V.I., Vovk M.I., Kotova A.B., Belov V.M., Mincer O.P., Kiforenko S.I., Kozak L.M., Ermakova I.I. Homeostasis of the functional respiratory system as a result of intrasystemic and systemic-environmental information interaction. In *Bioecomedicine. Single information space*. Kyiv: Nauk. Dumka, 2001, pp. 59–81 (in Russian).
4. Onopchuk, Yu.N., Gritsenko V.I., Vovk M.I., Kotova A.B., Belov V.M., Mincer O.P., Kiforenko S.I., Kozak L.M., Ermakova I.I. Homeostasis of the functional circulatory system as a result of intrasystemic and systemic-environmental information interaction. In *Bioecomedicine. Single information space*. Kyiv: Nauk. Dumka, 2001, pp.82–104 (in Russian).
5. Polinkevich K.B., Onopchuk Yu. M. Conflict situations during the regulation of main function of organism respiratory system and mathematic models for their solution. *Cybernetics*. 1986, no 3, pp. 100–104. (in Russian).
6. Aralova N.I. Mathematical model of the mechanism short- and medium-functional adaptation of breath of persons work in extreme conditions high. *Kibernetika i vyčislitelnaá tehnika*. 2015, no 182, pp. 15–25. (in Russian).
7. Aralova N.I., Beloshitsky P.V. The change of the parameters of athlete's respiratory system during adaptation to the mountain meteorological factors. Research based on the mathematical models. *Sports Medicine*. 2016, no 1, pp. 111–116. (in Russian).

Received 20.05.2019

ЛІТЕРАТУРА

1. Вторичная тканевая гипоксия / под общ. ред. А. З. Колчинской. К.: Наук. думка. 1983. 253 с.
2. Колчинская А.З., Мисюра А. Г., Маньковская И. Н. Дыхание и кислородные режимы дельфинов. Київ.: Наук. думка, 1980. 332 с.
3. Онопчук Ю.Н., Гриценко В.И., Вовк М.И., Котова А.Б., Белов В.М., Минцер О.П., Кифоренко С.И., Козак Л.М., Ермакова И.И. Гомеостаз функциональной системы дыхания как результат внутрисистемного и системно-средового информационного взаимодействия. Биозомедицина. Единое информационное пространство. Киев, 2001. С. 59–81.
4. Онопчук Ю.Н., Гриценко В.И., Вовк М.И., Котова А.Б., Белов В.М., Минцер О.П., Кифоренко С.И., Козак Л.М., Ермакова И.И. Гомеостаз функциональной системы кровообращения как результат внутрисистемного и системно-средового информационного взаимодействия Биозомедицина. Единое информационное пространство. Киев. 2001. С. 82–104.
5. Полинкевич К.Б., Онопчук Ю.Н. Конфликтные ситуации при регулировании основной функции системы дыхания организма и математические модели их разрешения Кибнетика. 1986. № 3.С. 100–104.
6. Аралова Н.И. Математическая модель механизмов краткосрочной и среднесрочной адаптации функциональной системы дыхания лиц, работающих в экстремальных условиях. Кибернетика и вычислительная техника 2015. Вып. 182. С. 15–25.
7. Аралова Н.І., Білошицький П.В.Зміна параметрів функціонування системи дихання в процесі адаптації спортсменів до гірських метеофакторів. Дослідження на математичній моделі. Спортивна медицина. 2016. № 1. С. 111–116.

Отримано: 20.05.2019

Н.І. Аралова, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
старш. наук. співроб. відд. оптимізації керованих процесів
email: aralova@ukr.net

А.А. Аралова, канд. фіз.-мат. наук,
наук. співроб. відд. методів дискретної оптимізації,
математичного моделювання та аналізу складних систем.
email: aaaralova@gmail.com

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України,
пр. Акад Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КОНФЛІКТНО-КЕРОВАНИХ ПРОЦЕСІВ У РАЗІ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ САМООРГАНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ДИХАННЯ

Вступ. Сучасна життєдіяльність людини вимагає від неї високої спроможності до адаптації у разі ускладнення умов зовнішнього та внутрішнього середовища, таких як потенційна небезпека, підвищена відповідальність, дуже високі фізичні навантаження та їхня сумісна дія. Це призводить до погіршення показників геодинаміки, розладів функціональної діяльності інших органів та тканин. Вирішальна роль в адаптації організму до фізичних та психоемоційних навантажень належить киснево-транспортній системі. Проте наразі можливості інструментальних методів дослідження є досить обмеженими, до того ж вони дають змогу лише охарактеризувати стан організму в поточний момент, а не прогнозувати його резервні можливості у разі зовнішніх та внутрішніх збурень, в процесі відновлення та реабілітації.

Цю прогалину можуть частково заповнити математичні моделі функціональної системи дихання, які дають змогу в динаміці дихального циклу імітувати збурення зовнішнього та внутрішнього середовища і таким чином прогнозувати можливі керувальні впливи органів саморегуляції для адаптації до цих збурень.

Мета. Побудувати математичну модель функціональної системи дихання, яка імітує розв'язання конфліктної ситуації між керувальними та виконавчими органами саморегуляції у боротьбі за кисень, яка надає можливість прогнозувати параметри самоорганізації системи дихання за внутрішніх та зовнішніх збурень.

Результати. Надано математичну модель масообміну респіраторних газів в організмі людини як систему диференціальних рівнянь, яка є керованою динамічною системою, стани якої визначаються у кожен момент напруженнями кисню та вуглекислого газу в кожній структурній ланці системи дихання (альвеолах, крові, тканинах). Керування (саморегуляція) станом на постійному чи на заданому відрізку часу задіяного збурення (висока функціональна активність окремих груп тканин) здійснюється виконавчими органами саморегуляції — дихальними м'язами, які формують необхідний рівень вентиляції для компенсації гіпоксичних станів, що виникають, серцевим м'язом, який забезпечує хвилинний кровообіг та гладенькими м'язами судин, вазодилатація та вазоконстрикція яких сприяє розподілу системного кровообігу по органах та тканинах. Також є пасивні механізми саморегуляції — концентрація гемоглобіну в крові, міоглобіну в скелетних та серцевому м'язах, їхня здатність до оксигенації, концентрація буферних основ в крові тощо. Передбачається, що прийняття рішення щодо вибору величини компенсуючого впливу приймається центром прийняття рішень на основі інформації щодо рівня функціональної активності та ступеня кисневої недостатності, надлишку накопичення вуглецю у всіх тканинних регіонах, передається на виконавчі органи саморегуляції, підвищує їхню функціональну активність, що забезпечує виконання основної функції системи дихання.

Висновки. Запропонована математична модель ФСД дає досліднику можливість проаналізувати кисневі та вуглекислотні режими організму в динаміці за різних рівнів функціонального навантаження і за різних умов середовища; сформувати такі режими системи зовнішнього дихання, які сприяють збільшенню запасів кисню в організмі і тим самим підвищують ресурс серцевого м'яза у регуляції гіпоксичних станів, які виникають за сумісної дії гіпоксичної гіпоксії та гіпоксії навантаження; спрогнозувати стан організму у разі різних фізичних зусиль та оцінити ефективність процесу підгото-

вки; спланувати та розподілити важкі навантаження з урахуванням функціональних можливостей конкретного індивідуума та в залежності від наявних умов. У роботі подано також результати обчислювальних експериментів у разі імітації внутрішніх (фізичне навантаження) та зовнішніх (гіпоксична гіпоксія) збурень на організм людини.

Ключові слова. Конфліктно-керовані процеси, функціональна система дихання, самоорганізація системи дихання, адаптація до навантаження.

Н.И. Аралова, канд. техн. наук, старш. науч. сотр.,
старш. науч. сотр. отд. оптимизации управляемых процессов
email: aralova@ukr.net

А.А. Аралова, канд. физ.-мат. наук
науч. сотр. отд. методов дискретной оптимизации,
математического моделирования и анализа сложных систем
email: aaaralova@gmail.com

Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,
пр. Акад. Глушкова 40, г. Киев, 03187, Украина.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОНФЛИКТНО-УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ДЫХАНИЯ

Введение. Современная жизнедеятельность человека предъявляет все более жесткие требования к его способностям адаптироваться к усложняющимся условиям, таким как неблагоприятные условия окружающей среды, потенциальная опасность, повышенная ответственность, запредельные физические нагрузки и их сочетанное воздействие. Это приводит к понижению толерантности к физическим нагрузкам, неблагоприятным изменениям показателей гемодинамики, расстройствам функциональной деятельности других органов и тканей. Решающая роль в адаптации организма к физическим и психоэмоциональным нагрузкам принадлежит кислородо-транспортной системе. Однако в настоящее время возможности только инструментальных методов достаточно ограничены, к тому же они могут лишь характеризовать состояние организма только в текущий момент, а не прогнозировать его резервные возможности при возмущениях внутренней и внешней среды, в процессе восстановления и реабилитации.

Частично этот пробел могут заполнить математические модели функциональной системы дыхания, позволяющие в динамике дыхательного цикла имитировать возмущения внутренней и внешней среды организма и таким образом прогнозировать возможные управляющие воздействия органов саморегуляции организма при адаптации к этим возмущениям.

Цель. Построить математическую модель функциональной системы дыхания, имитирующую разрешение конфликтной ситуации между исполнительными и управляющими органами саморегуляции в борьбе за кислород, которая позволяет прогнозировать параметры самоорганизации системы дыхания при внутренних и внешних возмущениях.

Результаты. Представлена математическая модель массопереноса и массообмена респираторных газов в организме человека в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений, являющую собой управляемую динамическую систему, состояние которой определяется в каждый момент времени напряжениями кислорода и углекислоты в каждом структурном звене системы дыхания (альвеолах, крови и тканях). Управление (саморегуляция) состоянием при постоянном или на заданном временном отрезке действующем возмущении (высокая функциональная активность отдельных групп тканей) осуществляется исполнительными органами саморегуляции – дыхательными мышцами, формирующими необходимый уровень вентиляции для компенсации возникающих гипоксических состояний, сердечной мышцей, обеспечивающей МОК, и гладкими мышцами тканевых сосудов, вазодилатация и вазоконстрикция которых способствует распределению системного кровотока по органам и тканям. Также присутствуют пассивные механизмы саморегуляции: концентрация гемоглобина в крови, миоглобина в скелетных и сердечной мышцах, их возможности к оксигенации, концентрация буферных основа-

ний в крови и др. Предполагается, что решение о выборе величин компенсирующих воздействий принимается центром принятия решения на основании информации об уровне функциональной активности и степени кислородной недостаточности, избыточности накопления углекислоты во всех тканевых регионах организма, передается на исполнительные органы саморегуляции, повышает их функциональную активность, чем обеспечивается выполнение основной функции дыхания.

Выводы. Представленная математическая модель ФСД дает исследователю возможность проанализировать кислородные и углекислотные режимы организма в динамике при различных уровнях функциональной нагрузки и при различных условиях окружающей среды; сформировать такие режимы системы внешнего дыхания, которые способствуют увеличению запасов кислорода в организме и тем самым повышают ресурс сердечной мышцы при регуляции гипоксических состояний, которые возникают при сочетанном воздействии гипобарической гипоксии и гиперметаболической гипоксии; спрогнозировать состояние организма при различных физических усилиях и оценить эффективность процесса подготовки; спланировать и распределить тяжелые нагрузки с учетом функциональных возможностей данного индивидуума и в зависимости от складывающихся ситуаций. В работе представлены результаты численных экспериментов с моделью при имитации внутренних (физическая нагрузка) и внешних (гипоксическая гипоксия) возмущений на организм человека.

Ключевые слова: *Конфликтно-упряемые процессы, функциональная система дыхания, самоорганизация системы дыхания, адаптация к нагрузкам.*

DOI: <https://10.15407/kvt197.03.080>

UDC 519.216.3-008.1+616.132.2-089

S.I. KIFORENKO¹, DSc (Biology), Senior Researcher,
Leading Researcher of the Department of Mathematical and Technical
Methods Application in Biology and Medicine
e-mail: skifor@ukr.net

T.M. HONTAR¹, PhD (Biology), Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Mathematical and Technical
Methods Application in Biology and Medicine
e-mail: gtm_kiev@ukr.net

V.L. ORLENKO², PhD (Medicine), Senior Researcher,
Head of Scientific-Advisory Department
of Ambulatory and Preventive Care for Patients with Endocrine Pathology
e-mail: orleva@ukr.net

K.Y. IVASKIVA², PhD (Medicine),
Senior Researcher of Scientific-Advisory Department
of Ambulatory and Preventive Care
for Patients with Endocrine Pathology
e-mail: k_iva@ukr.net

T. A. OBELETS¹,
Junior Researcher of the Department of Mathematical and Technical
Methods Application in Biology and Medicine
e-mail: obel.tet@gmail.com

¹ International Research and Training Centre for Information Technologies
and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

² State Institution "V.P. Komisarenko Institute of Endocrinology and Metabolism of
NAMS of Ukraine", 69, Vyshgorodska st., Kyiv, 04114, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY FOR SUPPORTING SELF-CONTROL IN THE FORMATION OF A RATIONAL LIFESTYLE FOR DIABETICS PATIENTS

Introduction. *Modern Diabetes mellitus is dangerous, chronic endocrine disease that originates from the disorder of metabolism, connected primarily with violation of carbohydrate exchange. Providing the necessity of independent self-control of health status of diabetes patients is the urgent problem of present time. The use of information technologies and mobile medicine facilitates enhancing the efficiency of self-control of health status by the patient.*

The purpose of the paper is to develop a combined information technology to enhance the efficiency of glycemic self-control in case of diabetes at different stages of treatment.

© S.I. KIFORENKO, T.M. HONTAR, V.L. ORLENKO, K.Y. IVASKIVA, T.A. OBELETS, 2019

Results. We offer the algorithm of determination of the state of glycaemia regulation system based on the analysis of test results of glucose tolerance and the extended classification scale of glycaemia control (norm, violated tolerance (non-obvious diabetes, latent form, risk zone) that enhances the split ability of standardized methodology and enables timely measures of prophylactic actions to prevent real violations in glycaemia control system. An algorithm is implemented into software for desktops, tablets and mobiles under Android OS.

The developed information technology of decision-making support to choose an adequate mode of activity and meals for patients with diabetes helps to calculate the misbalance between energy gained by chosen menu (by the set of foods and dishes) and energy spent at the different types of the pre-arranged activity (physical, intellectual etc.).

Conclusions. Introduction of the designed algorithm in mobile devices is aimed to facilitate the availability of early diagnostics of violations in carbohydrate regulation system that may assist to reduce risks of emergence of obvious forms of diabetes mellitus. The use in the designed technology the principle of the external combined adjustment, that unites positive features of adjustment by disturbance with adjustment with feedback provides the possibility to enhance efficiency of self-control of the health status for the patient. The technology is implemented for desktops, tablets and mobiles on Android OS and enables access to information for the user with different degree of violation in carbohydrate exchange adjustment — at the state of preambulatory help and during the treatment.

Keywords: information technology, diabetes mellitus, self-control of patient's health, management principles, M-medicine mobile media: information technology, self-monitoring of patient's health, management principles, mobile applications.

INTRODUCTION

Diabetes mellitus (DM) is dangerous chronic endocrine disease that originates from the disorder of metabolism, primarily associated with violation of carbohydrate exchange. Next to cardiovascular and oncologic diseases it occupies one of the leading places on medical-social scale. Starting from 50-ies of XXth century we may observe the constant increase of morbidity, spreading and death rate caused by this disease; the problem has been studied in many publications of leading diabetologists [1–4]. According to the estimates of the International Diabetes Federation (IDF) about 425 million people in the whole world suffer from diabetes. If nothing is done, the number of people with diabetes may rise to 629 million to 2045 that makes almost 6,5 % planet population [5]. World Health Organization relates this disease to the class of noninfectious epidemic [6, 7].

In Ukraine diabetes is one of the wide-spread diseases, and about 1,3 million people suffer from it; one fifth of patients are insulin dependent [8, 9]. Prevalence of DM in Ukraine in 2010 constitutes 7,6%, while in the year of 2030 it is expected to reach 9% with the amount of patients, if corresponding measures won't be taken, grows up to 35,5% [10].

As diabetes is regarded to be a chronic disease that does not provide permanent control from the side of a doctor, thus in such situation this function has to be fulfilled by a patient. It serves the WHO recommendations related to the change of paradigm of rendering assistance in such diseases, focused to the change of accents in the treatment process. Now the advantage in decision-making related to the correction and support of the compensative state of such disease belongs to the patient [11, 12]. The necessity of self-control for patients with diabetes is the urgent problem of present time [13–16]. Now a doctor himself comes forward as an expert, while the final decision belongs to the patient, that he makes with the consideration of sociological, psychological and social factors. At the same time a

problem of ethic nature arises, as grows the patient's responsibility for the diabetes status. The use of information technologies and mobile medicine facilitates the efficiency of patient self-control of the health status.

PROBLEM STATEMENT

It must be noted that deficit of sugar reducing hormone of insulin or resistance to it lies at the core of the carbohydrate exchange violation that makes impossible glucose absorption by tissues. The result of such disorder leads to a high level of glucose in blood and its variability. If fluctuations of glucose level have a long duration nature and occur often, it may result in vascular complications that end in early invalidilization and increase of death rate risks [17].

Commonly accepted therapy is basal-bolus regimen. Its core principle is based upon the attempt to recreate pancreas function related to its reaction on food. It is of replacement nature that consists in insulin discrete injections, coordinated with a carbohydrate constituent in the predictable meals under discrete control of glucose level in blood with the help of glucometers [18]. It must be noted that such treatment needs active participation from the side of a patient and depends fully on his motivation, skills, knowledge, while not all patients strictly follow doctor's recommendations. Even experienced patients with high motivation that fulfil all medical recommendations may face unsatisfactory results. It often depends on the individual peculiarities of regulation related to insulin-resistance, inflammations in the places of injections, allergy on a metal etc.

In treatment technical means that support insulin therapy are also often used, such as: portable devices of insulin infusion into hypoderm by pump (intensification of basal-bolus therapy) [19]. Such method does not eliminate the problems related to variability of the glycaemia, hypoglycemia situations and other complications as well. Devices of the continuous glucose monitoring (CGM) [20] are also widely used in treatment, and they provide information of the level of glycaemia during the day (each 5 minutes) and signal about dangerous hypo- and hypoglycemic situations to take timely measures for their reduction.

These technical developments considerably enhance the efficiency of glycaemic control and are components that substantially contributes to the creation of artificial pancreas with closed feedback. It must be said that these data are not exact, because continuous monitoring system provides information about the level of glucose not in blood, but in an intercellular liquid; these levels are different, but the tendency of glycaemia dynamics is traced [21].

Such technical possibilities aimed to support glycaemia adjustment improved the process of standardized insulin therapy, but the problem of choosing the insulin dose that compensates carbohydrate component in meal is still relevant as the usage of glucometers, the systems of continuous monitoring and infusion systems do not eliminate the occurrence of hyperglycemic / hypoglycemic situations and of complications related to the practical use of these facilities (inflammation in the places of contact etc.). Furthermore, these technical devices are expensive enough and inaccessible to a wide public.

Diabetes is a very complicated endocrine disease that needs various supports: not only pharmaceutical due to the synthesis of new medications, not only technical due to development of new devices, but, taking into account the challenges of modern time associated with the swift development of informative society, it needs information support (computer, mobile, Internet etc.). A patient is unable to fulfil the desire related with the realization of effective control of his diabetic status if he does not have an access to the necessary information tool. It should be mentioned that worldwide different diabetes researches pay a lot of attention to this very important problem. A great number of scientific reviews and thematic articles is dedicated to the problem of its actuality and to the research of the efficiency of use of information technologies, for example [22-25], where the implementation of information technologies aimed to improve diagnostics, treatment, monitoring and diabetes control is analyzed.

In survey-analytical works [23, 26-28] the information on efficiency and strategic prospect of the use of information telemedical component in the process of diabetes treatment is given.

World experience of the use of *mobile telephones* in medicine, including diabetology, is given in the following survey [29]. Technical capabilities of telephones and their closeness to the owner give real-time opportunity to get and to give necessary information to the user. Practically all modern smartphones have an organizers facilities that facilitate health control in case of chronic diseases, diabetes in particular. Smartphones are capable to register and to send to the doctor personal data of health status, meals, physical exercises, level of glucose and other parameters via means of communication (SMS, websites posting).

The majority of researches of the state of those diabetic patients who self-control their health status by monitoring a consumption of meal, physical activity and regular glucose measuring indicate improvement in control of this disease [22]. Generally, plenty of information about concrete applications of mobiles may be found in Internet. Along with the positive appraisal of the use of mobile devices whilst granting consultations to patients with DM, authors of survey [30] drew attention to problems associated with mobile expenses and their compensation to users. Together with advantages of information technologies some authors take notice on drawbacks in diabetes treatment, that are - higher cost of primary and technical services, complication of the use of computer and information systems for medical personnel and patients who do not have sufficient experience with computer devices. However, the demand for mobile applications constantly grows [31, 32].

The analysis of modern researches has shown that use of information technologies, in addition to traditional therapy, improves glycemic control with different efficiency at different clinical situations for patients with diabetes [22]. There is a need in integrated information techniques that combine simultaneously several technologies to provide diabetes treatment.

The purpose of the article is to develop integrated information technique of increasing the efficiency of glycemic self-control in case of diabetes at different stages of treatment process.

The information technique is designed to support decision-making for early diagnostics of the state of the carbohydrate exchange system and to provide self-control of glycemic status subject to energetic balance.

INFORMATION SUPPORT OF DEFINITION OF THE CONDITION OF CARBOHYDRATE EXCHANGE SYSTEM ON PRE-NOSOLOGICAL STAGE

The increase of diabetes dissemination is by and large related to its asymptomatic progress on the early stages of disease. For this reason, a person starts seeking advice from a doctor with a delay, when complications have already aroused. At this stage treatment is difficult and expensive. Due to this group of people who consider themselves to be relatively healthy as increased level of glucose does not affect the way of living, the amount of DM patients increase up to 15% annually [1] and dissemination expands. To win the battle against this disease and to take prevention measures against its complications it is crucial to provide an early determination of violations in carbohydrate exchange and timely detection of DM patients. The earlier disease is being identified, the more chances to preserve capacity, the more effective treatment will be.

In WHO Recommendations of 2011 a new diagnostic criterion based upon glycolized HbA1c hemoglobin is approved. Its application simplifies the identification of the asymptomatic stage of the disease. At the same time a new diagnostic scale is recommended: value $\text{HbA1c} > 6,5\%$ — corresponds to the diagnosis of diabetes mellitus; while $6,4\% > \text{HbA1c} > 5,7\%$ constitutes a high-risk group; and for $\text{HbA1c} < 5,7\%$ — is the norm [33]. Introduction the methodology of determination of HbA1c concentration into a practice of diagnostics of glycemic determination status substantially improved identification of pre-clinic stages of diabetes, and its treatment and support at the stage of compensation disregarding the fact that the evaluation according to this method is of accumulative character, as only time-period of three month deviations in adjustment is taken into consideration.

Besides, in practice of DM treatment glucose tolerance test (GTT) based on laboratory analysis data of glycaemia by three information points is widely used: on an empty stomach, in one hour and in two hours on the background of the per oral test glucose loading. Obtained test glycemic profile of dynamics of blood sugar serves as the indicator of quality of functioning of the system of glycaemia adjustment. As a result, three states of the glycemic adjustment system depending on the values of glycaemia concentration on the time scale, that are - norm, violated tolerance, diabetes [34, 35].

Must be noted that diagnostic properties of glucose-tolerance test can be increased due to the improvement of its results processing. The algorithm of determination of the status of glycaemia adjustment system based on calculation and analysis of the linear-weighted sum of the amounts of deviations in test measuring of glucose concentration that differs from the average glycemic norm for healthy people (during the same physical activity) in exactly those three points: on an empty stomach, in one hour and in two hours after the test glucose loading (Fig.1) is offered. With the help of designed diagnostic scale, it is possible to define not only the status of glycaemia adjustment system using a standard diagnostic range: norm, violated tolerance (non-obvious diabetes, latent form) and diabetes, but also to further define a risk zone [34]. A presence of that additional range in the diagnostic appraisal enhance the resolving power of standard methodology that enables to provide timely measures to prevent actual violations in glycaemia adjustment system. The early detection of persons with those violations at the preclinical stage will assist the reduction of disease dissemination.

The implementation of the designed algorithm into mobile devices is aimed to increase the availability of the service of early diagnostics of violations in carbohydrate exchange system that may assist the risk reduction of the emergence of explicit forms of diabetes disease.

This algorithm is implemented in three software variants: for computers, tablets and for mobile devices on Android OS. The screen forms for mobile implementation are shown (Fig. 2).

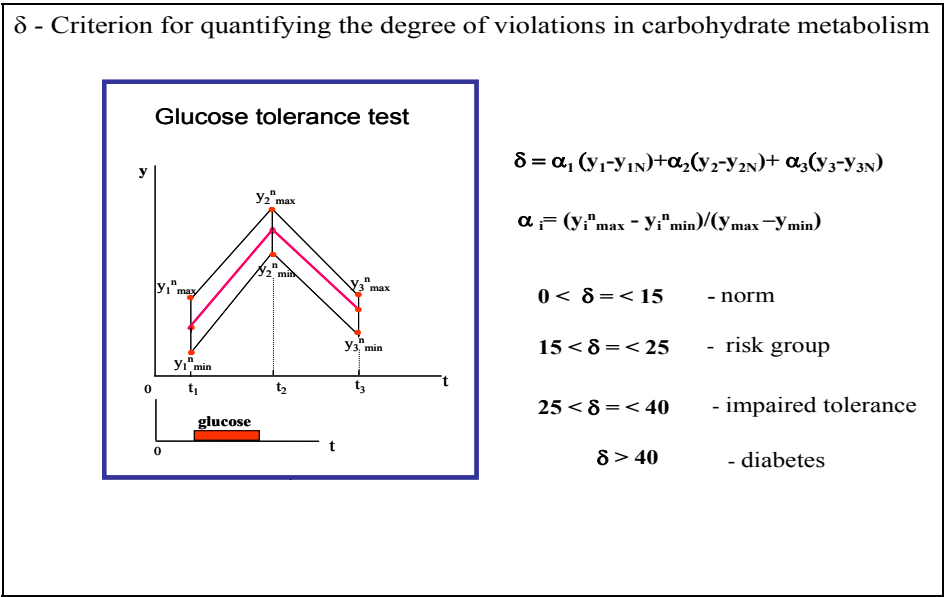


Fig.1. Chart of determination of the status of glycaemia adjustment system

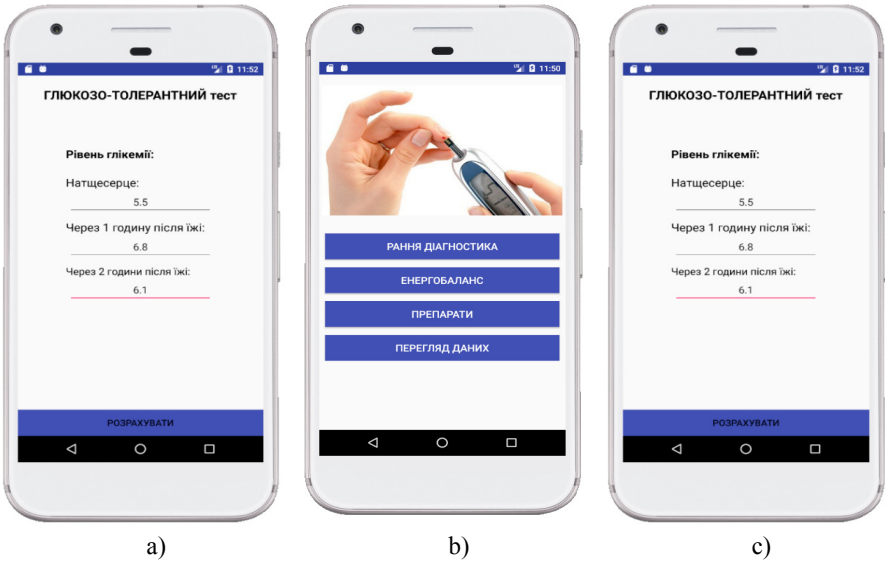


Fig. 2. Screen forms for mobile implementation: a) window of choosing the module; b) initial data for test input; c) diagnostic window

INFORMATION SUPPORT OF GLYCEMIA SELF-CONTROL. ENERGY BALANCE

In the course of evolution, a complex system of adjustment of carbohydrate exchange was formed to grant its energy needs. At the same time, it is necessary to maintain the concentration of glucose in blood within homoeostatic limits; the task that is carried out due to coordinated co-operation both — of nervous and endocrine mechanisms. That stable enough homoeostasis in a healthy organism counteracts against various external influences related to the periodic meals, physical and emotional activities, etc. [36, 37].

In terms of control theory [38] must be indicated that in the organism a quite complex and well-balanced automatic system of physiological control with hierarchical framework of direct and inverse relationship is established. A set of glucoreceptors sends the information about the level of glucose concentration to the central nervous system (hypophysis, hypothalamus), and from there via nervous fibers — to the pancreas that secretes a sugar-reducing hormone — insulin, the activity of which increases, if glucose is in a hyperglycemic phase. In case of hypoglycemia a set of endocrine disruptors that perform contrinsular function — opposed to that of pancreas, and in this situation it assists the increase of glycemic level [37].

External glycemic control setting. In a healthy organism all these processes are executed automatically. In a pathological state at diabetes, when automatic physiology control is impaired, such control is replaced by the external therapeutic measures aimed to artificially recreate the perfect physiology adjustment.

For organization of artificial process of glycaemia control it would be useful to take advantage of control theory terminology. For this purpose, it is necessary:

- to have a clear idea about *the purpose* necessary to attain control measures, desirable range of glycaemia values that has to be attained;
- to have information about *the influence* at least of basic *external factors*, such as — meals, physical activities that can be considered, although there is an enormous amount of emotional accidents that is impossible to envisage,
- to have data about the state of the object in control — current glycaemia level at the moment of control measures to be taken.

The principle of *external control with feedback*. Depending on the availability of information mentioned above the approaches of control differ [38]. In case of a technical feasibility to get *continuous glycemic control* and transportation of basic therapeutic substances into an organism - as insulin, contra-insular factors - then the principle of automatic control with a feedback is being implemented. In case a control device obtains delayed data, one should implement the principle of adaptive control involving feedback contour of prognosis model [39]. At the same time the system reacts on the fact of deviation in glycemic level from its desired value, regardless reasons that caused it.

Feedback is a way to artificial pancreas. The ways of glucose measuring that may replace glucoreceptors are able to implement an adjustment option *with feedback*, that is the initial stage to creation of artificial pancreas. Lately the design and testing of such devices are being conducted, while problems of making a system of artificial glycaemia adjustment were defined [21, 39, 40]. On Fig.3 the fundamental diagram of control system with feedback (artificial pancreas) is presented.

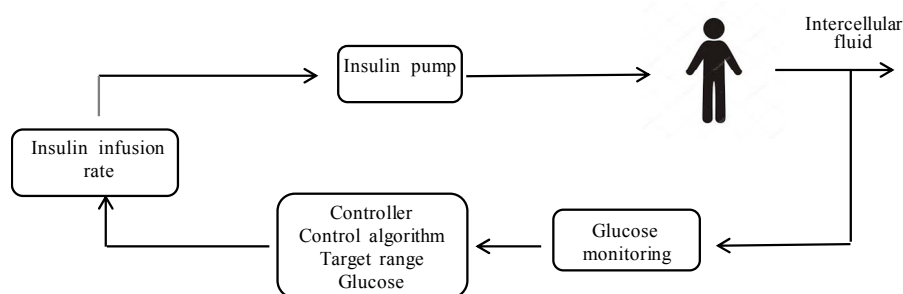


Fig. 3. A functional diagram of control process managing deviation with a feedback

Principle of external control based on disturbance. In case of lack of automatic control, when the correction of the status runs discretely according to a certain time schedule with some delay — as there is no possibility to work out timely glucose measuring — an attempt to use terminology of automatic control theory would be incomplete, if external influences onto a carbohydrate constituent both — at meals and data of energy consumption during different types of activity are not being considered. To solving such a problem in everyday life the modern information space offers plenty of databases on food and energy consumption with the information offered in article and on Internet web-sites [41, 42]. The possibility of the quantitative consideration of these factors, if spoken in terms of control theory, recreates that part of control process that is called *adjustment by disturbance*. In such a case the system is invariant towards its internal state and does not depend on glucose concentration in blood because such information is missing. A positive issue of such control grounds on the fact that then the compensation of disturbance is implemented with prior warning of its effect onto glycemic level, in other words before this disturbance affects control parameter. The functional diagram of such a control process is given in Fig. 4.

The weaknesses of control by disturbance lie in the fact that the system enables only a limited number of disturbances. For the designed technology they are — meals and physical activity. An attention must be paid to the fact that the dependence of control measures (doses of insulin) from external influences (meals and activity) is quite complex one and cannot be accordingly realized exactly. Besides, other external influences onto adjustment system may exist as well, that are hard to consider, e.g. emotional disturbances. Another drawback of application with such control principle is that in this case the system becomes invariant towards internal health profile. In our case it means that deviations in adjusted parameter of glycaemia from a desirable level undoubtedly exist, but they are not considered in calculation of a controlled insulin dose according to this control principle.

Principle of the external combined adjustment. Information content in external control constituent taken from databases is given in such a way that user takes for granted as a basis for qualitative energy supply and energy spending should be accordingly complemented by glucose-in-blood measuring before a meal. Data input of these measurements into the calculation of insulin bolus may help to recreate and quantitatively consider smooth mechanisms of glycemic adjustment, that take place in a healthy organism. And in terms of control theory this is the combined adjustment that consists of two constituents — 1) feedback adjustment of glycaemia deviation from a desirable level and 2) adjustment by

disturbance. The principle that combines the positive features of adjustment by disturbance and a feedback by deviation is most precise one and has widespread use. A result of functional diagram complemented by the contour of the discrete feedback harmonized with meals is presented on Fig.4.

There are a few protocols of insulin therapy. The closest to the natural secretion of insulin by pancreas that reacts on meals is *basical-bolus methodology* that is widely used in practice of diabetes therapy. According to this methodology the correction of the compensatory insulin dose on a meal, calculated by carbohydrate choice added by additional dose of insulin depending on the glycaemia level before a meal [43] is assumed.

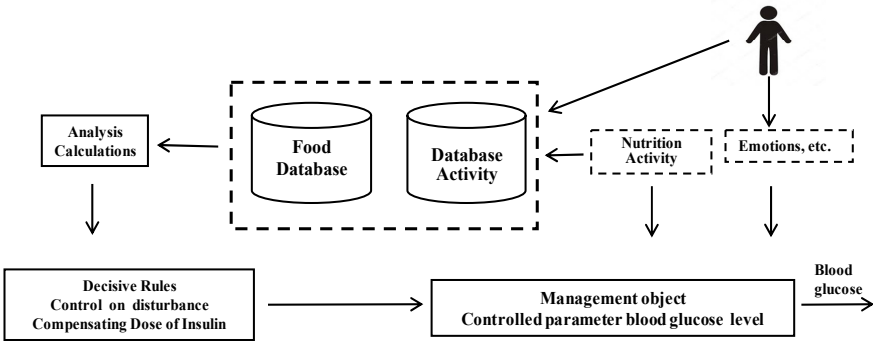


Fig. 4. Functional diagram of control by disturbance

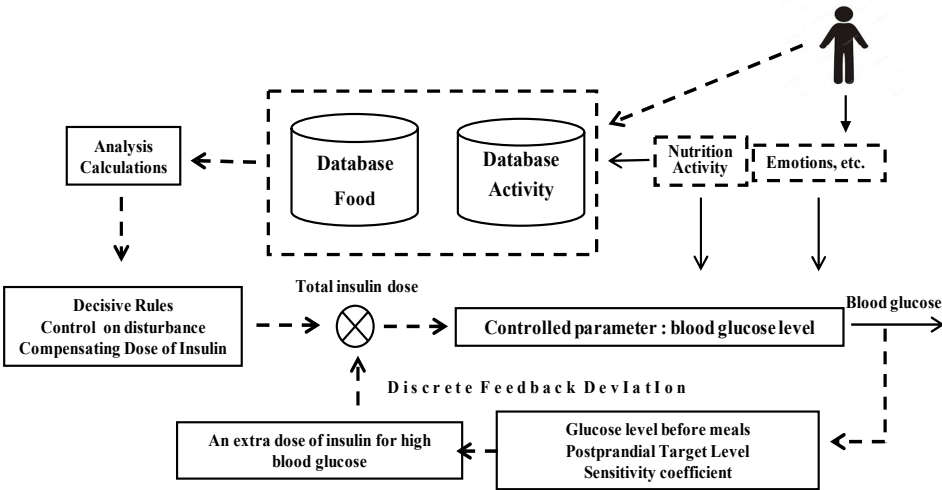


Fig. 5. Functional diagram of the combined control - a combination of adjustment by disturbance with feedback adjustment of glycaemia deviation from a desirable level

Thus, *basic principles of automatic control theory* are applied to therapeutic measures of DM treatment however a discrete mode. The fundamental diagram of such a combined control is presented (Fig. 5).

INFORMATION-STRUCTURAL MODEL

Taking into account the fact that diabetes is chronic disease, while patient faces the problems in private and constantly needs information help, the following task is set: to work out information technology to support decision-making aimed to simplify, bring it closer to the consumer and to make accessible the necessary information with the help of modern computer and mobile means.

A basic factor in medical treatment that accompanies sugar-reducing therapy is a diet therapy. Patients with diabetes of the 1st and the 2nd types must thoroughly learn — first with the help of specialist, then independently — to calculate calories, carbohydrates and carbohydrate choice contained in meals, plan the meals according to individual needs that depend on the type of diabetes, anthropometric data, physical activity of patient and other factors. Principles of choosing a diet of a certain calorie content that meets energy consumption fundamentally depends on type of diabetes. In case of diabetes of the 1st type it is crucial to coordinate carbohydrates in a chosen menu with the compensative dose of insulin that is calculated according to the amount of carbohydrate choice (CC) equivalent to the carbohydrate constituent in a meal. For diabetes of the 2nd type, as it deals with violations of carbohydrate-adipose metabolism persons with excessive body mass have to calculate calories to further reduce. In both cases patients are bound to execute *routine calculations* that negatively influence the quality of everyday life.

To facilitate it plenty of computer programs and applications that contain necessary information are designed. However, such information is often ambiguous and contradictory. Information support for the developed technology is based on normative documents of Ministry of Health of Ukraine concerning norms of physiologic needs of population of Ukraine in basic foodstuffs and energy [44]. Data related to day's requirement in calorie equivalent for different age groups of adult population given in the article are approximated by equations of regression such as:

$$Q = A * W + B,$$

where: Q — is the day's requirement in calories excluding physical activity, W — is weight, A, B — are coefficients of regression.

The results of approximation are given in Table 1.

Activity is considered according to the following formulas:

Very easy	$Q_1 = Q + Q/6$
Easy	$Q_2 = Q + Q/3$
Middle weight	$Q_3 = Q + Q/2$
Heavy	$Q_4 = Q + 2Q/3$
Very heavy	$Q_5 = Q + 2Q$

Table 1. Coefficients of regression equations for the calculation of daily needs in a calorie equivalent for different age groups of adult population

Equations	Q = A*W + B			
	Men		Women	
Age	A	B	A	B
18–29	16,4	610,8	15,0	477,8
30–39	15,5	572,7	14,5	465,8
40–59	14,4	540,3	14,1	449,8
≥ 60	13,5	495,1	13,4	426,9

Technological basis of the designed information technology grounds on the information-structural model of the problem focused on the division of all volume of knowledge according to a task organized into separate modules of logically-combinatory type and into modules of calculation procedures that represent their quality features and their specific use (Fig. 6).

The module of data processing provides the interpretation of results, conclusions and recommendations on calories in meals. According to these data the body weight index, recommended mass and weight misbalance are calculated, and those data obtained use as the basis for diagnostic conclusions ("Mass in norm", "Deficit of mass", "Higher norm", "Obesities of a 1,2,3 Degree").

A structural diagram illustrates algorithmically envisaged actions incorporated by logical sequence of allocated modules.

The module of input data contains:

- personal anthropometric data, type of diabetes, disease duration, type of activity according to professional activity of user (chosen from the list);
- glycaemia level before a meal, desirable glycaemia level (mmol/l).

Module "Energy balance" combines "Foods" and "Activity" databases.

These modules have a hierarchical structure, constituents of which are grouped and contain corresponding data characteristic for dietology and for the science of labor activity (with the consideration of a consumer basket, national cuisine etc.).

Basic information kernel of the module "Energy balance" consists databases (as dynamic tables with the calculation fields) of foods and types of activity with corresponding hierarchical organization (types, groups, kinds).

In the process of implementation rules of these bases according to the designed algorithms a misbalance between energy that comes into an organism together with the user chosen menu (the set of products and dishes) and energy that is spent during different types of the pre-arranged activity (physical, intellectual etc.) is calculated. The output of work of this module is the value of calories in foods of chosen menu, carbohydrate constituent, carbohydrate choice and compensatory insulin dose that recreates the component adjustment by disturbance described higher.

The calculation of *additional dose of insulin* according to the results of deviation of glycaemia level before a meal from the desirable one realizes an adjustment constituent *with feedback*.

The result of a combined correction is the cumulative insulin dose. It is necessary to consider the individual sensitiveness of patient to the type of insulin, the coefficient of that is chosen personally.

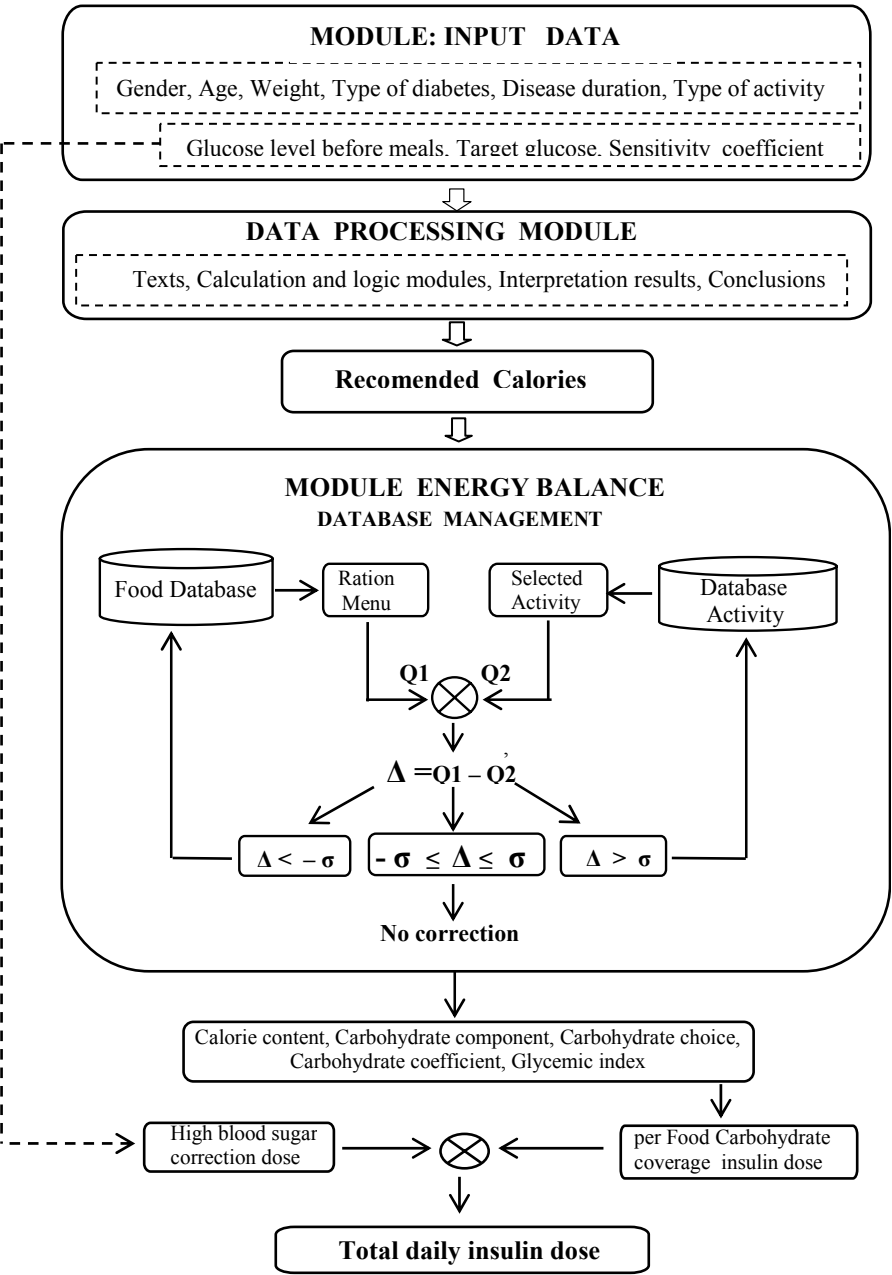


Fig. 6. Structural-algorithmic diagram of information technologies of decision-making — to choose the menu adequate to energy consumption

This technology is implemented in three modifications: for desktops, tablets and for mobile devices on Android [34]. The screen forms for mobiles are presented (Fig. 7).

The implementation of the designed technology in mobile Android applications brings closer information support to the user for the further independent practice of rules of harmonization of insulin therapy with building up an adequate energy balance in relation of energy supply with a meal and its further spending during pre-arranged activity in a calories equivalent.



Fig. 7. Screenshots for mobiles: a) starting window, b) input data, c) conclusions, d) choice of database (activity, foods), e) calculation of calories content and constituents (proteins, fats, carbohydrates) for each meal, f) tables of calories taken with meal and spent during pre-arranged activity and insulin dose

The application of the designed combined technology aimed to support a decision-making in diabetology according to the different stages of treatment process (diagnostics, treatment, insulin therapy) with the use of computer facilities of different level of realization (computers, tablets, mobiles) gives an opportunity to enhance efficiency, to bring it closer to the user, to do more accessible an information help to the patient with the different degree of violation in carbohydrate exchange, both — at the stage of preclinical ambulatory help and during the treatment itself. It must be noted that if a correction of insulin dose is exceptional prerogative of treatment process, then a diet correctly chosen with the help of modern information technologies (mobile as well) is the component of decision-making support at all stages of treatment and in everyday's life.

The approbation of designed information technology was performed in V.P. Komissarenko Institute of Endocrinology and Metabolism in ambulatory care of DM patients and the results have shown positive influence on making a decision in the process of treatment.

CONCLUSIONS

Despite certain achievements in diabetology, diabetes mellitus remains a problematic disease and it needs careful and laborious therapeutic efforts and considerable financial costs to provide a patient an adequate level of life sustenance.

The offered algorithm of determination of the state of glycaemia adjustment system that grounds on the analysis of test results on glucose tolerance and on the extended classification scale of glycaemia adjustment — norm, risk zone, violated tolerance (latent form) and diabetes — enhances the resolving power of standardized methodology that enables timely to take necessary prophylactic measures to avoid real violations in the system of glycaemia adjustment.

The principle of the external combined adjustment that combines positive features of adjustment by disturbance with that with feedback is now admitted to be the most acceptable. And that implies its wider application in developing the information means of decision-making support to finer tuning of carbohydrate exchange system.

The developed information technology of decision-making support to choose an adequate mode of activity and meals for patients with diabetes provides making a decision at different treatment stages through the calculation of misbalance between energy gained by chosen menu (by the set of foods and dishes) and energy spent at the different types of the pre-arranged activity (physical, intellectual etc.). The technology is implemented into software for desktops, tablets and mobiles under Android OS. The use of such technology enables to enhance the efficiency of diabetes treatment and facilitates information help to the user with the different degree of violation in carbohydrate exchange adjustment.

REFERENCES

1. Dedov I.I. Diabetes mellitus is the most dangerous challenge to the world community. *Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2012. V. 67, no. 1, pp.7–13. (In Russian).
2. Jung H.S. Clinical Implications of Glucose Variability: Chronic Complications of Diabetes. *Endocrinol Metab (Seoul)*. 2015, no. 30(2), pp. 167–74.
3. Dedov I.I., Shestakova M.V., Vikulova O.K., Zheleznyakova A.V., Isakov M.A. Diabetes mellitus in the Russian Federation: prevalence, incidence, mortality, carbohydrate metabolism parameters and structure of hypoglycemic therapy according to the Federal

- Register of Diabetes Mellitus, 2017 status. *Diabetes mellitus*. 2018, T.21, no. 3, pp. 144–159. (In Russian).
4. Efimov A.S., Orlenko V.L., Sokolova L.K. Diabetes mellitus and its complications. *Journal. pract. doctor*. 2003, no 2, pp.34–40. (In Russian).
 5. IDF Diabetes Atlas 8th edition 2017 update. URL: <https://www.diabete.qc.ca › getdocument › titule › IDF-DA-8e-EN-finalR3>
 6. Diabetes. WHO 2018. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>.
 7. Pankov V.I. Diabetes mellitus: definition, classification, epidemiology, risk factors. *International. Journal of Endocrinology*. 2013, no. 7 (55). P. 55–60. (In Russian).
 8. Diabetes in Ukraine. «Diaforum 2017». URL: <https://www.unian.net/health/country/233891-v-ukraine-bolee-1-mln-300-tyisyach-lyudey-jivut-s-saharnym-diabetom.html>. (In Ukrainian).
 9. Shaw J.E., Sicree R.A., Zimmet P.Z. Diabetes Atlas: Global estimates of the prevalence of diabetes for 2010 and 2030. *Diabetes Research and Clinical Practise*. 2010, Vol. 87, pp. 4–14.
 10. The prevalence of diabetes in Ukraine. URL: <https://telegraf.com.ua/zhizn/zdorove/195284-rasprostranennost-saharnogo-diabeta-v-ukraine.html>. (In Russian).
 11. Innovative care for chronic conditions. Key elements for action: global report of the world health organization (WHO ,2003). URL: <https://www.who.int/chp/knowledge/publications/iccruissian.pdf/ua>. (In Russian).
 12. Inzucchi S.E., Bergenstal R.M., Buse J.B. [et al.] Management of Hyperglycemia in Type 2 Diabetes, 2015: A Patient-Centered Approach: Update to a Position Statement of the American Diabetes Association and the European Association for the Study of Diabetes. *Diabetes Care*. 2015. Vol. 38, no. 1, pp. 140–149.
 13. Whitehead L, Seaton P. Whitehead L, Seaton P. The Effectiveness of Self-Management Mobile Phone and Tablet Apps in Long-term Condition Management: A Systematic Review. *J Med Internet Res*. 2016. Vol. 18(5):97.
 14. Debon R., Coleone J.D., Bellei E.A., De Marchi A.C.B. Mobile health applications for chronic diseases: A systematic review of features for lifestyle improvement. *Diabetes Metab Syndr*. 2019. Vol. 13, no. 4, pp. 2507–2512.
 15. Mamedov M.N. Self-monitoring in diabetes: the use of modern technology at home. *Medical advice*. 2016, no.13, pp.95–98. (In Russian).
 16. Dreval A.V., Redkin Yu.A. The role of self-control in the treatment of diabetes. *Russian medical journal*. 2016, no. 1, pp. 38–40. (In Russian).
 17. Balabolkin M.I., Klebanova E.M., Kreminskaya V.M. *Treatment of diabetes and its complications (a guide for doctors)*. Moscow: Medicine, 2005. (In Russian).
 18. Samson O.J., Bolshova O.V., Muz V.A. Features of diabetes self-control in children and adolescents. *Clinical endocrinology and endocrine surgery*. 2010, no. 2 (31), pp.42–47. (In Ukrainian).
 19. Report of a seminar on pump insulin therapy. The Russian Diabetic AS-Society (June 23–26, 2012). URL: <http://rda.org.ru/doc/poland2012.htm>. (In Russian).
 20. Dedov I.I., Shestakova M.V., Mayorov A.Yu. *Algorithms for specialized medical care for patients with diabetes mellitus. 8th edition*. Moscow: UP PRINT, 2017. (In Russian).
 21. Karpel'ev V.A., Fedorov E.A., Filippov I. Yu., Shestakova M.V. Intraperitoneal infusion of insulin in diabetes mellitus: Towards an artificial pancreas. *Diabetes mellitus*. 2015, no. 3, pp.32–45. (In Russian).
 22. Riaz H., Larijani B., Langarizadeh, M. And L. Shahmoradi. Managing diabetes mellitus using information technology: a systematic review. *J Diabetes Metab Disord*. 2015. Vol. 14, p. 49.
 23. Jackson C.L., Bolen S., Brancati F.L., Batts-Turner M.L., Gary T.L. A systematic review of interactive computer-assisted technology in diabetes care: interactive information technology in diabetes care. *J Gen Intern Med*. 2006. Vol. 21, no. 2, pp.105–110.
 24. Saenz A., Brito M., Moron I., Torralba A., Garcia-Sanz E., Redondo J. Development and validation of a computer application to aid the physician's decision-making process at the start of and during treatment with insulin in type 2 diabetes: a randomized and controlled trial. *J Diabetes Sci Technol*. 2012. Vol. 6(3), pp. 581–8.
 25. Tronko N.D., Halangot N.D. The use of computer systems and information technologies in practical diabetes. *Endokrynolohiya*. 2001, no. 1, pp.89–94. (In Russian).

26. Marcolino M.S., Maia J.X., Alkmim M.B.M., Boersma E., Ribeiro A.L. Telemedicine application in the care of diabetes patients: systematic review and meta-analysis. *Plos One*. 2013. Vol. 8(11), e79246.
27. Adaji A., Schattner P., Jones K. The use of information technology to enhance diabetes management in primary care: a literature review. *Informatics in Primary Care*. 2008, no. 16, pp. 229–37.
28. Siriwardena L.S.A.N., Sudarshana Wickramasinghe W.A., Dussantha Perera K.L., Marasinghe R.B., Katulanda P., Hewapathirana R. A review of telemedicine interventions in diabetes care. *J Telemed Telecare*. 2012, no. 18, pp. 164–168.
29. Chestnov O.P., Boytsov S.A., Kulikov A.A., Baturin D.I. Mobile healthcare: global experience and prospects. *Preventative medicine*. 2014, no. 17(4), pp 3–9. (In Russian).
30. Bree Holtz, Carolyn Lauckner. Diabetes management via mobile phones: a systematic review. *Telemedicine and e-Health*. 2012. Vol. 18, no. 3, pp. 175–185.
31. Faraz S. Ahmad, Thomas Tsang. Diabetes Prevention, Health Information Technology, and Meaningful Use. *American Journal of Preventive Medicine*. 2013. Vol. 44, no. 4, pp. 357–363.
32. Pradeepa R., Prabu A.V., Jebarani S., Subhashini S., Mohan V. Use of a large diabetes electronic medical record system in India: clinical and research applications. *J Diabetes Sci Technol*. 2011, no. 5(3), pp. 543–552.
33. World Health Organization. (2011). Use of glycated haemoglobin (HbA1c) in diagnosis of diabetes mellitus: abbreviated report of a WHO consultation. World Health Organization. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/70523>
34. Lavrenyuk N.V., Kiforenko S.I., Kotova A.B., Ivaskiva E.Yu. Information and computer support for decision-making in the early diagnosis of diabetes. *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika*. 2009, iss. 157, pp. 54–60. (In Russian).
35. Tronko M.D., Efimov A.S., Kravchenko V.Sh., Early diagnosis of diabetes mellitus and its complications. Doctor Info: Health Portal. 2003. URL: <http://www.liarsnfo/pro/43480/>. (In Ukrainian).
36. Efimov A.S., Karabun P.M., Epshtein E.V. *Obesity and diabetes mellitus*. Kyiv: Health, 1987. (In Russian).
37. Efimov A.S., Orlenko V.L., Sokolova L.K. Diabetes mellitus and its complications. *Zhurn. prakt. likarya*. 2003, no. 2, pp. 34–40. (In Russian).
38. The principles of automatic control, their advantages and disadvantages. URL: <https://studfiles.net/preview/4634773/page:13/>. (In Russian).
39. Turksoy K., Cinar A. Adaptive control of artificial pancreas systems - a review. *J Healthc Eng*. 2014. Vol. 5(1), pp.1–22.
40. Cobelli C., Renard E., Kovachev B.P. Artificial pancreas: past, present, future. *Diabetes*. 2011. Vol. 60, pp. 2672–82.
41. Lebedeva O., Lebedev I. Counting calories. URL: <http://calories.ru/cgi-bin/calc.pl>. (In Russian).
42. Kadomsky Yu. Alphabet of diabetes. Point intensive insulin therapy of insulin-dependent diabetes mellitus. 2018. URL: <http://www.juri.dia-club.ru>. (In Russian).
43. School of diabetes. Learn to manage diabetes. URL: <https://shkoladiabeta.ru/>. (In Russian).
44. On Approval of the Norms of Physiological Needs of the Population of Ukraine in the Basic Nutrients and Energy. Order of 09.03.2017 № 1073 of the Ministry of Health of Ukraine. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17> (In Ukrainian).

Received 19.06.2019

ЛІТЕРАТУРА

1. Дедов И.И. Сахарный диабет — опаснейший вызов мировому сообществу. *Вестник Российской Академии медицинских наук*. 2012. Т. 67. №1. С.7–13.
2. Jung H.S. Clinical Implications of Glucose Variability: Chronic Complications of Diabetes. *Endocrinol Metab (Seoul)*. 2015. No. 30(2). P. 167–74.

3. Дедов И.И., Шестакова М.В., Викулова О.К., Железнякова А.В., Исаков М.А. Сахарный диабет в Российской Федерации: распространенность, заболеваемость, смертность, параметры углеводного обмена и структура сахароснижающей терапии по данным Федерального регистра сахарного диабета, статус 2017 г. *Сахарный диабет*. Т.21. № 3 (2018). С. 144–159.
4. Ефимов А.С., Орленко В.Л., Соколова Л.К. Сахарный диабет и его осложнения. *Журн. практ. лікаря*. 2003. №2. С.34–40.
5. IDF Diabetes Atlas 8th edition 2017 update, URL: <https://www.diabete.qc.ca › getdocument tutile › IDF-DA-8e-EN-finalR3>
6. Diabetes. WHO 2018. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>
7. Паньків В. І. Цукровий діабет: визначення, класифікація, епідеміологія, фактори ризику. *Міжнародний ендокринологічний журнал*. 2013. №. 7 (55). С. 55–60.
8. Діабет в Україні. «Діафорум 2017». URL: <https://www.unian.net/health/country/2233891-v-ukraine-bolee-1-mln-300-tyisyach-lyudey-jivut-s-saharnym-diabetom.html>.
9. Shaw J.E., Sicree R.A., Zimmet P.Z. Diabetes Atlas: Global estimates of the prevalence of diabetes for 2010 and 2030. *Diabetes Research and Clinical Practise*. 2010. V.87. P. 4–14.
10. Распространенность сахарного диабета в Украине. URL: <https://telegraf.com.ua/zhizn/zdorove/2195284-rasprostranennost-saharnogo-diabeta-v-ukraine-uvelichilas-v-poltora-raza.html>.
11. Новаторские методы оказания помощи при хронических состояниях. Основные элементы для действий: глобальный доклад всемирной организации здравоохранения (ВОЗ, 2003). URL: <https://www.who.int/chp/knowledge/publications/ icccrussian.pdf/ua>.
12. Inzucchi Silvio E., Bergenstal Richard M., Buse John B. [et al.] Management of Hyperglycemia in Type 2 Diabetes, 2015: A Patient-Centered Approach: Update to a Position Statement of the American Diabetes Association and the European Association for the Study of Diabetes. *Diabetes Care*. 2015. Vol. 38. N 1. P. 140–149.
13. Whitehead L, Seaton P. Whitehead L, Seaton P. The Effectiveness of Self-Management Mobile Phone and Tablet Apps in Long-term Condition Management: A Systematic Review. *J Med Internet Res*. 2016. V.18(5):e97.
14. Debon R., Coleone J.D., Bellei E.A., De Marchi A.C.B. Mobile health applications for chronic diseases: A systematic review of features for lifestyle improvement. *Diabetes Metab Syndr*. 2019. V13. N 4. P. 2507–2512.
15. Мамедов М.Н. Самоконтроль при сахарном диабете: применение современных технологий в домашних условиях. *Медицинский совет*. 2016. №13. С.95–98.
16. Древаль А.В., Редькин Ю.А. Роль самоконтроля в лечении сахарного диабета. *Русский медицинский журнал*. 2016. № 1. С. 38–40.
17. Балаболкин М.И., Клебанова Е.М., Креминская В.М. Лечение сахарного диабета и его осложнений (руководство для врачей). Москва: Медицина, 2005. 512 с.
18. Самсон О.Я., Большова О.В., Музь В.А. Особливості самоконтролю цукрового діабету у дітей і підлітків. *Клінічна ендокринологія та ендокринна хірургія*. 2010. № 2(31). С.42–47.
19. Отчет семинара по помповой инсулинотерапии. «Российская Диабетическая Ассоциация» (23–26 июня 2012). URL: <http://rda.org.ru/doc/poland2012.htm>.
20. Алгоритмы специализированной медицинской помощи больным сахарным диабетом /Под редакцией И.И. Дедова, М.В. Шестаковой, А.Ю. Майорова. 8-й выпуск. Москва: УП ПРИНТ, 2017. 112 с.
21. Карпельев В.А., Федоров Е.А., Филиппов Ю.И., Шестакова М.В. Интраперитонеальная инфузия инсулина при сахарном диабете: на пути к искусственной поджелудочной железе. *Сахарный диабет*. 2015. №3. С.32–45.
22. Riaz H., Larjani B.,Langarizadeh, M. And L. Shahmoradi. Managing diabetes mellitus using information technology: a systematic review. *J Diabetes Metab Disord*. 2015. V. 14. P. 49.
23. Jackson CL, Bolen S, Brancati FL, Batts-Turner ML, Gary TL. A systematic review of interactive computer-assisted technology in diabetes care: interactive information technology in diabetes care. *J Gen Intern Med*. 2006. V. 21. №2. P.105–110.
24. Saenz A, Brito M, Moron I, Torralba A, Garcia-Sanz E, Redondo J. Development and validation of a computer application to aid the physician's decision-making process at the start of and during treatment with insulin in type 2 diabetes: a randomized and controlled trial. *J Diabetes Sci Technol*. 2012. V.6 (3). P. 581–8.

25. Тронько Н.Д., Халангот Н.Д. Использование компьютерных систем и информационных технологий в практической диабетологии. *Эндокринология*. 2001. №1. С.89–94.
26. Marcolino MS, Maia JX, Alkmim MBM, Boersma E, Ribeiro AL. Telemedicine application in the care of diabetes patients: systematic review and meta-analysis. *Plos One*. 2013. V. 8(11). e79246.
27. Adaji A., Schattner P., Jones K. The use of information technology to enhance diabetes management in primary care: a literature review. *Informatics in Primary Care*. 2008. №16. P. 229–37.
28. Siriwardena LSAN, Sudarshana Wickramasinghe WA, Dussantha Perera KL, Marasinghe RB, Katulanda P, Hewapathirana R. A review of telemedicine interventions in diabetes care. *J Telemed Telecare*. 2012. №18. P. 164–8.
29. Честнов. О.П., Бойцов С.А., Куликов А.А., Батулин Д.И. Мобильное здравоохранение: мировой опыт и перспективы. *Профилактическая медицина*. 2014. №17(4). С 3–9.
30. Bree Holtz, Carolyn Lauckner. Diabetes management via mobile phones: a systematic review. *Telemedicine and e-Health*. 2012 .V. 18. № 3. P. 175–185.
31. Faraz S. Ahmad, Thomas Tsang. Diabetes Prevention, Health Information Technology, and Meaningful Use. *American Journal of Preventive Medicine*. 2013. V. 44. №4. S357–S363.
32. Pradeepa R, Prabu AV, Jebarani S, Subhashini S, Mohan V. Use of a large diabetes electronic medical record system in India: clinical and research applications. *J Diabetes Sci Technol* .2011. №5(3). P.543–52.
33. World Health Organization.(2011).Use of glycated haemoglobin (HbA1c) in diagnosis of diabetes mellitus: abbreviated report of a WHO consultation.World Health Organization. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/70523>
34. Лавренюк Н.В., Кифоренко С.И., Котова А.Б., Иваськива Е.Ю. Информационно-компьютерная поддержка принятия решений при ранней диагностике сахарного диабета. *Кибернетика и вычисл. техника*. 2009. Вып.157. С. 54–60.
35. Тронько М.Д., Єфімов А.С., Кравченко В.Ш. Рання діагностика цукрового діабету та його ускладнень. Лікар-інфо: портал про здоров'я. 2003. URL: <http://www.likarsnfo.pro/43480/>.
36. Ефимов А.С., Карабун П., Эпштейн Е.В. Ожирение и сахарный диабет. Киев: Здоровье, 1987. 144 с.
37. Ефимов А.С., Орленко В.Л., Соколова Л.К. Сахарный диабет и его осложнения. *Журн. практ. лікаря*. 2003. №2. С.34–40.
38. Принципы автоматического управления, их преимущества и недостатки. URL: <https://studfiles.net/preview/4634773/page:13/>.
39. Turksoy K., Cinar A. Adaptive control of artificial pancreas systems - a review. *J Healthc Eng*. 2014. V. 5(1). P. 1–22.
40. Cobelli C., Renard E., Kovachev BP. Artificial pancreas : past, present, future. *Diabetes*. 2011. V. 60. P. 2672–82.
41. Лебедева О., Лебедев И. Считалка калорий. URL: <http://calories.ru/cgi-bin/calc.pl>.
42. Кадомский Ю. Азбука диабета. Точечная интенсивная инсулиноterapia инсулинозависимого сахарного диабета. 2018. 129 с. URL: <http://www.juri.dia-club.ru>.
43. Школа диабета. Научись управлять диабетом. URL: <https://shkoladiabeta.ru/>.
44. Про затвердження Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії. Наказ 03.09.2017 № 1073 Міністерства охорони здоров'я України. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17>.

Отримано: 19.06.2019

*С.І. Кіфоренко*¹, д-р біол. наук, старш. наук. співроб.,
пров. наук. співроб. відд. застосування математичних і технічних
методів у біології та медицині

email: skifor@ukr.net

*Т.М. Гонтар*¹, канд. біол. наук, старш.наук. співроб.,
старш.наук. співроб. відд. застосування математичних
і технічних методів у біології та медицині

email: gtm_kiev@ukr.net

*В.Л. Орленко*², канд. мед. наук, старш.наук. співроб.,
зав. науково-консультативного відділу
амбулаторно-профілактичної допомоги хворим
з ендокринною патологією

email: orleva@ukr.net

*К.Ю. Іваськіва*², канд. мед. наук, старш. наук. співроб.,
науково-консультативний відділ
амбулаторно-профілактичної допомоги

хворим з ендокринною патологією

email: k_iva@ukr.net

*Т.А. Обелець*¹, молодш. наук. співроб.,
відд. застосування математичних і технічних
методів у біології та медицині

email: gtm_kiev@ukr.net

¹ Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних
технологій та систем НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

² Інститут ендокринології та обміну речовин
ім. В.П. Комісаренка НАМН України,
вул. Вишгородська, 69. М. Київ, 04114 Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДТРИМКИ САМОКОНТРОЛЮ У ФОРМУВАННІ РАЦІОНАЛЬНОЇ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ У ПАЦІЄНТІВ ХВОРИХ НА ДІАБЕТ

Вступ. Цукровий діабет — небезпечне, поширене хронічне ендокринне захворювання, в основі якого лежить розлад обміну речовин, пов'язаний, в першу чергу, з порушенням вуглеводного обміну. Забезпечення необхідності самостійного контролю за станом здоров'я хворих на діабет є нагальною проблемою сьогодення. Використання засобів інформаційних технологій та мобільної медицини уможливило підвищення ефективності самоконтролю пацієнтом стану свого здоров'я.

Метою статті є розроблення комплексної інформаційної технології для підвищення ефективності глікемічного самоконтролю у разі діабету на різних етапах лікувального процесу.

Результати. Запропоновано алгоритм визначення стану системи регуляції глікемії, в основу якого покладено аналіз результатів глюкозотолерантного тесту. Результатом є розширена класифікаційна шкала регуляції глікемії — норма, зона ризику, порушена толерантність (латентна форма), діабет, що підвищує роздільну здатність стандартної методики і дає змогу своєчасно проводити заходи щодо застосування профілактичних дій для запобігання прояву реальних порушень в системі регуляції глікемії. Алгоритм програмно реалізовано у трьох варіантах: для комп'ютерів, планшетів і для мобільних пристроїв під ОС Андроїд. Розроблена інформаційна технологія підтримки прийняття рішень у виборі адекватного режиму активності та харчування хворих на діабет забезпечує визначення дисбалансу між енергією, яка поступає в організм разом з вибраним користувачем меню (набором продуктів і блюд) і енергією, яка витрачається за різних видів запланованої діяльності (фізичної, інтелектуальної тощо).

Висновки. Використання у розробленій технології принципу зовнішнього комбінованого регулювання, який поєднує позитивні якості керування за збуренням і керування зі зворотним зв'язком за відхиленням, забезпечило можливість підвищити ефек-

тивність самоконтролю пацієнтом стану свого здоров'я. Реалізація технології у трьох модифікаціях: для стаціонарних комп'ютерів, планшетів і для мобільних пристроїв під ОС Андроїд дає змогу зробити доступнішою інформаційну допомогу користувачеві з різним ступенем порушення регуляції вуглеводного обміну: на етапі доклінічної допомоги та на етапі лікування.

Ключові слова: інформаційна технологія, цукровий діабет, самоконтроль стану здоров'я пацієнтом, принципи керування, мобільні пристрої.

С.И. Скифоренко¹, д-р биол. наук, старш. науч. сотр.,
вед. науч. сотр. отд. применения математических
и технических методов в биологии и медицине
email: skifor@ukr.net

Т.М. Гонтарь¹, канд. биол. наук, старш. науч. сотр.
отд. применения математических и технических
методов в биологии и медицине
email: gtm_kiev@ukr.net

В.Л. Орленко², канд. мед. наук, старш. науч. сотр.,
зав. научно-консультативного отдела
амбулаторно-профилактической помощи
пациентам с эндокринной патологией
email: orleva@ukr.net

К.Ю. Иваськива², канд. мед. наук, старш. науч. сотр.,
научно-консультативный отд. амбулаторно-профилактической
помощи пациентам с эндокринной патологией
email: k_iva@ukr.net

Т.А. Обелець¹, младш. науч. сотр.,
отд. применения математических и технических методов
в биологии и медицине
email: gtm_kiev@ukr.net

¹ Международный научно-учебный центр информационных
технологий и систем НАН Украины и МОН Украины,
пр. Акад. Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина

² Институт эндокринологии и обмена веществ
им. В.П. Комиссаренко НАМН Украины,
ул. Вышгородская, 69, г. Киев, 04114 Украина

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ САМОКОНТРОЛЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАЦИОНАЛЬНОГО ОБРАЗА ЖИЗНИ ДЛЯ БОЛЬНЫХ ДИАБЕТОМ

Предложен алгоритм определения состояния системы регуляции гликемии, в основу которого положен анализ результатов глюкозотолерантного теста. Результатом является расширенная классификационная шкала регуляции гликемии — норма, зона риска, нарушенная толерантность (латентная форма), диабет — что повышает разрешающую способность стандартной методики и позволяет своевременно проводить мероприятия по применению профилактических действий для предотвращения проявления реальных нарушений в системе регуляции гликемии. Алгоритм программно реализован в трех вариантах: для компьютеров, планшетов и для мобильных устройств под ОС Андроид.

Разработанная информационная технология поддержки принятия решений в выборе адекватного режима активности и питания больных диабетом дает возможность определить дисбаланс между энергией, поступающей в организм вместе с выбранным пользователем меню (набором продуктов и блюд) и энергией, которая расходуется на различные виды запланированной деятельности (физической, интеллектуальной и т.д.).

Ключевые слова: информационная технология, сахарный диабет, самоконтроль состояния здоровья, принципы управления, мобильные приложения.

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

Цільова аудиторія- науковці, інженери, аспіранти і студенти вищих навчальних закладів відповідного фаху.

Вимоги до рукописів статей

1. Рукопис надають на папері у двох примірниках (мова – англійська, українська, російська, 17-22 с.) та електронна версія. До рукопису додають:

- анотації – українською та англійською мовами (прізвище, ініціали автора/ів, місце роботи, місто, країна, назва статті, текст 250 -300 слів, з виділенням рубрик: вступ, мета, результати, висновки, ключові слова), російською мовою (УДК, прізвище, ініціали автора/ів, назва статті, 7-9 рядків тексту, ключові слова (5-8 слів);
- список літератури на мові оригіналу - в порядку згадування в тексті, за стандартом ДСТУ 8302:2015;
- список літератури - переклад джерел англійською мовою, прізвища та ініціали авторів - транслітерація;
- ліцензійний договір;
- відомості про автора/ів українською, англійською та російською мовами повинні містити: ПІБ, вчений ступінь, наукове звання, посада, відділ, місце роботи, поштова адреса організації, телефон (для зв'язку редактора), E-mail, авторські ідентифікатори ORCID або ResearcherID.

2. Текст статті подається з обов'язковими рубриками: вступ, постановка завдання/проблеми, мета, результати, чітко сформульовані висновки.

Вимоги до текстового файлу

Формат файлу * .doc, * .rtf. Файл повинен бути підготовлений за допомоги текстового редактора Microsoft Word.

Використовувані стилі: шрифт Times New Roman, 12 пт, міжрядковий інтервал – 1,5. Формат паперу А4, всі береги - 2 см.

Формули набирають у редакторі формул Microsoft Equation Editor 3.0. Опції редактора формул - (10,5; 8,5; 7,5; 14; 10). **Ширина формул -до 12 см.**

Рисунки повинні бути якісними, створені вбудованим редактором рисунків Word Picture або іншими Windows-додатками (рисунки надають окремими файлами відповідних форматів). **Ширина рисунків - до 12 см.**

Таблиці виконують стандартним вбудованим у Word інструментарієм «Таблиця». **Ширина таблиці - до 12 см.**

Передплату на журнал (друкована версія) в Україні здійснюють:

- за «Каталогом видань України», індекс передплати друкованої версії - 86598;
- за допомоги передплатної агенції «Укрінформнаука» НАН України, ukrinform_nauka@gmail.com, індекс журналу – 10029