

Cybernetics and Computer Engineering

1 (195)/2019

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

CONTENTS

Informatics and Information Technologies

ГРИЦЕНКО В.І., ВОЛКОВ О.Є., КОМАР М.М., ШЕПЕТУХА Ю.М., ВОЛОШЕ-
НЮК Д.О. Інтегрально-адаптивний автопілот як засіб інтелектуалізації сучас-
ного безпілотного літального апарату 5

SUKHORUCHKINA O.N., PROGONNYI N.V. The Information Technology for
Remote and Virtual Practical Researches on Robotics 23

Intelligent Control and Systems

ЄФИМЕНКО М.В. Розв'язання задач керування рухом точки по сфері 36

MILIAVSKYI Yu.L. Identification in Cognitive Maps in Impulse Process Mode with
Incomplete Measurement of Nodes Coordinates 49

Medical and Biological Cybernetics

KAPLIN I.V., KOCHINA M.L., DEMIN Yu.A., FIRSOV O.H. The System of In-
traocular Pressure Assessment Using Interference Eye Pictures 64

CHERNYSHOVA T.A. Criteria and Method for Detection of Circulating Tumor Cells .. 82

To Attention of Authors 98

Cybernetics and Computer Engineering

1 (195)/2019

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

CONTENTS

Informatics and Information Technologies

- GRITSENKO V.I., VOLKOV O.Ye., KOMAR M.M., SHEPETUKHA Yu.M.,
VOLOSHENYUK D.O. Integral-Adaptive Autopilot as a Means of Intellectualizing
a Modern Unmanned Aerial Vehicle 5
- SUKHORUCHKINA O.N., PROGONNYI N.V. The Information Technology for
Remote and Virtual Practical Researches on Robotics 23

Intelligent Control and Systems

- YEFYMENKO M.V. Solution of the Problems of Controlling the Motion of a Point
on a Sphere 36
- MILIAVSKYI Yu.L. Identification in Cognitive Maps in Impulse Process Mode with
Incomplete Measurement of Nodes Coordinates 49

Medical and Biological Cybernetics

- KAPLIN I.V., KOCHINA M.L., DEMIN Yu.A., FIRSOV O.H. The System of Intraocular
Pressure Assessment Using Interference Eye Pictures 64
- CHERNYSHOVA T.A. Criteria and Method for Detection of Circulating Tumor Cells .. 82
- To Attention of Authors** 98
-

Кібернетика 1 (195)/2019 та обчислювальна техніка

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

ЗМІСТ

Інформатика та інформаційні технології

ГРИЦЕНКО В.І., ВОЛКОВ О.Є., КОМАР М.М., ШЕПЕТУХА Ю.М., ВОЛОШЕ-
НЮК Д.О. Інтегрально-адаптивний автопілот як засіб інтелектуалізації сучас-
ного безпілотного літального апарату 5

СУХОРУЧКІНА О.М., ПРОГОННИЙ М.В. Інформаційна технологія для
дистанційних та віртуальних практичних досліджень з робототехніки 23

Інтелектуальне керування та системи

ЄФИМЕНКО М.В. Розв'язання задач керування рухом точки по сфері 36

МІЛЯВСЬКИЙ Ю.Л. Ідентифікація в когнітивних картах у режимі імпульсних
процесів за умови неповного вимірювання координат вершин 49

Медична та біологічна кібернетика

КАПЛІН І.В. КОЧИНА М.Л., ДЬОМІН Ю.А., ФІРСОВ О.Г. Система оцінювання
рівня внутрішньоочного тиску за інтерференційними картинками ока 64

ЧЕРНИШОВА Т.А. Критерії та метод виявлення циркулюючих пухлинних
клітин 82

До уваги авторів 98

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

Информатика и информационные технологии

DOI: [https:// 10.15407/kvt195.01.005](https://10.15407/kvt195.01.005).

УДК 681.513

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

ВОЛКОВ О.Є., в.о. завідувача відділу,
відд. інтелектуального управління
e-mail: alexvolk@ukr.net

КОМАР М.М., наук. співроб.,
відд. інтелектуального управління
e-mail: nickkomar08@gmail.com

ШЕПЕТУХА Ю.М., канд. техн. наук,
пров. наук. співроб.,
відд. інтелектуального управління
e-mail: dep185@irtc.org

ВОЛОШЕНЮК Д.О., наук. співроб.,
відд. інтелектуального управління
e-mail: dep185@irtc.org
Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова 40, м. Київ, 03187, Україна

ІНТЕГРАЛЬНО-АДАПТИВНИЙ АВТОПІЛОТ ЯК ЗАСІБ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ СУЧАСНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ПІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

***Вступ.** Сучасні безпілотні літальні апарати (БпЛА) успішно використовують в різних галузях під час виконання науково-технічних, економічних, військових і ряду інших місій. Ефективність функціонування БпЛА визначається бортовим комплектом апаратних засобів та програмного забезпечення системи керування БпЛА. Процес удосконалення наявних систем керування має на меті розширення спектру завдань, які розв'язуються за допомоги БпЛА без безпосереднього залучення людини та запровадження додаткових інтелектуальних функцій в роботу автopilота.*

***Метою дослідження** є створення нового методу інтелектуального керування БпЛА та його впровадження на прикладі розробленого інтегрально-адаптивного автopilота БпЛА.*

© ГРИЦЕНКО В.І., ВОЛКОВ О.Є., КОМАР М.М., ШЕПЕТУХА Ю.М., ВОЛОШЕНЮК Д.О. 2019

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). Cyb. and comp. eng. 2019. № 1 (195)

Результати. В роботі досліджено алгоритми керування, які використовують в автопілотах сучасних безпілотних літальних апаратів, а також розглянуто питання створення та застосування нових інтелектуальних методів і систем автоматичного пілотування безпілотного літального апарату. Запропоновано інтегрально-адаптивний автопілот для реалізації складного просторового маневрування безпілотного літального апарату. Описано підхід до розв'язання завдання керування безпілотним літальним апаратом у класі віртуальних стратегій з використанням віртуального керування, що дає можливість досліджувати об'єкт керування комплексно без спрощень і лінеаризації системи рівнянь, які його описують.

Висновки. Використання методу, запропонованого в статті, дає змогу створювати адаптивні автопілоти для виконання складних просторових маневрувань безпілотного літального апарату, динаміка руху якого описується повними нелінійними системами рівнянь.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, система керування, віртуальне керування, адаптація, інваріантність.

ВСТУП

Сьогодні безпілотні літальні апарати (БПЛА) успішно застосовують в різних галузях під час розв'язання науково-технічних, економічних, сільсько-господарських та військових завдань. Ефективність функціонування БПЛА багато в чому визначається їхніми бортовими комплексами апаратних і програмних засобів керування. Одним з таких засобів є автопілот БПЛА. Він, зазвичай, реалізується інтегрованою авіонікою з використанням єдиної обчислювальної платформи. Сучасний шлях розвитку бортових обчислювальних платформ передбачає імплементацію алгоритмів керування за допомоги програмних модулів, написаними мовами програмування високого рівня. До апаратної частини автопілотів БПЛА висуваються вимоги щодо обчислювальної потужності, яка повинна бути достатньою для реалізації алгоритмів керування [1–3].

Серед багатьох завдань, які ставлять перед автопілотами БПЛА, можна виокремити ряд таких, що стосуються розв'язання завдань цієї статті:

- забезпечення автономного польоту БПЛА за певним набором заданих точок і цільових зон простору в автоматичному режимі без втручання оператора;
- стабілізація заданих значень параметрів літального апарату і його енергетичних характеристик;
- визначення відхилення фактичної траєкторії польоту БПЛА від програмної і формування команд керування для корекції фактичної траєкторії БПЛА;
- відпрацювання командних значень параметрів положення і орієнтації БПЛА в просторі на всіх етапах польоту;
- забезпечення необхідної динамічної точності керування в широкому діапазоні змін параметрів літального апарату.

Процес вдосконалення наявних систем автопілотування спрямовано на внесення інтелектуальних функцій в роботу автопілоту, в тому числі на розроблення нових методів керування з метою розширення спектру розв'язуваних БПЛА завдань без прямої участі оператора.

Метою статті є створення нового методу інтелектуального керування БПЛА та його впровадження на прикладі розробленого інтегрально-адаптивного автопілоту БПЛА.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний розвиток інформаційних технологій дає змогу використовувати складні алгоритми керування навіть у відносно недорогих за вартістю автопілотах БпЛА. Сьогодні розроблено велику кількість автопілотів різного типу і призначення, які істотно різняться між собою як за вартістю, так і за структурою алгоритмів, що в них використовуються [4]. В ряді випадків поширені автопілоти позиціонують на ринку як універсальний засіб керування широкою номенклатурою БпЛА різного типу. Слід зазначити, що такі автопілоти в деяких випадках можуть бути недостатньо ефективними, бо вони не враховують в повному обсязі конструктивні особливості конкретного БпЛА, а також істотну нелінійність характеристик БпЛА під час глибокого маневрування.

Тому подальший розвиток алгоритмів автопілотів БпЛА проводять з метою забезпечення якісного польоту за умов суттєвої невизначеності, складних обмежень та наближенню функціонування автопілоту БпЛА до поведінки кваліфікованого оператора.

Традиційні автопілоти БпЛА основані на використанні пропорційно-інтегральних-диференціальних (ПІД) регуляторів. Перспективні автопілоти, в свою чергу, ґрунтуються на таких підходах, як адаптивні нейронні мережі, оптимізаційні методи, нечітка логіка тощо [5]. Для проведення аналізу сучасних автопілотів БпЛА та виявлення особливостей їх функціонування на різних режимах нижче розглянемо деякі з наявних підходів до керування БпЛА.

Підхід до керування БпЛА на основі ПІД-регуляторів. У роботі [6] для керування стабілізацією кутів орієнтації і висотою польоту БпЛА використовують пропорційно-інтегральний каскад (ПІ-каскад), застосований до кожної з осей обертання (крен, тангаж, ристання) (рис. 1, де α_{act} , α_{des} — поточний та бажаний кути орієнтації БпЛА; α_{err} — помилка кута орієнтації; Ω_{act} , Ω_{des} — поточна та бажана кутова швидкість обертання навколо осі; Ω_{err} — похибка кутової швидкості обертання навколо осі; Out — вихідний сигнал на органи керування БпЛА; П — пропорційна складова, І — інтегральна складова).

Автопілоти, побудовані на ПІД-регуляторах, мають ряд таких переваг:

- легкість конструювання регуляторів;
- проста структура алгоритмів керування і відносно нескладний розрахунок коефіцієнтів регулятора, що зумовлює знижені вимоги до обчислювальних ресурсів.

Водночас такі автопілоти мають недоліки:

- зміна характеристик об'єкту керування призводить до необхідності переналаштування параметрів ПІД-регулятора;
- поширені методи налаштувань регуляторів (наприклад, інтуїтивне налаштування, характеристичний та аналітичний методи) не можуть забезпечити високу якість керування через неможливість динамічної зміни параметрів регулятора;
- розрахунок і налаштування коефіцієнтів автопілоту потребують значного коригування на ранніх стадіях випробувань і експлуатації.

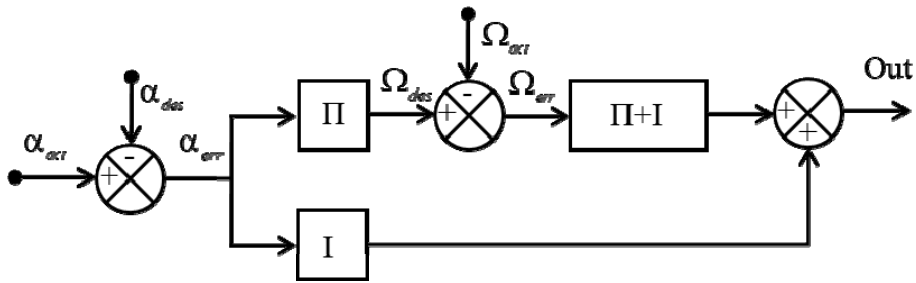


Рис. 1. Схема ПІ-каскаду керування стабілізацією кутів орієнтації

Так, результати комп'ютерного моделювання в роботі [6] показали, що автопілот, оснований на традиційних ПІД-регуляторах, не виключає наявності помилки керування від збурювального впливу і не дає змогу забезпечити необхідну динамічну точність керування кутом орієнтації у разі зміни режимів польоту і зовнішніх умов.

Отже, застосування в автопілотах БПЛА виключно ПІД-регуляторів обмежує надійність і точність таких систем керування. Тому є необхідним доповнення таких автопілотів складнішими стратегіями керування, які компенсують недоліки, притаманні ПІД-регуляторам.

Підхід до керування БПЛА на основі нейронних мереж. Автопілот БПЛА на основі адаптивного нейронно-мережевого контролера не вимагає точної математичної моделі, що є явною перевагою такого автопілота. Це дає змогу застосовувати ці підходи для керування польотом багатоцільових БПЛА [7]. Приклад такого автопілота для керування БПЛА запропоновано в роботі [8]. Синтез відповідного контролера виконано з поділом на внутрішній і зовнішній контури керування (рис. 2: x , p , δ , v , — вектори стану, положення, керування (відхилення керуючих поверхонь) та псевдокерування БПЛА відповідно; a , α — прискорення та кутове прискорення; q — кватерніон; ω — кутова швидкість. Нижні індекси: h — обмеження; c , des , ad — командний, бажаний та адаптивний сигнали; m — момент; f — сила). Внутрішній контур керує орієнтацією БПЛА за рахунок зміни моментів, які діють на БПЛА, у разі відхилення кермових поверхонь. Зовнішній контур керує силами, які діють на БПЛА, шляхом зміни величини тяги і орієнтації БПЛА.

Параметричну невизначеність, яка виникає в процесі керування БПЛА, мінімізують за допомоги адаптивного елементу. В якості адаптивного елементу в [8] використовують нейронну мережу — перцептрон з одним прихованим шаром, який є універсальним апроксиматором.

З недоліків, властивих системам такого типу, слід виокремити такі:

- складність структури алгоритмів;
- можливість виникнення небажаної адаптації до вхідних характеристик об'єкта керування;
- великий час навчання нейромережі для досягнення високої точності керування;
- зменшення точності керування за виникнення випадкових збурень.

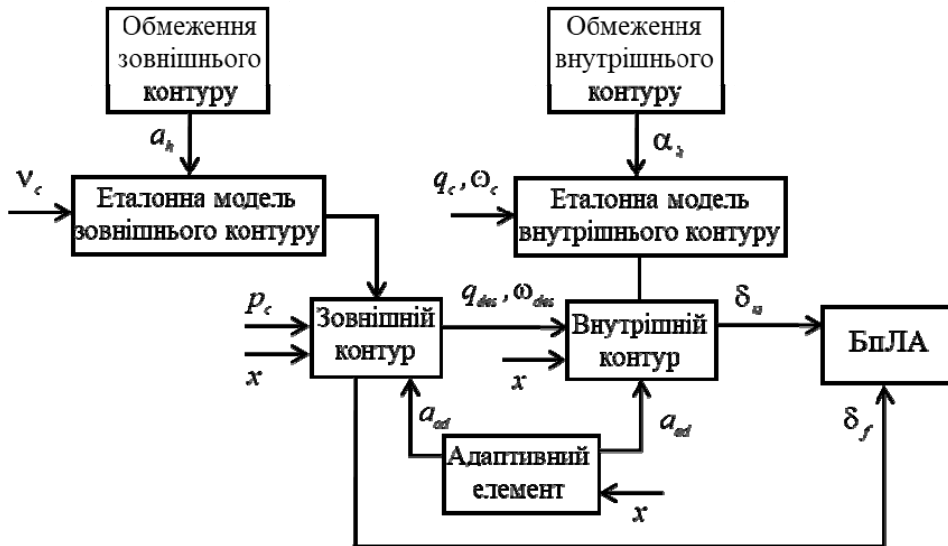


Рис. 2. Внутрішній і зовнішній контури автопілоту з адаптацією

Підхід до керування БПЛА на основі оптимізаційних методів. У роботах [9, 10] запропоновано архітектуру керування внутрішнім і зовнішнім контурами автопілоту БПЛА. Автопілот реалізують з використанням H_∞ -контролера (в рамках H_∞ -теорії формують задачі стеження, компенсації, оптимального наближення до заданих еталонів в частотній області, мінімаксі аналоги класичних лінійно-квадратичних задач). Автопілот складається з двох контурів (рис. 3). Завданням внутрішнього контуру є керування кутами тангажу, крену, ристання, а також тягою двигуна. Контролер внутрішнього контуру слугує для забезпечення робастності до параметричної невизначеності.

Два контролери входять до складу зовнішнього контуру, який відстежує характеристики еталонної моделі: контролер висоти і курсу. Обидва контролери використовують оптимізаційний метод.

З результатів моделювання, які наводять автори роботи [10], випливає, що застосування H_∞ -контролера не забезпечує керування БПЛА з необхідними показниками стійкості і якості.

Оптимізаційні методи мають такі переваги:

- зручність інженерної інтерпретації алгоритмів за їхньої відносної простоти;
- висока якість керування у випадках обмеженої невизначеності характеристик об'єкту керування;
- легкість використання методів для синтезу одномірних систем автоматичного керування.

Недоліки, властиві оптимізаційним методам:

- висувають високі вимоги до якості, повноти і точності еталонних математичних моделей об'єкта керування;
- оптимізація вимагає значних обчислювальних ресурсів і часу;
- застосування оптимізаційних методів у разі керування БПЛА з використанням спрощеної лінеаризованої моделі об'єкта керування викликає параметричну невизначеність.

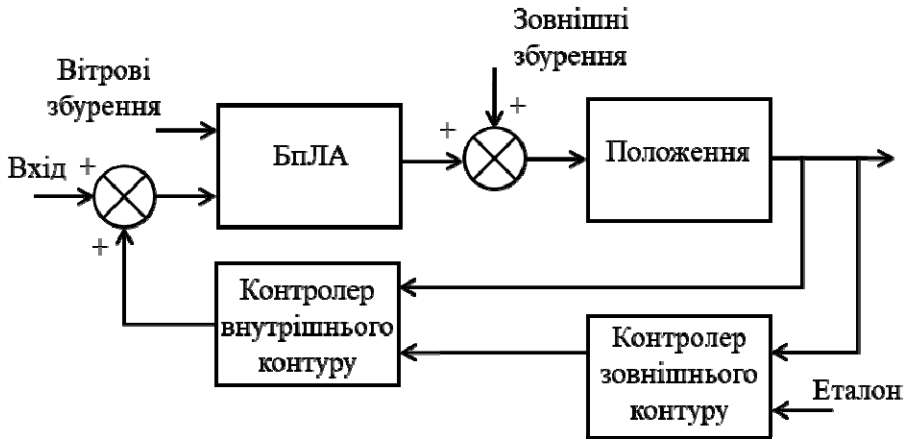


Рис. 3. Архітектура автопілоту БПЛА на основі оптимізаційного методу

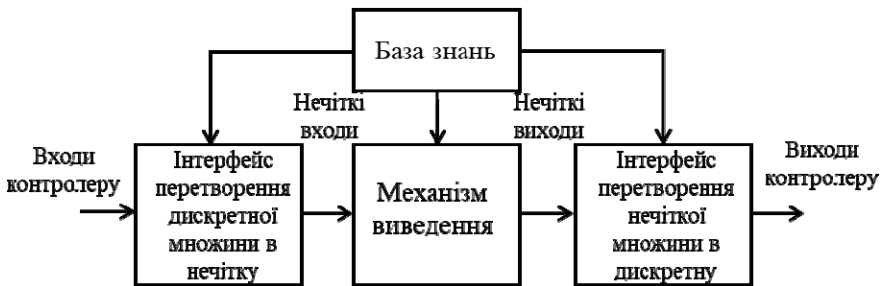


Рис. 4. Базова структура системи керування з нечіткою логікою

Підхід до керування БПЛА на основі методів нечіткої логіки. Системи керування з нечіткою логікою можуть використовуватися в багатьох галузях, включаючи керування польотом БПЛА. У значній кількості робіт йдеться про застосування в автопілотах контролерів на основі нечіткої логіки [5, 11]. Класична структура системи керування з нечіткою логікою складається з чотирьох основних компонентів: бази знань, інтерфейсу перетворення дискретної множини в нечітку, механізму виведення і інтерфейсу перетворення нечіткої множини в дискретну (рис. 4).

Приклад синтезу автопілоту БПЛА із застосуванням нечіткої логіки наведено в [12]. Цей автопілот складається з трьох контролерів на основі нечіткої логіки (один контролер використовують для керування бічним рухом БПЛА, два контролери — для керування поперечним рухом). Для підвищення точності керування в автопілот додано блок керування швидкістю і блок компенсації збурень, викликаних поривами вітру (рис. 5).

За результатами моделювання, наведеними в [12], видно, що за наявності збурень БПЛА не завжди виходить у задану точку маршруту, що призводить до викривлення траєкторії і появи зайвих маневрів. Також з'являються неточності в дотриманні заданої висоти польоту.

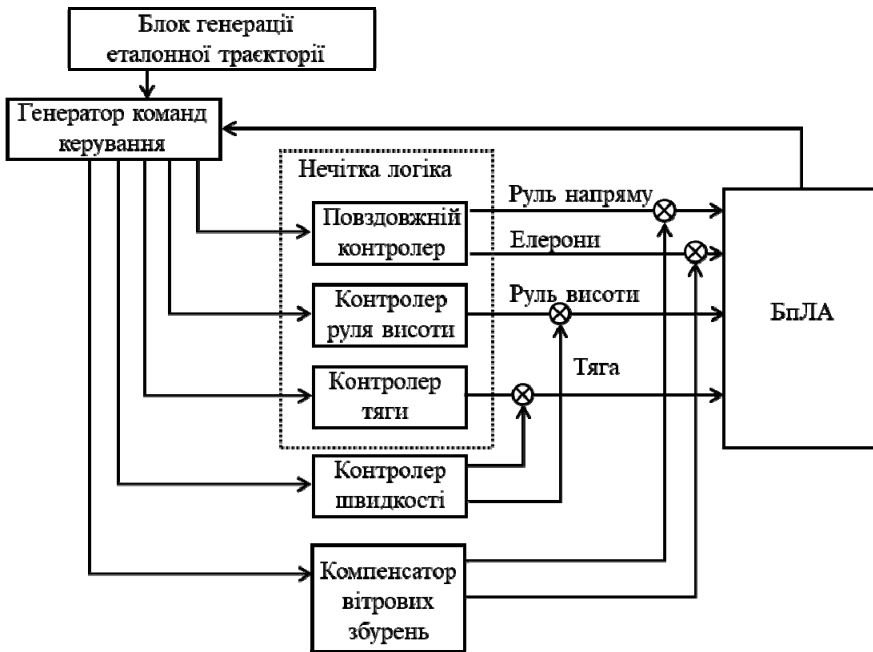


Рис. 5. Блок-схема системи автопілота із застосуванням нечіткої логіки

Переваги автопілотів, побудованих з використанням нечіткої логіки:

- значне скорочення обсягу обчислень;
- висока швидкодія;
- застосування нечіткого керування може бути найефективнішим в тих випадках, коли відсутня явна модель процесу або аналітична модель є занадто складною для подання або отримання розв'язку в реальному масштабі часу.

Загальними недоліками систем керування, основаних на методах нечіткої логіки, є:

- складність проектування таких систем;
- жорсткі вимоги до бази правил для реалізованої системи з використанням нечіткої логіки.

ВИОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНОЇ ЧАСТИНИ ПРОБЛЕМИ

Зі сказаного вище випливає, що автопілоти безпілотних літальних апаратів, побудовані на основі перерахованих підходів, можуть мати обмежені функціональні можливості під впливом комбінацій несприятливих чинників. Наприклад у ситуації, коли політ БПЛА протікає у збуреній атмосфері, а керування по всіх каналах автопілота здійснюють за одним принципом. Використання наявних методів керування без додаткових заходів щодо поліпшення якості їх роботи та внесення елементів інтелектуалізації не дає необхідної точності і автономності керування. Особливо це стосується ускладнень, які виникають під час виконання активних маневрів зі значними змінами висоти та швидкості польоту. Це відбувається з таких причин:

- високі динамічні властивості БпЛА;
- короткий час перехідних процесів, які протікають в системі керування БпЛА;
- велика кількість перехресних зв'язків між каналами керування.

Відповідно, можна зробити висновок про необхідність розроблення нового методу ефективного керування безпілотними літальними апаратами різного призначення в різноманітних і непередбачуваних умовах їх застосування. Для досягнення цієї мети необхідно удосконалення наявних і створення нових підходів, технологій і методів керування БпЛА, зокрема інтелектуальних. Водночас нові підходи і методи повинні мати здатність адаптації як до можливих змін у зовнішньому середовищі, так і до модифікації характеристик об'єкта керування.

Інтегрально-адаптивний автопілот безпілотного літального апарату. Магістральним напрямом розвитку інформаційних технологій є підвищення рівня їх інтелектуалізації, тобто створення інтелектуальних інформаційних систем.

Системи інтелектуального керування є особливим класом інтелектуальних інформаційних систем. Розроблення в цій галузі спрямовано на створення концепцій, технологій, методів і моделей для високоточного керування динамічними об'єктами в динамічному середовищі (інакше кажучи, складними і мінливими об'єктами в складному і мінливому середовищі) за умов збереження необхідних показників якості, швидкодії і стійкості керування.

Основні особливості систем інтелектуального керування [13, 14]:

- термін «керування» за інтелектуального керування має загальніше значення, ніж за традиційного керування, тобто включає процеси діагностики ситуації, планування дій, прийняття рішень тощо;
- здатність до автономного формулювання своїх цілей і автономних дій;
- можливість ефективних дій за умов невизначеності та складних обмежень;
- наявність істотно нелінійних об'єктів керування;
- здатність швидкої та якісної адаптації до змін, по-перше, зовнішніх умов, по-друге, характеристик об'єкта керування і, по-третє, параметрів і/або структури самої інтелектуальної системи.

Для усунення недоліків вищеперерахованих підходів, які використовують в автопілотах БпЛА, запропоновано новий метод інтелектуалізації БпЛА та застосування розроблених на його основі алгоритмів для створення інтегрально-адаптивного автопілоту. Створений автопілот дає змогу:

- забезпечити генерацію інтегрально-адаптивних команд керування по всіх каналах та досягти підвищення якості і стійкості керування;
- реалізовувати складні просторові траєкторії польоту з великими змінами висоти та швидкості, а також за наявності істотно криволінійних ділянок глибокого маневрування у вертикальній і горизонтальній площинах;
- компенсувати перехресні зв'язки та взаємний вплив поміж каналами керування;
- діяти за умов обмеження доступу інформації та невизначеності;
- досягти підвищення точності керування БпЛА у разі зовнішніх збурень.

Під час розроблення інтегрально-адаптивного автопілоту в якості одного з методів підвищення інтелектуалізації традиційного керування БпЛА на основі ПД-регуляторів використано метод віртуального керування [15].

Віртуальне керування включає етапи постановки та розв'язання завдання синтезу віртуального об'єкта керування, еквівалентного реальному нелінійному об'єкту (в нашому випадку — БпЛА). Для такого нелінійного об'єкта синтез законів керування аналітичним методом має значні труднощі. Віртуальне керування дає змогу досліджувати об'єкт керування комплексно, без спрощень і лінеаризації системи рівнянь, які його описують [16].

Віртуальне керування передбачає розв'язання завдання в два етапи.

Перший етап — на основі початкового реального об'єкта синтезувати віртуальний об'єкт з інваріантною та автономною організацією керування, його віртуальну область станів і віртуальну область керування.

Другий етап — за віртуальним об'єктом і віртуальним керуванням синтезувати реальне керування реальним об'єктом.

Віртуальне керування дає змогу синтезувати віртуальний об'єкт і знайти області можливого керування віртуальним об'єктом, що, в свою чергу, надає можливість розв'язати завдання синтезу керування реальним об'єктом на основі віртуального керування. Система диференціальних рівнянь, яка описує віртуальний об'єкт, має в порівнянні з початковою системою рівнянь, які описують реальний об'єкт, надлишкові розв'язки, а розв'язок кінцевої системи рівнянь одночасно є розв'язком і початкової системи. Тому забезпечення умов інваріантності і автономності для всієї сукупності розв'язків кінцевої системи автоматично забезпечить інваріантність і автономність для розв'язків початкової системи рівнянь. Отже, застосування віртуального керування дає змогу розглядати повні нелінійні моделі об'єктів для подальшого розроблення принципово нових нелінійних регуляторів, які забезпечать стійкість об'єктів керування, а також інваріантність до зовнішніх збурень.

Розглянемо детальніше принцип роботи розробленого *інтегрально-адаптивного автопілоту керування просторовим маневруванням БпЛА* (рис. 6).

Для реалізації керування БпЛА в класі віртуальних стратегій було вибрано структуру інтегрально-адаптивного автопілоту, яка містить: генератор заданих параметрів керування, модуль формування похибки за креном, модуль формування похибки за тангажем, сенсорний модуль, модуль обчислення координованого розвороту, модуль формування динаміки віртуального керування креном, модуль формування динаміки віртуального керування тангажем, модуль формування динаміки віртуального керування тангажем, модуль зберігання та апроксимації аеродинамічних даних, лінійний обчислювальний модуль та нелінійний обчислювальний модуль (рис. 6).

Рух БпЛА розглядають у зв'язаній системі координат $OXYZ$, початок координат якої розташовано в центрі мас БпЛА, вісь OX лежить в площині симетрії і спрямована до носової частини БпЛА, вісь OY лежить в площині симетрії БпЛА і спрямована вгору (у разі горизонтального польоту), а вісь OZ доповнює систему до правої системи координат.

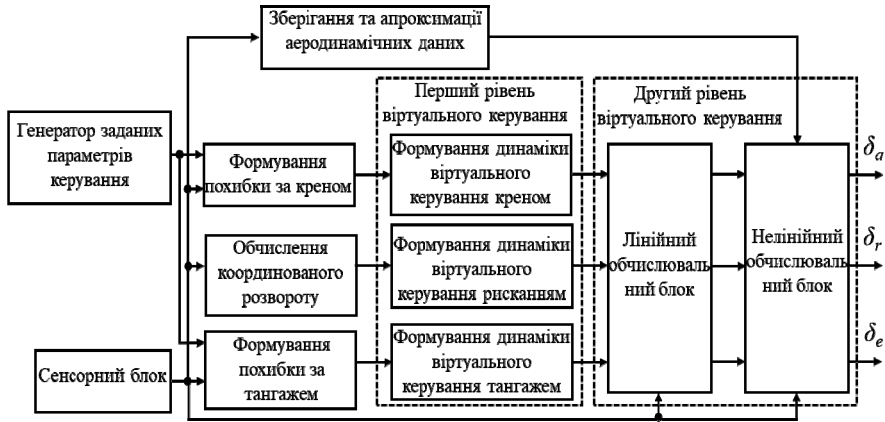


Рис. 6. Структурна схема інтегрально-адаптивного автопілоту БпЛА

Генератор заданих параметрів керування циклічно генерує часову послідовність командних сигналів крену γ_{cmd} та тангажу ϑ_{cmd} для забезпечення цільового просторового маневрування у горизонтальній та вертикальній площинах відповідно.

Сенсорний модуль формує сигнали поточного стану БпЛА. Ці сигнали надходять від набору давачів, які виробляють сигнали кута крену γ , ристання ψ і тангажу ϑ , температури повітря T , барометричного тиску B , повітряної швидкості V , перевантажень n_x, n_y, n_z , а також кутових швидкостей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$.

Похибки за креном та за тангажем визначають за рівняннями:

$$\Delta\gamma = \gamma_{cmd} - \gamma;$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{cmd} - \vartheta.$$

Модуль обчислення координованого розвороту генерує сигнали помилки кутової швидкості координованого розвороту $\Delta\omega_y$ та бокового перевантаження Δn_z :

$$\Delta\omega_y = K_{RY} \frac{g}{V} \sin\gamma - \omega_y;$$

$$\Delta n_z = K_n n_z,$$

де g — прискорення вільного падіння; n_z — поточне значення бічного перевантаження; K_{RY}, K_n — передавальні числа координованого розвороту та бічного перевантаження відповідно.

Модулі формування динаміки віртуального керування креном, ристанням та тангажем сукупно складають перший рівень віртуального керування просторовим маневруванням БпЛА. Ці модулі задають подання багатовимірної системи керування у вигляді сукупності незалежних одновимірних автономних систем керування:

$$\begin{aligned} \ddot{\gamma} &= p_{\gamma}; \\ \ddot{\psi} &= p_{\psi}; \\ \ddot{\vartheta} &= p_{\vartheta}, \end{aligned} \tag{1}$$

де p_{γ} , p_{ψ} , p_{ϑ} — командні сигнали віртуального керування креном, рисканням та тангажем.

Для системи рівнянь (1) можуть застосовуватися всі методи проектування, розроблені для одновимірних систем. Наприклад, методи побудови пропорційно-інтегрально-диференційних регуляторів, методи побудови оптимальних за швидкістю регуляторів та інші. За допомоги доповнення алгоритмів керування з використанням ПД-регуляторів віртуальним керуванням вдається досягти вищої якості керування. Командні сигнали віртуального керування креном p_{γ} , рисканням p_{ψ} та тангажем p_{ϑ} розраховують за формулами:

$$\begin{aligned} p_{\gamma} &= (K_{\gamma} + \frac{1}{pTi_{\gamma}} + pTd_{\gamma})\Delta\gamma; \\ p_{\vartheta} &= (K_{\vartheta} + \frac{1}{pTi_{\vartheta}} + pTd_{\vartheta})\Delta\vartheta; \\ p_{\psi} &= (K_{\omega_y} + \frac{1}{pTi_{\omega_y}} pTi_{\omega_y} + pTd_{\omega_y})\Delta\omega_y + \\ &+ (K_{n_z} + \frac{1}{pTi_{n_z}} pTi_{n_z} + pTdn_z)\Delta n_z, \end{aligned}$$

де $p = \frac{d}{dt}$ — оператор диференціювання за часом; K_{γ} , Td_{γ} , Ti_{γ} — передавальні числа відповідно пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі крену; K_{ϑ} , Td_{ϑ} , Ti_{ϑ} — передавальні числа відповідно пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі тангажу; K_{ω_y} , Td_{ω_y} , Ti_{ω_y} — передавальні числа відповідно пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі рискання та помилки кутової швидкості координованого розвороту $\Delta\omega_y$; K_{n_z} , Tdn_z , Ti_{n_z} — передавальні числа відповідно пропорційної ланки, демпфера і інтегратора ПД-регулятора в каналі рискання та помилки бокового перевантаження Δn_z .

Кінематичні рівняння, які пов'язують похідні кутів $\dot{\psi}$, $\dot{\vartheta}$, $\dot{\gamma}$ з кутовими швидкостями обертання ω_x , ω_y , ω_z БПЛА мають вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= \frac{(\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma)}{\cos \vartheta}; \\ \dot{\vartheta} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma; \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) \frac{\sin \vartheta}{\cos \vartheta}.\end{aligned}\tag{2}$$

Система рівнянь першого рівня віртуального керування для просторового маневрування БПЛА (1) та система кінематичних рівнянь (2) надає можливість сформувати систему з трьох лінійних рівнянь з трьома невідомими командними сигналами віртуального керування другого рівня $\dot{\omega}_{xC}$, $\dot{\omega}_{yC}$, $\dot{\omega}_{zC}$:

$$\begin{aligned}k_{1x}\dot{\omega}_{xC} + k_{1y}\dot{\omega}_{yC} + k_{1z}\dot{\omega}_{zC} &= K_1, \\ k_{2x}\dot{\omega}_{xC} + k_{2y}\dot{\omega}_{yC} + k_{2z}\dot{\omega}_{zC} &= K_2, \\ k_{3x}\dot{\omega}_{xC} + k_{3y}\dot{\omega}_{yC} + k_{3z}\dot{\omega}_{zC} &= K_3.\end{aligned}\tag{3}$$

Коефіцієнти $k_{1x}, k_{1y}, k_{1z}, k_{2x}, k_{2y}, k_{2z}, k_{3x}, k_{3y}, k_{3z}, K_1, K_2, K_3$ у системі рівнянь (3) обчислюють за допомоги диференціювання співвідношень в (2) і мають такі значення:

$$\begin{aligned}k_{1x} &= 0, k_{1y} = \frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta}, k_{1z} = \frac{-\sin \gamma}{\cos \vartheta}; \\ k_{3x} &= 1, k_{3z} = \frac{\sin \gamma \sin \vartheta}{\cos \vartheta}; \\ k_{2x} &= 0, k_{2y} = \sin \gamma, k_{2z} = \cos \gamma; \\ K_1 &= p_\psi + \omega_y \left[\left(\frac{\sin \gamma}{\cos \vartheta} \right) - \left(\frac{\cos \gamma \sin \vartheta}{\cos^2 \vartheta} \right) \right] + \\ &+ \omega_z \left[\left(\frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta} \right) - \left(\frac{\sin \gamma \sin \vartheta}{\cos^2 \vartheta} \right) \right]; \\ K_2 &= p_\vartheta - \omega_y \cos \gamma + \omega_z \sin \gamma; \\ K_3 &= p_\gamma - \omega_y \left[\left(\frac{\cos \gamma}{\cos^2 \vartheta} \right) - \left(\frac{\sin \gamma \sin \vartheta}{\cos \vartheta} \right) \right] - \\ &- \omega_z \left[\left(\frac{\cos \gamma \sin \vartheta}{\cos \vartheta} \right) + \left(\frac{\sin \gamma}{\cos^2 \vartheta} \right) \right].\end{aligned}\tag{4}$$

Після розв'язку рівнянь (3) з урахуванням рівнянь (4) та використовуючи сигнали поточного стану БПЛА, формують командні сигнали віртуального керування другого рівня у лінійному обчислювальному модулі:

$$\begin{aligned}w_x &= \dot{\omega}_{xC}; \\w_y &= \dot{\omega}_{yC}; \\w_z &= \dot{\omega}_{zC}.\end{aligned}\tag{5}$$

Ці сигнали призначено для формування у подальшому реальних команд керування кутами відхилення елеронів, руля висоти та руля напрямку.

У нелінійному обчислювальному модулі розв'язується система рівнянь руху БпЛА, записана відносно центру мас у зв'язаній системі координат. Можливі варіанти подання системи нелінійних диференціальних рівнянь, що характеризують параметри руху БпЛА, наведено в джерелах [17, 18]. Для розв'язання системи рівнянь нелінійний обчислювальний модуль може використовувати будь-який з відомих методів обчислення системи нелінійних рівнянь, наприклад, методи Ньютона-Рафсона, Зейделя, Бройдена тощо. Чим точніше застосовані рівняння описують реальні параметри руху БпЛА, тим ефективнішим буде процес інтегральної адаптації автопілоту до реальних умов маневрування.

Потрібні для розрахунків коефіцієнти аеродинамічних сил і моментів знаходяться у модулі зберігання та апроксимації аеродинамічних даних у вигляді таблиць даних. Ці дані отримують на основі аеродинамічних досліджень відповідної моделі БпЛА.

За сигналами віртуального керування другого рівня w_x , w_y , w_z нелінійний обчислювальний модуль формує реальні команди керування кутами відхилення елеронів δ_e , руля висоти δ_δ та руля напрямку δ_n . В подальшому ці сигнали надходять на виконавчі механізми аеродинамічних поверхонь керування БпЛА.

Розроблений інтегрально-адаптивний автопілот має такі переваги:

- збільшено кількість та підвищено ефективність альтернативних варіантів планування руху БпЛА;
- покращено точність та підвищено надійність відпрацювання складних просторових траєкторій польоту;
- надано можливість адаптуватися до суттєвих змін висоти та швидкості польоту безпілотного літального апарату;
- надано можливість виконувати маневрування у вертикальній і горизонтальній площинах з істотно криволінійними ділянками;
- відпрацьовано перехресні зв'язки та компенсовано взаємний вплив між каналами керування БпЛА;
- забезпечено автономність роботи за умов невизначеності та складних обмежень.

ВИСНОВКИ

Незважаючи на значну кількість теоретичних робіт та активний розвиток інформаційних технологій, проблема ефективного керування безпілотним літальним апаратом є надзвичайно актуальною. В роботі показано недостатню ефективність функціонування традиційних автопілотів безпілотних літальних апаратів за наявності зовнішніх збурень, невизначеності та у разі глибокого маневрування.

Ефективне керування безпілотним літальним апаратом за різних і непередбачуваних умов, які досить швидко змінюються, вимагає нових підходів до синтезу систем автопілотування. Одним із сучасних інструментів вирішення цього питання є застосування інтелектуальних систем керування у складі перспективних безпілотних літальних апаратів.

Використання запропонованого підходу уможливорює створення інтегрально-адаптивного автопілота для реалізації складного просторового маневрування безпілотного літального апарату. Цим забезпечено можливість застосування повних нелінійних моделей безпілотних літальних апаратів без спрощень та лінеаризації. Крім того, є можливим використання розширеного діапазону параметрів та альтернативних варіантів структурної організації бортових систем. Підвищення точності та сталості керування забезпечено за рахунок штучного перетворення процесів, що протікають у багатовимірній системі, в сукупність віртуальних автономних процесів, для кожного з яких досить легко синтезують алгоритм керування автономною підсистемою. Насамкінець здійснюють процедуру координації дій всіх автономних підсистем в єдиний функціональний комплекс.

На відміну від наявних систем, запропонований інтегрально-адаптивний автопілот дає можливість доповнити лінійні рівняння руху повними нелінійними аеродинамічними моделями безпілотного літального апарату. Внаслідок цього підвищено якість керування за критичних умов та нештатних ситуацій, наприклад, за умов непередбаченого виходу ряду суттєвих параметрів за допустимі межі. В розробленому автопілоті здійснюється формування команд дворівневого віртуального керування, які дають змогу ефективно адаптуватися до змін висоти та швидкості польоту безпілотного літального апарату.

Поєднання в інтегрально-адаптивному автопілоті традиційних підходів керування безпілотними літальними апаратами із запропонованим методом віртуального керування уможливорює підвищення рівня інтелектуалізації безпілотного літального апарата та забезпечує якісне виконання завдань, які постають перед безпілотною авіацією.

ЛІТЕРАТУРА

1. Fahlstrom P., Gleason T. Introduction to UAV systems. Hoboken: Wiley, 2012. 4th ed. 308 p.
2. Моисеев В.С. Прикладная моногр управления беспилотными летательными. Монографія. Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. 768 с.
3. Beard R.W., McLain T.W. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. Princeton: Princeton Univ. Press, 2012. 320 p.
4. Chao H., Cao Y., and Chen Y.Q. Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey. *International Journal of Control, Automation, and Systems*. 2010. vol. 8, no. 1. P. 36–44.

5. Feng G.A. Survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2006. vol. 14, no. 5. P. 676–697.
6. Шилов К.Е. Разработка системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом мультироторного типа. *Труды МФТИ*. 2014. № 4. С. 139–152.
7. Calise A., Rysdyk R. Nonlinear Adaptive Flight Control Using Neural Networks. *Control Systems Magazine*. 1998. vol. 18, no. 6. P. 14–25.
8. Johnson E.N., Kannan S.K. Adaptive Flight Control for an Autonomous Unmanned Helicopter. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Monterey, California, August, 2002.
9. Lopez J., Dormido R., Gomez J.P., Dormido S., Diaz J.M. Comparison of H-infinity with QFT applied to an Altitude Command Tracker for an UAV. Proc. of the European Control Conference (2 – 5th of July, 2007, Kos, Greece) Kos, Greece, 2007. P. 46–54.
10. Lopez J., Dormido R., Dormido S., Gomez J.P. A Robust Controller for an UAV Flight Control System. *The Scientific World Journal*. 2015. vol. 2015. P. 15–26.
11. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications, 2nd Edition. New York, NY: Wiley, 2004. 228 p.
12. Kumon M., Udo Y., Michihira H., Nagata M., Mizumoto I., Iwai Z. Autopilot system for kiteplane. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2006. vol. 11, no. 5. P. 615–624.
13. Albus J.S. On intelligence and its dimensions. *Technical report of the ISIS (Interdisciplinary studies of intelligent systems) group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame, 1994. P. 11–13. URL: <http://www.nd.edu/~pantsakl/Publications/150-ISIS94.pdf>. (Дата звернення: 10.11.2018.).
14. Antsaklis P.J. On autonomy and intelligence in control. *Technical report of the ISIS (Interdisciplinary studies of intelligent systems) group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame, 1994. P. 14–18. URL: <http://www.nd.edu/~pantsakl/Publications/150-ISIS94.pdf>. (Дата звернення: 10.11.2018.).
15. Гриценко В.І., Волков О.Є., М.М. Комар, Богачук Ю.П. Інтелектуалізація сучасних систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами. *Кибернетика и вычисл. техника*. 2018. № 1 (191). С. 45–59.
16. Павлов В.В., Павлова С.В. Интеллектуальное управление сложными нелинейными динамическими системами. Киев: Наукова думка, 2015. 216 с.
17. Харченко В.П., Чепіженко В.І., Тунік А.А., Павлова С.В. Авіоніка безпілотних літальних апаратів. Київ: ТОВ «Абрис-принт», 2012. 464 с.
18. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. Москва: Машиностроение, 1973. 501 с.

Отримано 19.11.2018

REFERENCES

1. Fahlstrom P., Gleason T. *Introduction to UAV systems*. Hoboken: Wiley, 2012. 4th ed. 308 p.
2. Moiseyev V.S. *Applied theory of unmanned aerial vehicles control*. Kazan: GBU Republican centre for monitoring education quality, 2013. p. 768. (in Russian).
3. Beard R.W., McLain T.W. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton: Princeton Univ. Press, 2012. 320 p.
4. Chao H., Cao Y., and Chen Y.Q. Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2010, vol. 8, № 1. P. 36–44.
5. Feng G. A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2006, vol. 14, № 5. P. 676 – 697.
6. Shilov K.Ye. Development of unmanned air vehicle automatic control system of a rotorcraft. *Works of MFTI*, 2014. № 4. P. 139–152. (in Russian).
7. Calise A., Rysdyk R. Nonlinear Adaptive Flight Control Using Neural Networks. *Control Systems Magazine*, 1998, vol. 18, №. 6. P. 14–25.
8. Johnson E.N., Kannan S.K. Adaptive Flight Control for an Autonomous Unmanned Helicopter. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Monterey, California, August, 2002.
9. Lopez J., Dormido R., Gomez J.P., Dormido S., Diaz J.M. Comparison of H-infinity with QFT applied to an Altitude Command Tracker for an UAV. Proc. of the European Control Conference (2 – 5th of July, 2007, Kos, Greece) Kos, Greece, 2007. P. 46–54.

10. Lopez J., Dormido R., Dormido S., Gomez J.P. A Robust Controller for an UAV Flight Control System. *The Scientific World Journal*. 2015. vol. 2015. P. 15–26.
11. Ross T.J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications, 2nd Edition*. New York, NY: Wiley, 2004. 228 p.
12. Kumon M., Udo Y., Michihira H., Nagata M., Mizumoto I., Iwai Z. Autopilot system for kiteplane. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2006. vol. 11. № 5. P. 615–624.
13. Albus J.S. On intelligence and its dimensions. *Technical report of the ISIS (Interdisciplinary studies of intelligent systems) group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame, 1994. P. 11–13.
14. Antsaklis P.J. On autonomy and intelligence in control. *Technical report of the ISIS (Interdisciplinary studies of intelligent systems) group №. ISIS 94-001*. University of Notre Dame, 1994. P. 14–18.
15. Grytsenko V.I., Volkov O.E., Komar M.M., Bogachuk Yu.P. Intellectualization of the modern automatic control systems for unmanned aerial vehicles. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2018. № 1 (191). P. 45–59. (in Ukrainian)
16. Pavlov V.V., Pavlova S.V. *Intellectual control of complex non-linear dynamic systems*. Kiev: Naukova dumka. 2015. 216 p. (in Russian).
17. Kharchenko V.P., Chepizhenko V.I., Tounik A.A., Pavlova S.V. *Unmanned aerial vehicles avionics*. Kiev: TOV Abris-print, 2012. 464 p. (in Ukrainian).
18. Bodner V.A. *Air vehicle control systems*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973. 501 p. (in Russian).

Received 19.11.2018

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

Волков А.Е., и.о. зав. отделом,
отд. интеллектуального управления,
e-mail: alexvolk@ukr.net

Комар Н.Н., науч. сотр.,
отд. интеллектуального управления,
e-mail: nickkomar08@gmail.com

Шенетуха Ю.М., канд. техн. наук,
вед. науч. сотр., отд. интеллектуального управления,
e-mail: dep185@irtc.org

Волошенко Д.А., науч. сотр.,
отд. интеллектуального управления,
e-mail: dep185@irtc.org

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

ИНТЕГРАЛЬНО-АДАПТИВНЫЙ АВТОПИЛОТ КАК СРЕДСТВО ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В работе исследованы алгоритмы управления, которые используются в автопилотах современных беспилотных летательных аппаратов, а также рассмотрен вопрос создания и применения новых интеллектуальных методов и систем автоматического пилотирования беспилотных летательных аппаратов. Предложен интегрально-адаптивный автопилот для реализации сложного пространственного маневрирования беспилотного летательного

апарата. Описан подход к решению задачи управления беспилотным летательным аппаратом в классе виртуальных стратегий с использованием виртуального управления, что дает возможность исследовать объект управления комплексно без упрощений и линеаризации системы уравнений, которые его описывают. Использование метода, предложенного в статье, позволяет создавать адаптивные автопилоты для выполнения сложных пространственных маневрирования беспилотного летательного аппарата, динамика движения которого описывается полными нелинейными системами уравнений.

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, система управления, виртуальное управление, адаптация, инвариантность.*

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

Volkov O.Ye., Acting Head of Department,
Intelligent Control Department,
e-mail: alexvolk@ukr.net

Komar M.M., Researcher,
Intelligent Control Department,
e-mail: nickkomar08@gmail.com

Shepetukha Yu.M., PhD (Engineering)
Leading Researcher,
Intelligent Control Department,
e-mail: dep185@irtc.org

Voloshenyuk D.O., Researcher,
Intelligent Control Department,
e-mail: dep185@irtc.org
International Research and Training Center
for Information Technologies and Systems
of National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
40, Glushkova ave., Kyiv, 03187, Ukraine.

INTEGRAL-ADAPTIVE AUTOPILOT AS A MEANS OF INTELLECTUALIZING A MODERN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Introduction. At present unmanned aerial vehicles (UAVs) are successfully used in various industries in performing scientific and engineering, economical, military and a number of other missions. Effectiveness of their functioning is mainly determined by an onboard suit of hardware and software of a UAV's control system. The process of the existing autopilot systems enhancement is intended to broaden the range of UAV's tasks without direct human involvement and introduce additional smart functions into autopilot operation.

Purpose. The aim of research is to study the modern algorithms used in autopilots of unmanned aerial vehicles and formulation of the problem of development and usage of new intellectual methods for automatic control systems.

Results. The approach considered in the article is based on the theory of high-precision remote control of dynamic objects and on the complex interaction of methods of theory of invariance, adaptive control and intellectualization of processes of UAV control.

One of the features of the proposed method of intellectual control for unmanned aerial vehicle autopilot is the procedure of transforming a multi-dimensional system into an

aggregate of virtual autonomous processes, for each of which the control algorithm is easily generated by an autonomous subsystem. Coming up next is the procedure of coordination of actions of all the autonomous systems into single functioning complex. This provides an opportunity to improved precision and sustainability of control.

Conclusion. Using the method described in the article allows creating integral and adaptive autopilots to perform complicated spatial maneuvering an unmanned aerial vehicle being based on usage of full non-linear models without simplifications and linearization.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, control system, virtual control, adaptation invariance.*

DOI: [https:// 10.15407/kvt195.01.023](https://10.15407/kvt195.01.023)

UDC 004.94, 378.147.88

SUKHORUCHKINA O.N., Senior Researcher,
Department of System Information Technologies

e-mail: sukhoru@irtc.org.ua

PROGONNYI N.V., Researcher,

Department of System Information Technologies

e-mail: progonny@gmail.com

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

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

THE INFORMATION TECHNOLOGY FOR REMOTE AND VIRTUAL PRACTICAL RESEARCHES ON ROBOTICS

Introduction. *The problem of timely updating of laboratory means for research and training in robotics and intelligent technologies is considered. The information technology is proposed for organization of the laboratory complex with two types of components — remotely controlled robotics equipment and virtual means for corresponding practical research. Today, such approaches are the most optimal for providing research and training processes with modern resources for acquiring practical experience in rapidly developing scientific fields.*

The purpose of the article is to consider the information technology capabilities in the organization of remote access to physical equipment and virtual means for practical research and training on robotics.

Methods. *Methods of distributed information and computing processes, communication protocols, and web application programming are used.*

Results. *Two types of specialized means of our laboratory complex — physical equipment with remote access and virtual environments are considered. The general structures of autonomous mobile robot and sensor module that can be used remotely for certain research and practical training are presented. Some examples of web applications that are intended to familiarize students with certain types of robotics systems by their 3D models and to perform corresponding practical tasks with the automatic results checking are shown.*

Conclusion. *The use of the laboratory complex components according to the created technology leads to timely expansion of the resources for the state-of-the-art research and practical training on robotics or intelligent technologies by the students of many Ukraine technical universities.*

Keywords: *robotics, remote control technology, virtual laboratory, web applications.*

INTRODUCTION

The high rate of the progress in the intelligent technologies and robotics puts the corresponding requirements for the educational processes of training specialists in this area.

However, existing equipment for practical training and research is insufficient and limits introducing and deepening new disciplines or additional sections to already approved training programs in technical universities of Ukraine. The current state of educational technologies in this area of knowledge requires the active search for new realizations of the virtual laboratories and the development of appropriate software and hardware tools which can be shared by scientific and educational institutions.

Let us note that the term “virtual laboratory” can be used in various meanings. For example in [1] resource sharing of a physical equipment in remote mode is considered as a virtual laboratory. Following [2–5] we will consider two types of software and hardware systems — physical equipment with remote access (remote laboratory resources) and software that allows simulating laboratory experiments — virtual laboratory resources.

Modern robotic developments combine theoretical knowledge and practical achievements of many scientific disciplines. But the main task of robotics today is to increase the mobile robot autonomous abilities to perform complex tasks in a non-deterministic dynamic environment. Intelligent technologies have a particularly important role, providing perception, analysis and semantic interpretation of information about a mobile robot environment and making decisions for sensible actions of a technical system. Therefore, integrated disciplines on intelligent information technologies and robotics meet the current labor market needs, and it is extremely necessary to create conditions for use of modern laboratory complexes in educational processes and scientific research, in particular, remotely.

We have created specialized hardware and software components of laboratory complex consisting of the web simulator, physical remote controlled equipment and appropriate information technology for use of these components. The technique for the practical application of the virtual environment for some research in the simulator mode of certain physical modules and information processes that accompany the operation of complex dynamic objects, namely, mobile robots and manipulators are developed.

The purpose of the article is to consider the information technology capabilities in the organization of remote access to physical equipment and virtual means for practical research and training sessions on robotics. Hardware and software laboratory resources and corresponding techniques developed at the International Center are presented.

FUNCTIONALITY OF LABORATORY COMPLEX EQUIPMENT

Innovative research and training technique in robotics and intelligent technologies put forward certain functional requirements for laboratory complex components, first of all, the ability to control remotely certain modes of the physical components operation and receive the specified information in the given format, as well as using the resources of the virtual web simulator of some processes.

Previously in the International Center the prototype of multifunctional autonomous in-door mobile robot (MR) and unified sensor module (SM) — the device with changeable sensors for perceptions environment properties were created as a result of scientific and technical projects. These original hardware-software systems can be used as basic physical components of the laboratory complex for research or training experiments directly in the room where equipment is located or in the remote mode.

The mechatronic part of our MR is based on the robotic kit by Evolution Robotics (USA). The mobile platform is equipped by web-camera and a simple gripper with two-fingers. The CAN (Controller Area Network) network with microcontroller nodes was developed for various sensors signal processing, communications and power supply. For our MR budget models sensors are used: safety movement sensors, infrared rangefinders, temperature and illumination sensors, microphones.

The multifunction autonomous MR is the distributed system of interacting software and computing modules with corresponding communication resources, software and hardware effectors and modules for perception, analysis and task-oriented interpretation of the information about surroundings objects (Fig. 1, a). The MR autonomous functioning at dynamic environment is supported by original techniques of a two-modules intelligent control system (CS) with developed human-machine interface and distributed software (Fig. 1, b) [6, 7].

The computer 3D modelling is used for the MR control system and the graphic user interface at the same time. This technique provides a user with the dynamically synthesized models of the MR and environment. Now the repertoire of our MR has the following missions for autonomous operation:

- self-localization by the artificial visual landmarks;
- navigation to a predetermined position or to a specified object with re-planning trajectory in the dynamic environment;
- monitoring the surrounding situation or supervise the specific objects in-door;
- pursuit of the moving target object;
- search, taking and moving target objects, etc.

All resources of MR control and obtaining necessary information are available to the remote user via Internet browser. The Fig. 2 shows the example of MR web interface screenshot after the robot completes the mission “Come to the object “Ukraine poster””.

The concept “run the mission” implies that the software of MR control system contains the program components for all MR actions that may be required for the autonomous achievement of the robot target state specified by the user as the mission parameters.

During the remote control sessions, the robot user can observe all functionally important state variables of the technical system, namely:

- current MR position coordinates;
- current measurement values of all its sensors;
- video images from the onboard camera;

3D models of MR operation environment and model of how the video camera perceives the environment model.

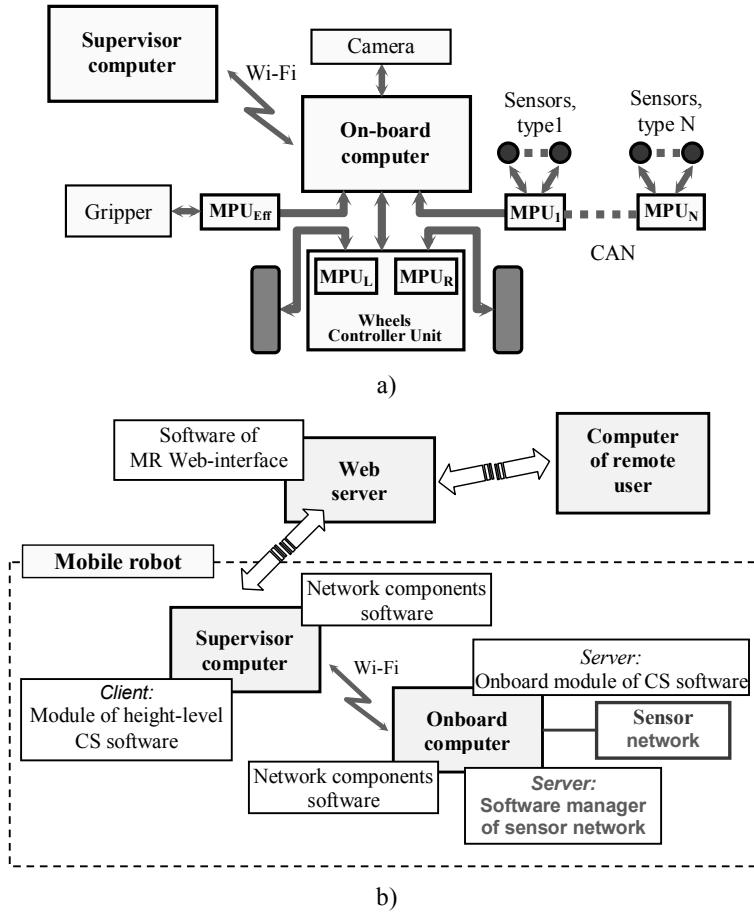


Fig. 1. General MR hardware scheme (a) and distributed software modules of MR CS (b)

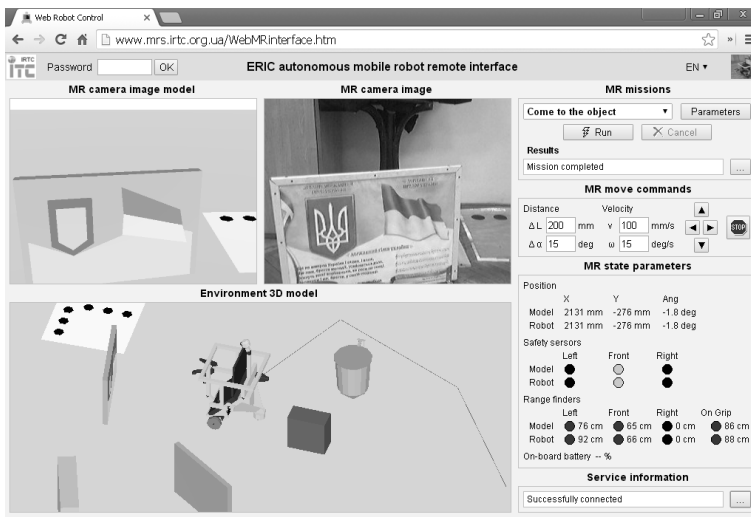


Fig. 2. MR web interface screenshot

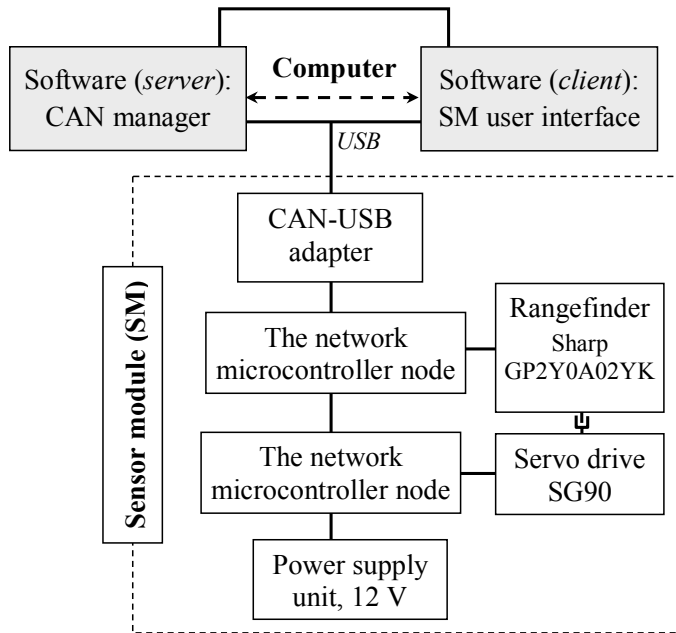


Fig. 3. SM device structure

In addition, the voice messages about MR current actions are synthesized.

There is a special set of missions when the robot performs specific actions, that generate a definite type of information, analysis and interpretation of which is the purpose of independent research with training purposes.

For example, rangefinder data are collecting and sending to the end user while MR autonomously moves around the target object. This information can be used as input for such tasks as data processing and approximation for compact description of the object contour [8].

On-line obtaining real sensory data from moving MR is important for the researcher to understand the specifics of the environment perception by technical means, and observe the random nature of the signal noise or signal delay, redundancy or uncertainty of such type information.

Another functional equipment of laboratory complex — unified SM. This device can also be used to collect sensory data about environment characteristics. The SM components and structure are shown in Fig. 3. In this example the sensor rangefinder is installed on the servo drive axis.

The general scheme of target object scanning process is shown in Fig. 4. The fixed coordinate system (CS) $OXYZ$ is associated with a horizontal plane, where the SM and target objects for examination are located. The CS $O_{Rf}X_{Rf}Y_{Rf}Z_{Rf}$ is associated with the SM case. The axis OZ coincides with the axis $O_{Rf}Z_{Rf}$ and with the axis of the servo drive. The position of the central axis of the sensing zone of the sensor forms with the axis OX of the stationary SC the angle which changes during the rotational movement of the sensor.

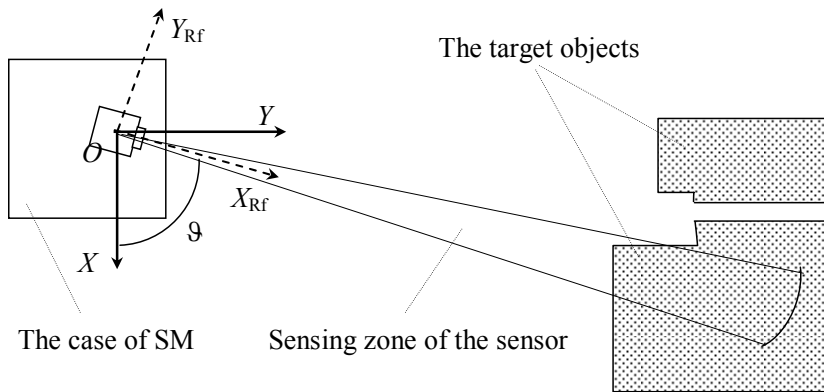


Fig. 4. General scheme of target object scanning process (top view)

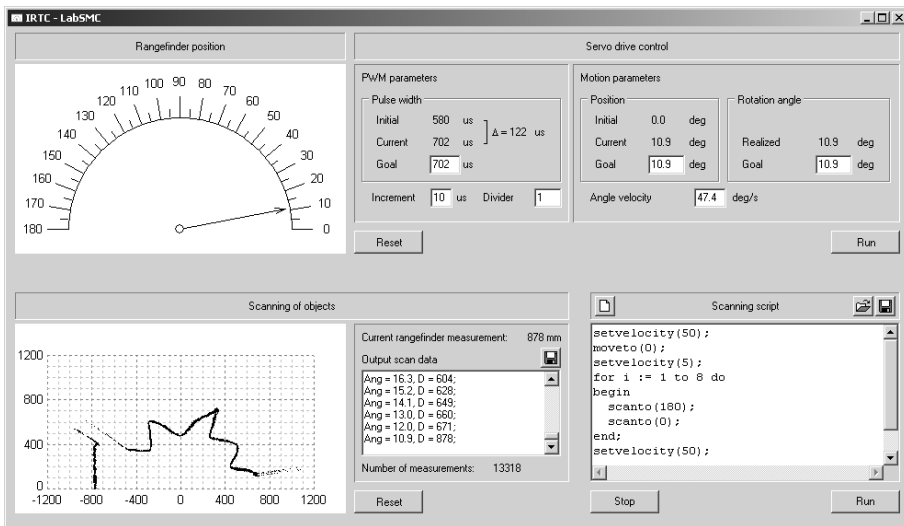


Fig. 5. SM graphic user interface

The angle ϑ between OX and $O_{Rf}X_{Rf}$ axes changes when the servo drive rotates together the sensor case. So the current sensor position is determined by one parameter ϑ which value is in the range $0^\circ - 180^\circ$. Each rangefinder signal value corresponds to the specific value of angle ϑ . During the scanning process the set of pairs of values (angle ϑ and distance to the object) are formed.

The graphic user interface of the SM control program is shown in Fig. 5. The user should create a script program that determines the scan mode and range (bottom right in Fig. 5). The scan results forms the array of pairs (angle, distance) (center bottom in Fig. 5) which can be stored on the user's computer for further research. At the bottom left of the Fig. 5, there is a place for real-time graphic display of scan results.

The general scheme of interaction between equipments of our laboratory complex is shown in Fig. 6.

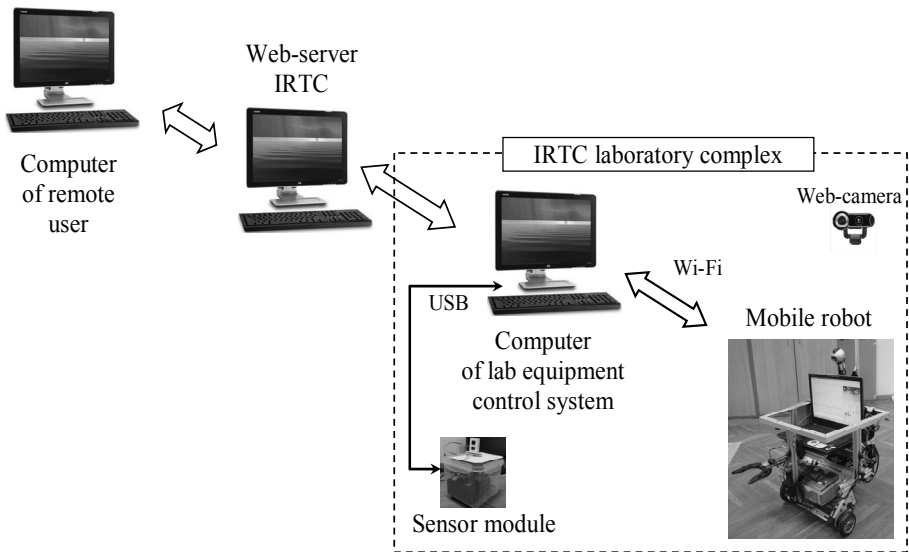


Fig. 6. The scheme of IRTC laboratory complex

THE VIRTUAL COMPONENTS OF LABORATORY COMPLEX

Practical research is an important form of training processes, but it is critical to update methodological and equipment base of research and educational institutions in time. Even if the institution has sufficient material resources, the laboratory equipment that is needed for modern and actual research in robotics or informational technologies is impossible to purchase due to its lack of sale.

However, now computer resources and communication technologies make it possible to significantly change the methodology of practical research for training and to increase the dynamics of updating of the laboratory base. Let's call the main approaches:

- creation of specialized software that generate virtual images of certain physical systems or processes and simulates their functional properties;
- organization of remote use of laboratory equipment as hardware-software technical systems or their components.

Today, only the virtual laboratory recourses are the popular alternative to hardware-software equipment with remote access. The use of simulation software for such fast-growing knowledge-intensive areas as autonomous robotics and intelligent information technologies is particularly reasonable. For training purposes the most popular is simulation software executed as web applications by standard Internet browser. Such applications do not require installation on users' computers and can be simultaneously used by an unlimited number of students at any time.

Web applications we developed use 3D modeling, which increases the effect of representing the real technical systems or their components and often eliminates the need of the direct access to lab equipment for a number of practical tasks.

As an example, let us show several web applications for performing certain practical tasks on robotics with automatic checking the results. Appropriate methodical instructions are downloaded from the website for each lab task where the problem statement and all necessary conditions for its implementation are described.

Lab work «Program control of the mobile robot motion»
Methodical instructions

Trajectory

Task: Determination of motion parameters of the mobile robot (MR)

Variant: 11 MR path velocity: 200 mm/s

MR initial position: X = 0.0 mm, Y = 0.0 mm, Ang = 0.0 deg

MR final position: X = 0.0 mm, Y = 0.0 mm, Ang = -90.0 deg

Motion program

```
dt = 7.1, v1 = 200.0, vr = 200.0, a1 = 700.0, ar = 700.0;
dt = 3.430, v1 = 110.0, vr = 290.0, a1 = 500.0, ar = 700.0;
dt = 2.100, v1 = 200.0, vr = 200.0, a1 = 700.0, ar = 700.0;
dt = 7.890, v1 = 123.6, vr = 276.5, a1 = 500.0, ar = 700.0;
dt = 2.760, v1 = 300.0, vr = 100.0, a1 = 700.0, ar = 700.0;
dt = 3.200, v1 = 110.0, vr = 290.0, a1 = 500.0, ar = 700.0;
dt = 0.000, v1 = 0.0, vr = 0.0, a1 = 700.0, ar = 700.0;
```

Run Stop Continue Reset Clear Template

Results

MR path velocity does not match the given value (section 4: V = 200.05 mm/s, dV = 0.05 mm/s).

MR final position does not match the given one (dX = 155.9 mm, dY = -69.9 mm, dAng = 10.0 rad).

Current parameters of MR motion

Position: X = 155.9 mm, Y = -69.9 mm, Ang = -80.0 deg

Path velocity: V = 0.0 mm/s

Fig. 7. Web-application for the practical task on the program control of MR

One of the practical tasks focuses on checking theoretical knowledge on automatic control that allows to calculate the parameters of two-wheels MR motion on a horizontal plane along a trajectory of a specified shape with a given constant velocity. The web page for this task after checking the calculated motion parameters is shown in Fig. 7. Here, the trajectory of the red color is specified by the conditions of the task, and blue trajectory corresponds to the executed motion program. At the result box we can see two types of mistakes — MR velocity along the trajectory differs from the given one and robot final position does not match the given one. This web-application allows to correct directly the motion parameters and to get satisfactory task solution.

Another practical task is concerned with the base autonomous robotics problem — robot self localization by visual landmarks of a special kind. Web-application “The virtual environment for determining the position of mobile robot by visual landmarks” allows one to get familiarized with the spatial model of the robot, to obtain the images from its on-board camera as input data for solving of this task with further automated verification of the results of determining the robot position relative to current visual landmarks. All parameters about on-board camera, its position relative to the coordinate system associated with the robot platform and parameters of artificial visual landmarks are described in detail in the methodical instructions that are downloaded from the web-page. The Fig. 8 shows successfully determined coordinates of robot position, in which the on-board camera perceives the given visual landmark properly.

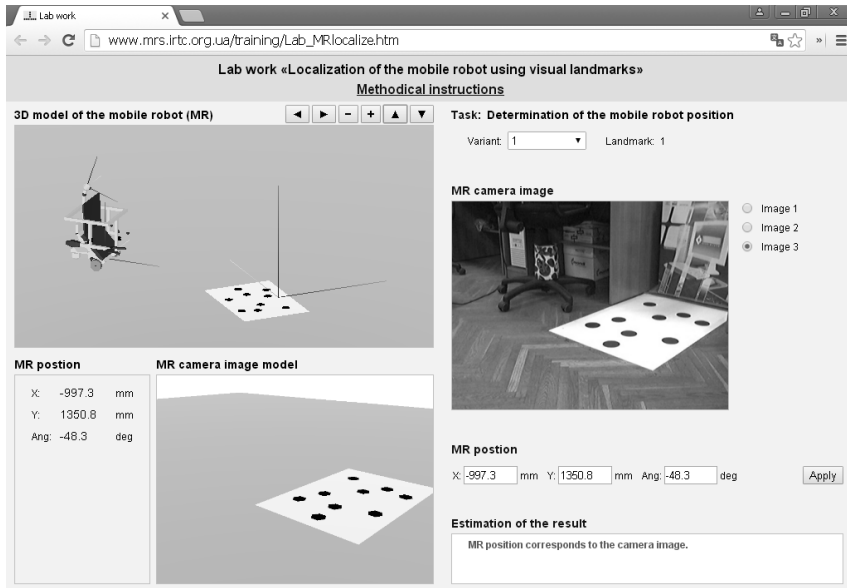


Fig. 8. Web-application for the practical task on determination of MR position

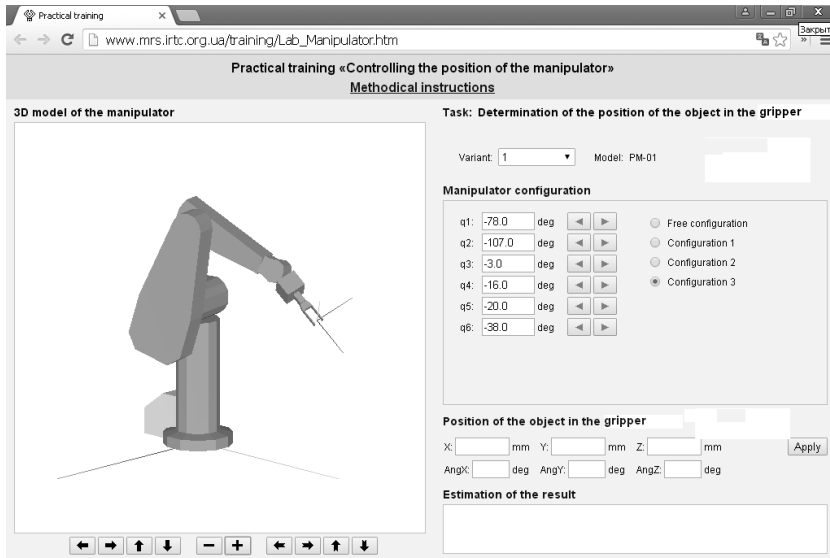


Fig. 9. Web-application for the practical task on controlling the manipulator position

It is practically important to be able to determine the positions of the gripping device of the multi-link manipulator relative to the Cartesian fixed coordinate system when the generalized coordinates of its links are known (direct kinematics problem by position). Web-application “The virtual environment for manipulator position control” helps one to get familiarized with the spatial models of multi-link manipulators of several types, to understand the kinematic connections of the movements of individual links and the principle of controlling

the position of the gripper. The interrelation of the movements of complex multi-link mechanisms is difficult to imagine without computer simulation. This web-application essentially simplifies the observation of various spatial configurations of manipulators with six degree of freedom in arbitrary viewpoints. Fig. 9 shows the example of input data for practical training on solving task of determining the spatial coordinates of the object if it is in the gripper of manipulator of specific type at the given configuration.

CONCLUSIONS

Today, leading research teams and corresponding departments of the largest microelectronic industry firms are developing and producing robots of various types and functionalities. A special class of high-tech products has appeared — service robots, which are already widely used in medicine, agriculture, service sector and trade, in logistics and transport, in security and safety services, etc. This situation causes the increase in demand for qualified specialists in the design, maintenance and operation of modern robotic systems and, accordingly, the increase in requirements for the training of such specialists in technical universities.

The importance of having modern means for laboratory and practical training on intelligent information technologies, control systems and robotics was discussed as the issues of preparing future scientists and engineers for the XXI century challenges at the World Congress on Automatic Control of the IFAC-2017 [9].

This article presents the technology of organizing modern and rapidly updated means for practical laboratory research for educational purposes, both with remote use of physical equipment and with the web technology for computer simulation of the behavior of robots or their functional modules. Our laboratory complex with the corresponding techniques is successfully applied for practical training on discipline “Intelligent robots and robotic systems” in the master's degree at the Institute for Applied System Analysis of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” [10].

REFERENCES

1. Guimarães E., Maffei A., Pereira J., Russo B., Cardozo E., Bergerman M. REAL: A virtual laboratory for mobile robot experiments. *IEEE Transactions on Education*. 2003. Vol. 46. No. 1. P. 37–42.
2. Trukhin A.V. Ispol'zovanie virtual'nykh laboratoriy v obrazovanii, *Otkrytoe i distantsionnoe obrazovanie*. 2002. № 4 (8). P. 67–69.
3. Tzafestas C.S., Palaiologou N. Virtual and remote robotic laboratory: comparative experimental evaluation. *IEEE Transactions on Education*. 2006. Vol. 49. No. 3. P. 360–369.
4. Chaos D., Chacón J., Lopez-Orozco J.A., Dormido S. Virtual and remote robotic laboratory using EJS, MATLAB and LabVIEW. *Sensors*. 2013. No. 13. P. 2595–2612.
5. Candela F.A., Puente S.T., Torres F., Ortiz F.G., Gil P., Pomares J. A Virtual Laboratory for Teaching Robotics. *International Journal of Engineering Education*. 2003. Vol. 19. No. 3. P. 363–370.
6. Sukhoruchkina O.N. The structures and information processes of mobile robot intelligent control. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu problem modelyuvannya v energetytsi im. G.Ye. Pukhova NAN Ukrainy*. Kyiv, 2012. No. 62. P. 93–101.
7. Sukhoruchkina O.N., Progonnyi N.V. The intelligent mobile robot — laboratory complex with remote access. *Materialy konferentsii “Avtomatyka-2011”*. (28–30 of Sept, 2011, Lviv). Lviv, 2011. P. 413–414.

8. Sukhoruchkina O.N., Progonnyi N.V., Voronov M.A. Interpretation and use of the rangefinder measurements in the autonomous mobile robot control problems. *USiM*. 2017. No. 1. P. 26–34.
9. Website of the World Congress on Automatic Control IFAC-2017. URL: <https://www.ifac2017.org/demonstrators/> (Last accessed: 26.12.2018)
10. Sukhoruchkina O.N., Progonnyi N.V. The information technology of intelligent control of mobile robot and their use for training purposes. Materialy 19-i Mizhnar. naukovno-techn. konfer. „Systemnyi analiz ta informatsiyni tehnologii” SAIT-2017 (22–25th of May, 2017, Kyiv). Kyiv, 2017. P. 325–326.

Resieved 29.11.2018

ЛИТЕРАТУРА

1. Guimarães E., Maffei A., Pereira J., Russo B., Cardozo E., Bergerman M. REAL: A virtual laboratory for mobile robot experiments, *IEEE Transactions on Education*. 2003. **46**, No. 1. P. 37–42.
2. Trukhin A.V. Ispol'zovanie virtual'nykh laboratoriy v obrazovanii, *Otkrytoe i distantsionnoe obrazovanie*. 2002, № 4 (8), pp. 67–69.
3. Tzafestas C.S., Palaiologou N. Virtual and remote robotic laboratory: comparative experimental evaluation, *IEEE Transactions on Education*. 2006. **49**, No. 3. P. 360–369.
4. Chaos D., Chac'on J., Lopez-Orozco J.A., Dormido S. Virtual and remote robotic laboratory using EJS, MATLAB and LabVIEW, *Sensors*. 2013. No. 13. P. 2595–2612.
5. Candelas F.A., Puente S.T., Torres F., Ortiz F.G., Gil P., Pomares J. A Virtual Laboratory for Teaching Robotics, *International Journal of Engineering Education*. 2003. **19**, No. 3, pp. 363–370.
6. Сухоручкина О.Н. Структуры и информационные процессы интеллектуального управления мобильным роботом, *Збірник наук. праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*. Київ, 2012. Вип. 62. С. 93–101.
7. Сухоручкина О.Н., Прогонный Н.В. Интеллектуальный мобильный робот — лабораторный комплекс удаленного доступа. *Матеріали конф. „Автоматика — 2011”, 28–30 вересня 2011 р., Львів, Україна*. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2011. С. 413–414.
8. Сухоручкина О.Н., Прогонный Н.В., Воронов М.А. Интерпретация и использование измерений сенсора-дальномера в задачах управления автономным мобильным роботом, *USiM*, 2017. № 1. С. 26–34.
9. Сайт всевітнього конгресу з автоматичного керування IFAC-2017. <https://www.ifac2017.org/> (Last accessed: 26.12.2018)
10. Сухоручкина О.Н., Прогонный Н.В. Информационные технологии интеллектуального управления мобильным роботом и их использование в учебных целях. *Матеріали 19-ї Міжнар. наук.-техн. конф. „Системний аналіз та інформаційні технології” SAIT-2017, Київ, 22–25 травня, 2017 р.* К.: ННК «ПСА» НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 325–326.

Получено 29.11.2018

Сухоручкіна О.М., старш. наук. співроб.,
відд. системних інформаційних технологій
e-mail: sukhoru@irtc.org.ua

Прогонний М.В., наук. співроб.,
відд. системних інформаційних технологій
e-mail: progonny@gmail.com

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

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ТА ВІРТУАЛЬНИХ ПРАКТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З РОБОТОТЕХНІКИ

Вступ. Розглянуто проблему своєчасного оновлення лабораторних засобів для досліджень і навчання з робототехніки та інтелектуальних технологій. Запропоновано інформаційну технологію організації лабораторного комплексу з двома типами компонентів — дистанційно керованого робототехнічного обладнання та віртуальних засобів для проведення відповідних практичних досліджень. Сьогодні саме такі підходи стають найоптимальнішими для забезпечення дослідницьких та навчальних процесів сучасними ресурсами набуття практичного досвіду за науковими напрямками, які швидко розвиваються.

Метою статті є аналіз можливостей інформаційних технологій в організації віддаленого доступу до фізичного обладнання та віртуальних засобів для практичних досліджень і навчання з робототехніки.

Методи. Використано методики розподілених інформаційних та обчислювальних процесів, комунікаційні протоколи та програмування веб-застосунків.

Результати. Розглянуто два типи спеціалізованих засобів нашого лабораторного комплексу — фізичне обладнання з дистанційним доступом та віртуальні середовища. Наведено загальні структури обладнання, що складається з автономного мобільного робота і сенсорного модуля, які можуть використовуватися дистанційно для певних досліджень і практичних занять. Показано деякі приклади веб-застосунків, які призначено для ознайомлення з певними видами робототехнічних систем за їх 3D моделями та виконання відповідних практичних завдань з автоматичною перевіркою результатів.

Висновки. Використання компонентів лабораторного комплексу за створеною технологією приводить до своєчасного поширення ресурсів проведення на сучасному рівні досліджень та відповідних практичних робіт навчального характеру з робототехніки та інтелектуальних технологій студентами багатьох технічних університетів України.

Ключові слова: *робототехніка, технології дистанційного керування, віртуальна лабораторія, веб-застосунки.*

Сухоручкина О.Н., старш. науч. сотр.,
отд. системных информационных технологий
e-mail: sukhoru@irtc.org.ua

Прогонный Н.В., науч. сотр.,
отд. системных информационных технологий
e-mail: progonny@gmail.com

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

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ И ВИРТУАЛЬНЫХ ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РОБОТОТЕХНИКЕ

Рассмотрена проблема своевременного обновления лабораторных средств для обучения и исследований по робототехнике и интеллектуальным информационным технологиям. Предложена технология организации лабораторного комплекса с двумя типами компонентов — программно-аппаратное оборудование с дистанционным управлением и программные веб-приложения для практических занятий в виртуальной среде. Приведено общее структурное описание действующего оборудования в виде мобильного робота и сенсорного модуля. Показано несколько примеров веб-приложений, позволяющих ознакомиться с пространственными моделями определенных видов робототехнических систем и выполнить конкретные практические задания с возможностью автоматической проверки полученного результата.

Ключевые слова: робототехника, технологии дистанционного управления, виртуальная лаборатория, веб-приложения.

DOI: [https:// 10.15407/kvt195.01.036](https://10.15407/kvt195.01.036)

UDC 550:531; 681.51

ЄФИМЕНКО М.В., канд. техн. наук,
доцент Запорізького національного технічного університету,
Головний конструктор
e-mail: nefimenko@gmail.com
Науково-виробниче підприємство «Хартрон-ЮКОМ»,
пр. Соборний, 166, м. Запоріжжя, 69035, Україна

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ РУХОМ ТОЧКИ ПО СФЕРІ

Вступ. Є ряд об'єктів керування, рух яких у просторі можна інтерпретувати як рух точки по сфері заданого радіусу. Як приклад такого руху можна привести кутовий рух космічного апарата. Якщо для опису кутового руху КА використовувати кватерніон орієнтації і його похідну, то кутовий рух можна представити у вигляді руху точки по одиничній сфері в просторі R^4 . При керуванні такими об'єктами становлять інтерес методи розв'язання задач керування рухом точки по одиничній сфері в просторі R^n .

Метою статті є розроблення методів розв'язування таких задач керування рухом точки по сфері: задачі стабілізації руху точки по сфері щодо програмної траєкторії; задачі про швидкодію у разі руху точки по сфері; задачі термінального керування.

Основним результатом є методи розв'язки різних задач керування рухом точки вздовж сфери.

Висновки. В роботі з використанням основних властивостей руху точки по сфері наведено розв'язки таких задач керування: задачі стабілізації руху точки по сфері щодо програмної траєкторії; задачі про швидкодію у разі руху точки по сфері; задачі термінального керування. Застосування отриманих результатів продемонстровано на прикладі розв'язання задачі стабілізації кутового руху космічного апарата відносно заданої опорної системи координат. Отримані результати можуть бути корисними для розроблення різних систем керування, зокрема систем керування кутовим рухом космічного апарата.

Ключові слова: сфера, керування, проекція точки, кватерніон.

ВСТУП

Є ряд об'єктів керування, рух яких у просторі R^n можна інтерпретувати як рух точки по сфері заданого радіусу. Як приклад такого руху можна навести кутовий рух космічного апарата (КА). Якщо для опису кутового руху КА використовувати кватерніон орієнтації і його похідну, то кутовий рух можна подати у вигляді руху точки по одиничній сфері в просторі R^4 . Вперше цей підхід було використано у роботі [1], в якій із застосуванням

псевдообернених і проекційних матриць [2–4] було отримано динамічне рівняння для кватерніону, яке описує множину керованих переміщень точки на поверхні сфери одиничного радіуса в просторі R^4 . Подальший розвиток цей напрям отримав у роботі [5], де було досліджено властивості динамічного рівняння для кватерніону і запропоновано загальні підходи до розв'язання задач керування орієнтацією супутника з використанням цього рівняння. В зазначених роботах було запропоновано способи розв'язання задач керування рухом точки по сфері для випадку чотиривимірної одиничної сфери. У роботі отримано результати, узагальнені на випадок n -мірної одиничної сфери. У загальному випадку рівняння руху точки по сфері в просторі R^n має такий вигляд:

$$\ddot{X}_0 = (I_n - X_0 \cdot X_0^T) \cdot f - X_0 \cdot \|\dot{X}_0\|^2,$$

де $f \in R^n$ — вектор керування, $X_0 \in R^n$ — нормований вектор, що задає положення точки на сфері; I_n — одинична матриця розміру $n \times n$.

Рівняння (1) описує безліч керованих переміщень точки на поверхні сфери заданого радіуса в n -вимірному просторі. В роботі [5] для цього рівняння доведено такі твердження.

Твердження 1. Нехай задано нелінійну систему диференціальних рівнянь $X^{(m)} = F(X, \dot{X}, \ddot{X}, \dots, X^{(m-1)})$. Будемо розглядати компоненти вектора $X(t) \in R^n$ як координати однойменної точки, яка рухається у просторі R^n за деякою траєкторією, яка визначається вектором $X(t)$. Водночас вектор функції $X(t)$, $t \in [t_0, t_1]$ задовольняє умові $\|X(t)\| \neq 0$. Тоді рух проекції цієї точки на одиничну сферу в просторі R^n , яка визначається ортом $X_0(t) = \frac{X(t)}{\|X(t)\|}$ вектору $X(t)$, описується рівнянням

$$\ddot{X}_0 = (I_n - X_0 \cdot X_0^T) \cdot f - X_0 \cdot \|\dot{X}_0\|^2, \quad f = \frac{\ddot{X}}{\delta} - 2 \frac{\dot{\delta}}{\delta} \dot{X}_0 + \alpha X_0,$$

$$\delta = \sqrt{X^T \cdot X}, \quad \dot{\delta} = X_0^T \cdot \dot{X},$$

в якому змінна $\alpha(t)$ є довільною скалярною функцією часу.

Твердження 2. Нехай на одиничній сфері у просторі R^n задано точку $X_0(t)$, рух якої описується рівнянням $\ddot{X}_0 = (I_n - X_0 \cdot X_0^T) \cdot f - X_0 \cdot \|\dot{X}_0\|^2$. Одиничному вектору $X_0(t)$ можна поставити у відповідність вектор $X(t)$, зміна координат якого в часі описується системою рівнянь $\ddot{X}(t) = \Psi$, де відповідно до твердження 1, функція $\Psi(t)$ має вигляд $\Psi(t) = \delta f + 2 \dot{\delta} \dot{X}_0 + \alpha X_0$, $\delta = \sqrt{X^T \cdot X}$. Якщо в початковий момент часу виконуються співвідношення $X(t_0) = X_0(t_0)$, $\dot{X}(t_0) = \dot{X}_0(t_0)$, то є взаємно-однозначна відповідність між векторами $X_0(t)$ і $X(t)$, яка визначається виразами

$$X_0(t) = \frac{X(t)}{\delta}, \quad \dot{X}_0(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{X(t)}{\delta} \right) = (I_n - X_0(t) X_0^T(t)) \frac{\dot{X}(t)}{\delta},$$

$$X(t) = \delta X_0(t), \quad \dot{X}(t) = \delta \dot{X}_0(t) + \delta \dot{X}_0(t).$$

Твердження 3. Нехай на одиничній сфері у просторі R^n задано точку $X_0(t)$, рух якої описується рівнянням $\ddot{X}_0 = \Theta$, де прискорення точки Θ визначається виразом $\Theta = (I_n - X_0 X_0^T) f - X_0 \|\dot{X}_0\|^2$, а вектор f є вектором керування. Тоді вектори Θ та f пов'язані співвідношенням $f = \Theta + \alpha \cdot X_0$, де змінна α — довільна скалярна функція.

У роботі разом з використанням тверджень 1–3 запропоновано методи розв'язання основних задач керування рухом точки по одиничній сфері у просторі R^n , а саме:

- задача стабілізації руху точки відносно програмної траєкторії;
- задача про швидкодію;
- задача термінального керування.

СТАБІЛІЗАЦІЯ РУХУ ТОЧКИ ПО СФЕРІ ВІДНОСНО ПРОГРАМНОЇ ТРАЄКТОРІЇ

Постановка задачі. Нехай на одиничній сфері у просторі R^n задано точку $X_0(t)$, рух якої описується рівнянням

$$\ddot{X}_0 = (I_n - X_0 \cdot X_0^T) \cdot f - X_0 \cdot \|\dot{X}_0\|^2,$$

і задано програмну траєкторію руху цієї точки рівнянням

$$\ddot{X}_0^* = (I_n - X_0^* \cdot X_0^{*T}) \cdot f^* - X_0^* \cdot \|\dot{X}_0^*\|^2,$$

де f^* — задане програмне керування.

Розглянемо таку задачу: знайти закон керування f , який забезпечує асимптотичну стійкість за Ляпуновим положенню рівноваги:

$$X_0 = X_0^*.$$

Рішення поставленої задачі. Відповідно до твердження 3, рівняння руху точок $X_0(t)$ і $X_0^*(t)$ можна подати у вигляді:

$$\ddot{X}_0 = f - \alpha(t) X_0, \quad (1)$$

$$\ddot{X}_0^* = f^* - \alpha(t) X_0^*. \quad (2)$$

Так як $\alpha(t)$ є довільною скалярною функцією, то для пошуку закону керування покладемо її рівною нулю:

$$\alpha(t) = 0.$$

У цьому випадку рівняння (1–2) приймають вигляд:

$$\ddot{X}_0 = f, \quad (3)$$

$$\ddot{X}_0^* = f^*. \quad (4)$$

Введемо у розгляд помилку керування

$$E = X_0 - X_0^*.$$

З урахуванням (3–4) рівняння помилки має вигляд:

$$\ddot{E} = \Delta f. \quad (5)$$

У рівнянні (5)

$$\Delta f = f - f^* \quad (6)$$

з виразу (6) маємо

$$f = f^* + \Delta f.$$

Система рівнянь (5) є розділеною системою з n інтегровальних ланок другого порядку. Входами цих ланок є керувальні сигнали Δf_i . Для i -ої ланки ($i = 1, 2 \dots n$) можна записати рівняння

$$\ddot{e}_i = \Delta f_i, \quad (7)$$

де e_i — i -та координата вектору помилки E , Δf_i — i -та координата вектору Δf .

Визначимо Δf_i як:

$$\Delta f_i = -k_{i1} \cdot e_i - k_{i2} \dot{e}_i. \quad (8)$$

Підставивши (8) в (7), отримаємо

$$\ddot{e}_i = -k_{i1} e_i - k_{i2} \dot{e}_i. \quad (9)$$

Система (9) є лінійною системою другого порядку і для того, щоб вона була асимптотично стійкою, необхідно і достатньо, щоб виконувалися умови

$$k_{i1} > 0, \quad k_{i2} > 0. \quad (10)$$

У разі виконання умов (10) керування $f = f^* + \Delta f$, де елементи вектору Δf визначаються виразом (8), забезпечує асимптотичну стійкість положенню рівноваги $X_0 = X_0^*$.

Для практичного використання закону керування (5) коефіцієнти k_{i1} і k_{i2} можна знайти, використовуючи відповідні методи теорії лінійних систем автоматичного керування [6]. На підставі вищевикладеного справедливим буде таке твердження.

Твердження 4. Нехай на одиничній сфері у просторі R^n задано точку $X_0(t)$, рух якої описується рівнянням $\dot{X}_0 = (I_n - X_0 X_0^T) \cdot f - X_0 \cdot |\dot{X}_0|^2$ і задано програмну траєкторію руху цієї точки рівнянням $\ddot{X}_0^* = (I_n - X_0^* X_0^{*T}) \cdot f^* - X_0^* \cdot |\dot{X}_0^*|^2$. Тоді закон керування

$$f = -K_1 E - K_2 \dot{E} + f^*,$$

$$E = X_0 - X_0^*, \quad \dot{E} = \dot{X}_0 - \dot{X}_0^*,$$

$$K_1 = \text{diag}(k_{i1}), \quad K_2 = \text{diag}(k_{i2}), \quad i=1, 2, \dots, n,$$

де $k_{i1} > 0$, $k_{i2} > 0$ забезпечує асимптотичну стійкість положенню рівноваги $X_0 = X_0^*$.

ШВИДКОДІЯ ПІД ЧАС РУХУ ТОЧКИ ПО СФЕРІ

Постановка задачі. Для рівняння $\ddot{X}_0 = (I_n - X_0 X_0^T) \cdot f - X_0 \cdot |\dot{X}_0|^2$ знайти керування $f(t)$, яке забезпечує переведення точки з поточного стану $X_0(t_0)$, $\dot{X}_0(t_0)$ в заданий стан $X_0(t_1)$, $\dot{X}_0(t_1)$ за мінімально можливий час.

Розв'язання поставленої задачі. Відповідно до твердження 2, вектору X_0 можна поставити у відповідність вектор $X(t) \in R^n$ (ненормований вектор), рух якого у просторі R^n описується такою системою диференціальних рівнянь:

$$\ddot{X} = \Psi. \quad (11)$$

Будемо вважати, що для вектору X і його похідної \dot{X} задано такі граничні умови для моментів часу t_0 і t_1 :

$$X(t_0) = X_0(t_0), \quad \dot{X}(t_0) = \dot{X}_0(t_0),$$

$$X(t_1) = X_0(t_1), \quad \dot{X}(t_1) = \dot{X}_0(t_1).$$

У цьому випадку між векторами X_0 і X є взаємно однозначна відповідність. Визначимо програмну траєкторію руху точки по сфері (вектор $X_0(t)$) у такий спосіб:

$$X_0(t) = \frac{X(t)}{\|X(t)\|}. \quad (12)$$

Для визначення траєкторії руху рівнянням (12) задачу про переведення точки $X_0(t)$ з поточного стану $X_0(t_0)$, $\dot{X}_0(t_0)$ в заданий стан $X_0(t_1)$, $\dot{X}_0(t_1)$ за мінімальний проміжок часу можна сформулювати таким чином: для системи (11) знайти закон керування $\Psi(t)$, який переводить систему

зі стану $X(t_0)=X_0(t_0)$, $\dot{X}(t_0)=\dot{X}_0(t_0)$ в момент часу t_0 в стан $X(t_1)=X_0(t_1)$, $\dot{X}(t_1)=\dot{X}_0(t_1)$ в момент часу t_1 за мінімально можливий проміжок часу за умови обмеження $\|\Psi(t)\|\leq\psi_0$. Рівняння (11) має дуже простий вигляд і для нього існує аналітичний розв'язок задачі про швидкодію [7], тобто є вирази для розрахунку векторів $X(t)$, $\dot{X}(t)$ і $\Psi(t)$. Водночас, так як вектор X_0 є ортом вектору X , то в момент часу t_1 вектор X_0 і його похідна \dot{X}_0 приймуть задане значення $X_0(t_1)$, $\dot{X}_0(t_1)$. Відповідно до твердження 1, для вектору $X_0(t_0)$ є справедливим рівняння

$$\ddot{X}_0 = (I_n - X_0 X_0^T) \left(\frac{\Psi}{\delta} - 2 \frac{\dot{\delta}}{\delta} \dot{X}_0 \right) - X_0 \cdot \|\dot{X}_0\|^2, \delta = \|X_0\|.$$

Отже, керування $f = \frac{\Psi}{\delta} - 2 \frac{\dot{\delta}}{\delta} \dot{X}_0$ забезпечує переміщення точки X_0 по одиничній сфері зі стану $X_0(t_0)$, $\dot{X}_0(t_0)$ в заданий стан $X_0(t_1)$, $\dot{X}_0(t_1)$ за мінімально можливий проміжок часу. Маючи аналітичний розв'язок задачі про швидкодію для системи (11), можна легко знайти керування f . На підставі вищесказаного, справедливо таке твердження.

Твердження 5. Нехай на одиничній сфері у просторі R^n задано точку $X_0(t)$, рух якої описується рівнянням $\ddot{X}_0 = (I_n - X_0 X_0^T) \cdot f - X_0 \cdot |\dot{X}_0|^2$. Тоді керування $f = \frac{\Psi(t)}{\delta(t)} - 2 \frac{\dot{\delta}(t)}{\delta(t)} \dot{X}_0(t)$, де вектор $\Psi(t)$ знаходиться як розв'язок задачі про швидкодію для системи $\ddot{X} = \Psi$, переводить точку $X_0(t)$ з поточного стану $X_0(t_0)$, $\dot{X}_0(t_0)$ в заданий стан $X_0(t_1)$, $\dot{X}_0(t_1)$ за мінімальний час.

ТЕРМІНАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ

Постановка задачі. Нехай на одиничній сфері у просторі R^n задано точку $X_0(t)$, рух якої описується в R^n рівнянням

$$\ddot{X}_0 = (I_n - X_0 X_0^T) \cdot f - X_0 \cdot |\dot{X}_0|^2.$$

Необхідно знайти керування f , яке переводить точку $X_0(t)$ зі стану $X_0(t_0)$, $\dot{X}_0(t_0)$ в момент часу t_0 в стан $X_0(t_1)$, $\dot{X}_0(t_1)$ в момент часу t_1 . Моменти часу t_0 і t_1 є фіксованими. В літературі ця задача є відомою як задача термінального керування.

Розв'язок поставленої задачі. Введемо у розгляд допоміжний вектор $X(t) \in R^n$ (ненормований вектор), рух якого у просторі R^n описується системою диференціальних рівнянь

$$X^{(m)} = F(X, \dot{X}, \ddot{X}, \dots, X^{(m)}, \Psi), \quad (13)$$

де Ψ — вектор керування. Будемо вважати, що для вектору X і його похідної \dot{X} задано граничні умови для моментів часу t_0 і t_1 .

$$X(t_0) = X_0(t_0), \quad \dot{X}(t_0) = \dot{X}_0(t_0),$$

$$X(t_1) = X_0(t_1), \quad \dot{X}(t_1) = \dot{X}_0(t_1).$$

Визначимо траєкторію руху точки по сфері (вектор $X_0(t)$) у такий спосіб:

$$X_0(t) = \frac{X(t)}{\|X(t)\|}. \quad (14)$$

Для визначення траєкторії руху рівнянням (14) задачу про переведення то-чкі з поточного стану на сфері в заданий стан на сфері можна сформулювати таким чином: знайти закон керування $\Psi(t)$, який переводить систему

$$X^{(m)} = F(X, \dot{X}, \ddot{X}, \dots, X^{(m)}, \Psi)$$

зі стану $X(t_0) = X_0(t_0)$, $\dot{X}(t_0) = \dot{X}_0(t_0)$ в момент часу t_0 в стан $X(t_1) = X_0(t_1)$, $\dot{X}(t_1) = \dot{X}_0(t_1)$ в момент часу t_1 і забезпечує мінімум функціоналу

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^{t_1} \varphi(X, \Psi) dt$$

Моменти часу t_0 і t_1 є фіксованими. Для знаходження необхідної траєкторії необхідно визначитися з виглядом правої частини рівняння (13). У загальному випадку, праву частину рівняння (13) можна вибирати довільно, оскільки через дві точки на сфері можна провести нескінченну кількість траєкторій, відповідних нескінченній кількості правих частин рівняння вектору X . У виборі моделі руху вектору $X(t)$ єдиною обов'язковою вимогою є існування аналітичного розв'язку поставленої вище задачі оптимального керування. Знайдений вектор $X_0(t) = \frac{X(t)}{\|X(t)\|}$ приймемо за траєкторію переведення вектору з поточного стану на сфері в потрібний стан. Для знаходження керування f , яке забезпечує рух уздовж заданої траєкторії, скористаємося твердженням 1. Відповідно до твердження 1 існує нормований вектор $X_0 = \frac{1}{\delta} \cdot X$, де $\delta = \|X(t)\|$, рух якого описується рівнянням

$$\ddot{X}_0 = (I_n - X_0 X_0^T) \cdot f - X_0 \cdot \|\dot{X}_0\|^2,$$

де $f = \frac{\ddot{X}}{\delta} - 2 \frac{\dot{\delta}}{\delta} \dot{X}_0 + \alpha X_0$. Так як α — довільна скалярна функція, то приймемо її рівною нулю. Тоді отримаємо

$$f = \frac{\ddot{X}}{\delta} - 2\frac{\dot{\delta}}{\delta}\dot{X}_0. \quad (15)$$

У виразі (15) вектор \dot{X}_0 можна знайти за формулою

$$\dot{X}_0 = (I_n - X_0 X_0^T) \frac{\dot{X}}{\delta}.$$

За визначенням керування Ψ вибрано таким чином, що початок і кінець траєкторії руху точки X знаходяться на одиничній сфері. Водночас в момент часу t_1 для вектору X буде виконуватися співвідношення

$$X(t_1) = X_0(t_1), \quad \dot{X}(t_1) = \dot{X}_0(t_1).$$

Так як вектор X_0 є ортом вектору X , то в момент часу t_1 вектор X_0 і його похідна \dot{X}_0 приймуть задане значення $X_0(t_1)$, $\dot{X}_0(t_1)$. Отже, керування f забезпечує переміщення точки X_0 по одиничній сфері зі стану $X_0(t_0)$, $\dot{X}_0(t_0)$ в заданий стан $X_0(t_1)$, $\dot{X}_0(t_1)$ за фіксований час $\tau = t_1 - t_0$. Тоді є справедливим таке твердження.

Твердження 6. Нехай у просторі R^n задано точку X , рух якої описується диференціальним рівнянням

$$\dot{X}^{(m)} = F(X, \dot{X}, \ddot{X}, \dots, X^{(m)}, \Psi),$$

і $\Psi \in R^n$ є вектором керування. Для вектору X і його похідних до $m-1$ порядку включно задані граничні умови для фіксованих моментів часу t_0 і t_1 . До того ж

$$X(t_0) = X_0(t_0), \quad \dot{X}(t_0) = \dot{X}_0(t_0),$$

$$X(t_1) = X_0(t_1), \quad \dot{X}(t_1) = \dot{X}_0(t_1),$$

де $X_0(t_0) = \frac{X(t_0)}{\|X(t_0)\|}$. Для заданих граничних умов знайдено вектор керування Ψ , який переводить вектор X і його похідні до $m-1$ порядку включно зі стану в момент часу t_0 в стан в момент часу t_1 . Моменти часу t_0 і t_1 є заданими. Тоді керування

$$f = \frac{\ddot{X}}{\delta} - 2\frac{\dot{\delta}}{\delta}\dot{X}_0, \quad \delta = \|X(t)\|$$

забезпечує переміщення точки X_0 за фіксований час $\tau = t_1 - t_0$ зі стану $X_0(t_0)$, $\dot{X}_0(t_0)$ в заданий стан $X_0(t_1)$, $\dot{X}_0(t_1)$.

ЗАДАЧА СТАБІЛІЗАЦІЇ КУТОВОГО РУХУ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ ВІДНОСНО ЗАДАНОЇ ОПОРНОЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТ

Застосування запропонованих способів розв'язання задач керування рухом точки на сфері продемонструємо на прикладі розв'язання задачі стабілізації кутового руху космічного апарату відносно заданої опорної системи координат. Як вже йшлося вище, якщо для опису кутового руху КА використувати кватерніон орієнтації і його похідну, то кутовий рух можна подати у вигляді такого рівняння руху точки по одиничній сфері у просторі R^4 [1]:

$$\ddot{A} = (I_4 - A \cdot A^T) U - A \cdot \|\dot{A}\|^2,$$

де A — векторна форма подання кватерніона зі скалярною частиною λ_0 і векторною частиною $\lambda \in R^3$, яка визначає орієнтацію зв'язаної з КА системи координат відносно опорної; $U \in R^4$ — вектор кватерніоного керування, зв'язаний з моментом керування $M_u \in R^3$ виконавчих органів залежністю [8]

$$M_u = 2JA(A)U + \omega \times J\omega,$$

де ω — вектор абсолютної кутової швидкості КА; J — тензор інерції; $A(A)$, $\Phi(\lambda)$ — матриці вигляду

$$A = (-\lambda \quad \lambda_0 I_3 - \Phi(\lambda)), \quad \Phi(x) = \begin{pmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Розглянемо таку задачу: знайти керування U , яке забезпечує асимптотичну стійкість режиму тривісної орієнтації $A = (1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$.

Так як рівняння для вектора A є рівнянням руху точки по одиничній сфері у просторі R^4 , тоді для цього рівняння є справедливим твердження 4. Згідно з цим твердженням, закон керування

$$\begin{aligned} U &= -K_1 E - K_2 \dot{E}, \\ E &= A - A^*, \quad \dot{E} = \dot{A}, \\ A^* &= (1 \ 0 \ 0 \ 0)^T \end{aligned}$$

забезпечує асимптотичну стійкість положенню рівноваги $A = A^*$. Було проведено чисельне моделювання роботи запропонованого закону керування. Для КА, який знаходиться на круговій орбіті, проведено моделювання процесу побудови орбітальної орієнтації. Передбачалося, що на борту супутника є інформація про поточні значення кватерніона A і вектора кутової швидкості ω . Початкові умови для побудови орієнтації були такі: кут тангажу дорівнює мінус 90 градусів, кут крену — плюс 60 градусів, кут ривання — плюс 90 градусів. Залежність кутів орієнтації від часу зображено на рис. 1. Відповідні кутові швидкості зображено на рис. 2.

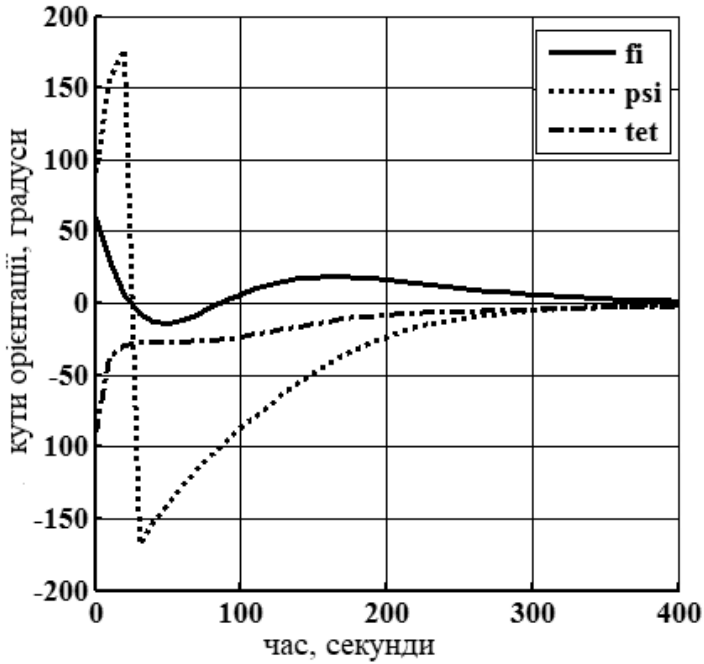


Рис. 1. Кути орієнтації КА відносно орбітальної системи координат

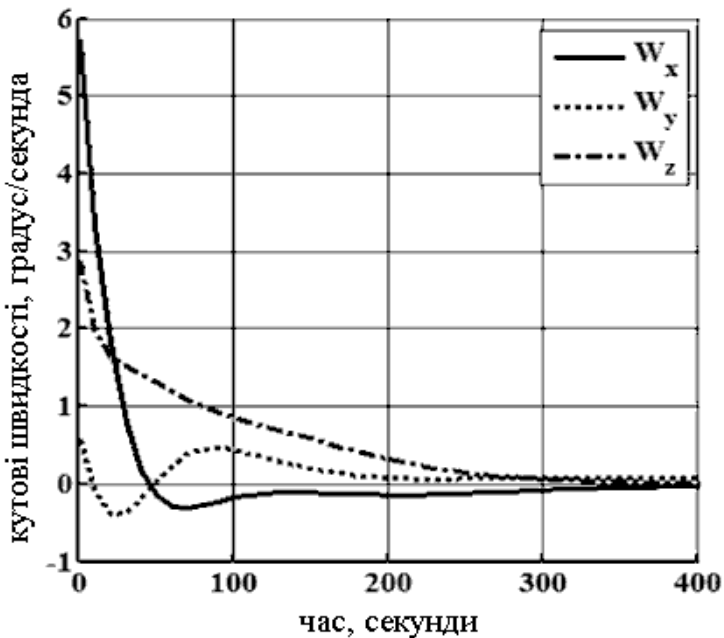


Рис. 2. Абсолютні кутові швидкості КА

Отже, як видно з наведених графіків, параметри кутового руху наприкінці перехідного процесу відповідають режиму орбітальної орієнтації. Це підтверджує працездатність запропонованих алгоритмів.

ВИСНОВКИ

З врахуванням основних властивостей руху точки по сфері запропоновано методи розв'язання задач керування рухом точки по сфері в n -вимірному просторі. Знайшли розв'язок такі задачі керування:

- задачі стабілізації руху точки відносно програмної траєкторії;
- задачі про швидкодію;
- задачі термінального керування.

На прикладі керування кутовим рухом космічного апарата продемонстровано працездатність способів побудови законів керування рухом точки по сфері. Отримані результати можуть бути корисними під час розроблення різних систем керування, зокрема систем керування кутовим рухом КА.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кириченко Н.В., Матвиенко В.Т. Алгоритмы асимптотической, терминальной и адаптивной стабилизации вращательных движений твердого тела. *Проблемы управления и информатики*. 2003. № 1. С. 5–15.
2. Кириченко Н.Ф., Лепеха Н.П. Возмущение псевдообратных и проекционных матриц и их применение к идентификации линейных и нелинейных зависимостей. *Проблемы управления и информатики*. 2001. № 1. С. 6–22.
3. Кириченко Н.Ф., Лепеха Н.П. Псевдообращение в задачах управления и наблюдения. *Автоматика*. 1993. № 5. С. 69–81.
4. Кириченко Н.Ф., Матвиенко В.Т. Оптимальный синтез структур для линейных систем. *Проблемы управления и информатики*. 1996. № 1–2. С. 162–171.
5. Єфименко Н.В. Математическая модель углового движения КА в параметрах Родрига-Гамильтона и ее свойства. *Электронное моделирование*. 2018. Т. 40. №6. С. 21–36.
6. Х. Квакернаак, Р.Сиван. Линейные оптимальные системы управления. М: Мир, 1977. 650 с.
7. Єфименко Н.В. Синтез оптимального по времени пространственного разворота космического аппарата с использованием динамического уравнения вращательного движения твердого тела в параметрах Родрига-Гамильтона. *Проблемы управления и информатики*. 2017. №3. С. 109–128.
8. Єфименко Н.В. Синтез алгоритмов управления пространственной переориентацией космического аппарата с использованием динамических уравнений вращательного движения твердого тела в параметрах Родрига-Гамильтона. *Проблемы управления и информатики*. 2015. №3. С. 145–155.

Отримано 27.11.2018

REFERENCES

1. Kirichenko N.V., Matvienko V.T. Algorithms of asymptotic terminal and adaptive stabilization of the rotational motions of a rigid body. *Problems of Control and Informatics*. 2003. No 1. P. 5–15. (in Russian).
2. Kirichenko N.F., Lepekha N.P. Perturbation of pseudoinverse and projection matrices and their application to the identification of linear and nonlinear dependencies. *Problems of Control and Computer Science*. 2001. № 1. P. 6–22.
3. Kirichenko N.F., Lepekha N.P. Pseudo-inversion in control and observation problems. *Automation*. 1993. № 5. P. 69–81.
4. Kirichenko N.F., Matvienko V.T. Optimal synthesis of structures for linear systems. *Problems of Control and Informatics*. 1996. № 1–2. P. 162–171.
5. Yefimenko N.V. Mathematical model of the angular motion of the spacecraft in the parameters of Rodrigues-Hamilton and its properties. *Electronic modeling*. 2018. Vol. 40. No 6. P. 21–36 (in Russian).
6. X. Quakernaak, R. Sivan. *Linear optimal control systems*. Moscow: Mir, 1977. 650 p. (in Russian).

7. Yefimenko N.V. Synthesis of the space-optimal time-reversal of a spacecraft using the dynamic equation of the rotational motion of a rigid body in the Rodrig Hamilton parameters. *Problems of Control and Computer Science*. 2017. No 3. P. 109–128. (in Russian).
8. Yefimenko N.V. Synthesis of spacecraft reorientation control algorithms using the dynamic equations of the rotational motion of a rigid body in the Rodrig Hamilton parameters. *Problems of Control and Computer Science*. 2015. No 3. P. 145–155. (in Russian).

Received 27.11.2018

Yefymenko M.V., PhD.,
associate professor of Zaporizhzhya National Technical University,
Chief Designer
e-mail: nefimenko@gmail.com
Scientific Production Enterprise "HARTRON-YUKOM"
Soborny av., 166, Zaporozhye, 69035, Ukraine

SOLUTION OF THE PROBLEMS OF CONTROLLING THE MOTION OF A POINT ON A SPHERE

Introduction. *There are a number of control objects, the movement of which in space can be interpreted as the movement of a point along a sphere of a given radius. As an example of such a motion, the angular motion of a spacecraft can be considered. Using the orientation quaternion and its derivative to describe the angular motion of a spacecraft, the angular motion can be represented as the motion of a point along a unit sphere in R^4 .*

While controlling such objects, the methods for solving the basic problems of controlling the motion of a point along the unit sphere in the R^n space are of interest.

The purpose of the article is to build the following algorithms for controlling the motion of a point along the sphere:

- algorithm of a point motion stabilization with respect to program trajectory;
- algorithm of a point relocation from the current position to a specified position in minimum time;
- algorithm of a point relocation from the current position to a specified position in fixed time.

Results. *The methods for solving the various problems of controlling the motion of a point along the sphere have been proposed.*

Conclusion. *On the basis of main properties of point along the sphere movement, the methods for solving the problems of controlling the motion of a point along the unit sphere in n -dimensional space have been proposed. Using the proposed methods, the solutions for the following control tasks have been found:*

- problems of stabilizing the motion of a point along the sphere with respect to program trajectory;
- speed problems taking place when a point moves on along the sphere;
- problems of a point on the sphere relocation from the current position to a specified position in fixed time.

The efficiency of the proposed algorithms has been demonstrated on the example of spacecraft angular motion control. The results obtained can be applicable in the development of various control systems, the spacecraft angular motion control systems in particular.

Keywords: *sphere, control, point projection, quaternion.*

Єфименко Н.В., канд. техн. наук,
доцент Запорожского национального технического университета
главный конструктор
e-mail: nefimenko@gmail.com
НПП «ХАРТРОН-ЮКОМ»,
пр. Соборный, 166, г. Запорожье, 69035, Украина

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТОЧКИ ПО СФЕРЕ

Введение. Существует целый ряд объектов управления, движение которых в пространстве можно интерпретировать как движение точки по сфере заданного радиуса. Как пример такого движения можно привести угловое движение космического аппарата (КА). Если для описания углового движения КА использовать кватернион ориентации и его производную, то угловое движение можно представить в виде движения точки по единичной сфере в пространстве R^4 . При управлении такими объектами представляют интерес методы решения задач управления движением точки по единичной сфере в пространстве R^n .

Целью статьи является разработка методов решения следующих задач управления движением точки по сфере: задачи стабилизации движения точки по сфере относительно программной траектории; задачи о быстродействии при движении точки по сфере; задачи терминального управления.

Основным результатом являются методы решения различных задач управления движением точки вдоль сферы.

Выводы. В работе с использованием основных свойств движения точки по сфере приведены решения следующих задач управления: задачи стабилизации движения точки по сфере относительно программной траектории; задачи о быстродействии при движении точки по сфере; задачи терминального управления. Применение полученных результатов продемонстрировано на примере решения задачи стабилизации углового движения космического аппарата относительно заданной опорной системы координат. Полученные результаты могут быть полезны при разработке различных систем управления, в том числе систем управления угловым движением КА.

Ключевые слова: сфера, управление, проекция точки, кватернион.

DOI: [https:// 10.15407/kvt195.01.049](https://10.15407/kvt195.01.049)

UDC 62.50

MILIAVSKYI Yu.L., Senior Lecturer,
Department of the Mathematical Methods
of System Analysis
e-mail: yuriy.milyavsky@gmail.com
National Technical University of Ukraine
“I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37 Peremohy av., Kyiv, 03056, Ukraine

IDENTIFICATION IN COGNITIVE MAPS IN IMPULSE PROCESS MODE WITH INCOMPLETE MEASUREMENT OF NODES COORDINATES

Introduction. Cognitive map is a popular way of modeling complex multivariate systems. Usually weights coefficients of edges connecting the cognitive map nodes are suggested by experts. But such a method is always inaccurate. In case when nodes coordinates are measured, there is the possibility for mathematical identification of these coefficients. However, the issue is that often not all nodes coordinates of a cognitive map are measured, but only a few of them. In this case the problem of identification is much more complicated.

The purpose of the article is to research and develop a method for identifying weights of cognitive map nodes in case when number of nodes is known, but not all of them are measured.

Results. Identification method based on 4SID method is suggested. It allows finding some realization of the system equivalent to the original cognitive map in its outputs, with the control observation matrices remaining unchanged. Invariants of the original and identified systems are analyzed. Practical example of identifying a cognitive map of an IT company is considered. It is shown what the accuracy of the suggested method depends on and under which conditions it is applicable.

Conclusions. As demonstrated in the research, the proposed method of identifying cognitive maps achieves almost full coincidence of measured coordinates between the original and the identified systems, although the incidence matrices themselves may not be equal. Invariants of the system, specifically eigenvalues, are identified with sufficient precision if the problem is well-conditioned, i.e. with sufficient number of measurable coordinates, sufficient number of measurement periods and low level of measurement noise. If these conditions are not fulfilled, the identification results become incorrect.

Keywords: cognitive map, identification, 4SID method, unmeasurable coordinates.

INTRODUCTION

Cognitive map (CM) is a weighted digraph that reflects basic concepts of a domain area and relations between these concepts via nodes and edges connecting them [1]. This paper continues the previous study [2] concerning an important recent problem of CM identification. Usually a CM, both structure and edges' weights, is composed by experts based on their experience and expectations. Naturally, the adequacy of such a model can always be questioned. However, in cases when there are historical data about some values of CM nodes coordinates, or when it is possible to conduct an experiment by feeding test signals to the system and measuring at least some of the nodes, the possibility of mathematical identification of a CM based on identification theory appears. This, of course, significantly increases credibility of the model and reliability of the results obtained based on it.

In [2] the case when all CM nodes coordinates are measured is studied. Three methods of identification, which differ in range of applicability and quality of obtained results, are considered. The first method is designed for a deterministic environment, when all CM nodes are measured precisely. The second method allows to obtain guaranteed intervals for estimates in case of limited measurement noise. However, it is applicable only for low noise level or with very well conditioned measurement matrix. The third method is the most common and is based on the least squares method. Theoretical and practical studies helped to find dependence of identification accuracy on ratio of noise to the useful signal, on duration of the observation interval, on period of duration of exciting test signals and on number of CM nodes for which these signals are fed. The regularization procedures proposed in the study ensure stability of the solutions obtained and increase the estimation accuracy when additional information about zero connections between some CM nodes is known.

However, in practice not all CM nodes are often measurable. Thus, the **purpose of this article** is to find a way to identify a CM when its structure is known but some of the coordinates of its nodes remain unmeasurable and the previously proposed methods cannot be applied.

PROBLEM STATEMENT

CM is identified in impulse process (IP) mode, i.e. during transient process in a complex system when some of its nodes are affected by disturbances (impulses). CM IP equation is written according to [1] as:

$$\Delta x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \Delta x_j(k), \quad (1)$$

where $\Delta x_i(k) = x_i(k) - x_i(k-1)$, a_{ij} — weight of the edge of CM connecting its j -th and i -th nodes, n — number of CM nodes. In vector–matrix form expression (1) is presented as:

$$\Delta \bar{X}(k+1) = A \Delta \bar{X}(k), \quad (2)$$

where A — transposed incidence matrix of CM composed of its edges' weights; $\Delta\bar{X}$ — vector of increments of nodes coordinates x_i . Difference equation (2) describes free (uncontrolled) motion of the complex system in the IP.

Suppose there is a possibility to affect some of the nodes directly via feeding external impulses to them (test or control signals). Let us have R such signals, i.e. we have vector \bar{u} with size R . Then equation of the forced motion in CM IP looks like:

$$\Delta\bar{X}(k+1) = A\Delta\bar{X}(k) + B\bar{u}(k), \tag{3}$$

where matrix $B(n \times R)$ is composed of zeros and ones in obvious way: $B = \begin{pmatrix} I_R \\ 0 \end{pmatrix}$

for corresponding enumeration of CM nodes in vector \bar{X} ; I_R — unit matrix with size $R \times R$.

Suppose also that some of the coordinates x_i are measurable and denote measurable subvector as \bar{Y} (with size M). Introduce measurement equation:

$$\Delta\bar{Y}(k) = C\Delta\bar{X}(k), \tag{4}$$

where matrix $C(M \times n)$ is composed of zeros and ones in obvious way: $C = \begin{pmatrix} I_M & 0 \end{pmatrix}$ for corresponding enumeration of CM nodes in vector \bar{X} , I_M — unit matrix with size $M \times M$.

Equations (3), (4) are a system of equations of a discrete dynamic system in state space.

Let number of nodes be known but existence and weight of connections between them be unknown. Then weight incidence matrix A to be identified is initially filled with apriori unknown coefficients

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

Identification problem is to find coefficients a_{ij} during CM IP described by state space model (3), (4).

CM IDENTIFICATION BY 4SID METHOD

For systems identification in state space so called 4SID (subspace state space) methods [3] are usually applied. They will be adapted to the stated problem in the present article.

Suppose measurements interval is long enough. More specifically, select N_1, N_2 so that $N_2 \geq N_1(R + M)$ and observe inputs and outputs of the system on the interval $N_2 + N_1$ sampling periods. Consider the following matrices composed of inputs and outputs on this interval:

$$U_{1,N_1} = \begin{bmatrix} \Delta\bar{u}(0) & \Delta\bar{u}(1) & \dots & \Delta\bar{u}(N_2-1) \\ \Delta\bar{u}(1) & \Delta\bar{u}(2) & \dots & \Delta\bar{u}(N_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta\bar{u}(N_1-1) & \Delta\bar{u}(N_1) & \dots & \Delta\bar{u}(N_2+N_1-2) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$Y_{1,N_1} = \begin{bmatrix} \Delta\bar{Y}(0) & \Delta\bar{Y}(1) & \dots & \Delta\bar{Y}(N_2-1) \\ \Delta\bar{Y}(1) & \Delta\bar{Y}(2) & \dots & \Delta\bar{Y}(N_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta\bar{Y}(N_1-1) & \Delta\bar{Y}(N_1) & \dots & \Delta\bar{Y}(N_2+N_1-2) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

where testing signals $\Delta\bar{u}$ are selected in such a way that U_{1,N_1} has full rank and is well-conditioned. It is desirable to select N_2 so that combined matrix of inputs and outputs $\begin{bmatrix} U_{1,N_1} \\ Y_{1,N_1} \end{bmatrix}$ is not too far from square matrix.

Question of the nature of input (testing) signals is rather important. It is well known that signals of white noise type or δ -functions are informative signals of infinite order. So we need to use those intervals which have input signal most similar to them. Those intervals which contain inputs which have low amplitude or are not volatile enough can be excluded.

Complex matrix $\begin{bmatrix} U_{1,N_1} \\ Y_{1,N_1} \end{bmatrix}$ is then RQ-decomposed with the following block representation of the decomposition:

$$\begin{bmatrix} U_{1,N_1} \\ Y_{1,N_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}.$$

For the block R_{22} SVD-decomposition is calculated, i.e.

$$R_{22} = U \cdot \Sigma \cdot V^T, \quad (7)$$

where Σ — square diagonal matrix composed of singular values of R_{22} on the main diagonal in decreasing order.

Let us represent the matrices in decomposition (7) in the following block form:

$$R_{22} = \begin{bmatrix} U_1 & | & U_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Sigma_1 & | & 0 \\ 0 & | & \Sigma_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^T \\ | \\ V_2^T \end{bmatrix},$$

where matrix U_1 has size $N_1M \times n$, matrix U_2 has size $N_1M \times (N_1M - n)$, matrix Σ_1 — $n \times n$, Σ_2 — $(N_1M - n) \times (N_1M - n)$, matrices V_1 and V_2 have corresponding sizes.

We will find some realization (A', B', C') of the system (3), (4) according to the realizations theory, without trying to find original system (A, B, C) at the beginning. Matrix A' is found out of the overdetermined system of matrix equations

$$U_1^{(1)} A' = U_1^{(2)}, \tag{8}$$

where matrix $U_1^{(1)}$ is submatrix of matrix U_1 without last M rows, and matrix $U_1^{(2)}$ is submatrix of matrix U_1 without the first M rows. Shift invariance property was used to obtain (8).

Here matrix U_1 is considered to be observability matrix for some realization, as follows from the realizations theory. Then matrix C' for this realization is the matrix consisting of the first M rows of matrix U_1 .

To find B' let us introduce auxiliary matrix $\Xi = U_2^T R_{21} R_{11}^{-1}$ (test signals should be selected so that R_{11} is invertible) and solve equation

$$\begin{bmatrix} U_2^T(1:M) & U_2^T(M+1:2M) & \dots & U_2^T(M(N_2-1)+1:MN_2) \\ U_2^T(M+1:2M) & U_2^T(2M+1:3M) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ U_2^T(M(N_1-1)+1:MN_1) & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_M & 0 \\ 0 & U_1^{(1)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Xi(1:R) \\ \Xi(R+1:2R) \\ \vdots \\ \Xi(R(N_1-1)+1:RN_1) \end{bmatrix}, \tag{9}$$

where for all matrices $D(a:b)$ denotes submatrix of matrix D from the a -th to the b -th columns.

Thus, the system is identified. But for practical application of the results we need to get closer to the original realization, specifically, to such a realization where matrices B, C have the form $B = \begin{pmatrix} I_R \\ 0 \end{pmatrix}$ and $C = (I_M \quad 0)$. Equations from the realizations theory that link different realizations via non-degenerate transition matrix T are helpful here:

$$A = T^{-1} A' T, \tag{10}$$

$$B' = T B, \quad C = C' T. \tag{11}$$

To find matrix T , that links the original realization (A, B, C) and the obtained realization (A', B', C') , we need to solve equations system (11) in which only matrix T with size $n \times n$ is unknown. The system is underdetermined if number of unknown variables is higher than number of equations, i.e. in our case if

$n^2 > n + M$ that is almost always true. Thus, it's sufficient to find any its solution to obtain T , and then to calculate A in the original realization from (10).

To estimate the quality of identification of the CM incidence matrix coefficients, comparison of the original and the obtained matrices A is not always advisable, since 4SID method ensures output equivalence of the original and identified systems (i.e. for any identical input both models give the same response), but the method does not guarantee the identity of the state matrices realizations. Therefore, it is desirable to compare original and identified systems on the basis of some invariants that are independent on any specific realization. It is obvious from (10) that the most natural invariants are eigenvalues, which are identical for the pair A, A' .

In addition to the eigenvalues, the controlled and observable system (3), (4) has other invariants that can be written in explicit form if the matrix A has a realization in Jordan form (the transition to which is a standard task). For simplicity, consider the case when the system does not have multiple eigenvalues. Then the matrix A has a real Jordan structure

$$A = \text{diag}(J_1, \dots, J_P),$$

where

$$J_p = \begin{pmatrix} \alpha_p & -\beta_p \\ \beta_p & \alpha_p \end{pmatrix}, \quad p = \overline{1, P}.$$

Here the unified form is used which combines real and complex eigenvalues. In case of real eigenvalue $\beta_p = 0$, and respective rows and columns are removed so that $J_p = \alpha_p$. Let matrices B and C (when A has Jordan realization) be composed of the coefficients $b_{rp}^c, b_{rp}^s, c_{mp}^c, c_{mp}^s$ according to the following rule:

$$B = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_r \ \dots \ b_R), \quad C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \\ \vdots \\ c_M \end{pmatrix},$$

where b_r is column vector, c_m is row vector written as $b_r^T = (b_{r1}^c \ b_{r1}^s \ b_{r2}^c \ b_{r2}^s \ \dots \ b_{rp}^c \ b_{rp}^s)$, $c_m = (c_{m1}^c \ c_{m1}^s \ c_{m2}^c \ c_{m2}^s \ \dots \ c_{mP}^c \ c_{mP}^s)$, in case of real eigenvalues coefficients with superscript s are absent.

Then the system in "input-output" form, based on Cauchy formula, is written as:

$$y_m(k) = \sum_{j=0}^k \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P h_p^{mr}(k-j)u_r(j), \quad m = \overline{1, M},$$

where $h_p^{mr}(s) = \rho_p[f_{mp}^{rc} \cos \omega_p(s-1) + f_{mp}^{rs} \sin \omega_p(s-1)]$,

$$f_{mp}^{rc} = c_{mp}^c b_{rp}^c + c_{mp}^s b_{rp}^s, \tag{12}$$

$$f_{mp}^{rs} = c_{mp}^c b_{rp}^s - c_{mp}^s b_{rp}^c, \tag{13}$$

$$\omega_p = \arccos \frac{\alpha_p}{\rho_p} = \arcsin \frac{\beta_p}{\rho_p}, \quad \rho_p = \sqrt{\alpha_p^2 + \beta_p^2}.$$

Then figures f_{mp}^{rc} , f_{mp}^{rs} , $m = 1, \dots, M$, $r = 1, \dots, R$, $p = 1, \dots, P$, calculated in (12), (13), are the invariants of the system; for real eigenvalues respective f_{mp}^{rs} are absent (equal to zero).

EXPERIMENTAL RESEARCH

A set of computational research experiments was carried out using a CM of an IT company (Fig. 1) [4].

In this CM the following nodes are measurable: 1. Project duration. 2. Innovation expenses. 3. Salaries, bonuses. 4. Project’s budget. 5. Profit. 6. Manager group expenses. 7. Marketing expenses. 8. Revenue of projects’ sells. 9. Staff reassessment expenses. 10. Staff training expenses. The unmeasurable nodes are: 11. Technical control. 12. Intelligent assets. 13. Quality of a final product. 14. Competitive ability. 15. Job satisfaction. 16. Experience exchange. Test signals are fed to the nodes 2, 3, 4, 6, 7, 9 and 10.

After having written IP equation of this CM in the state space model form (3), (4) we obtain

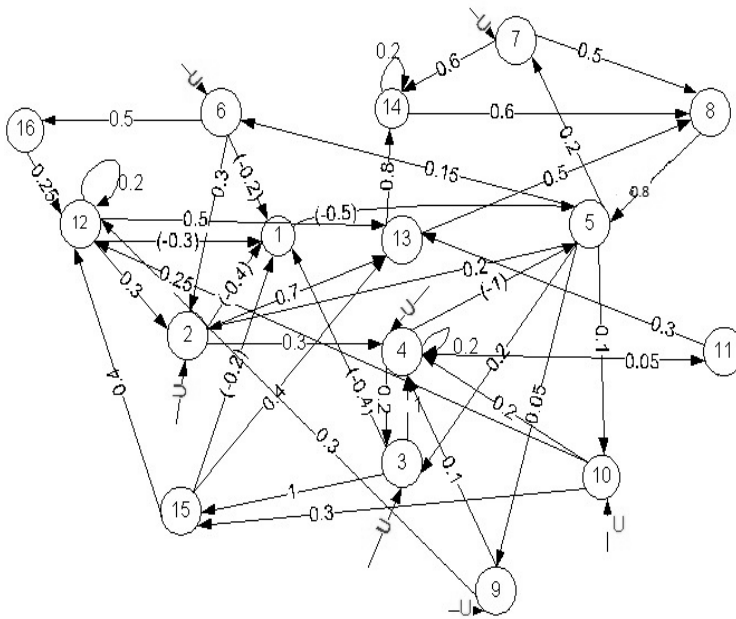


Fig. 1. CM of an IT company

First, let all coordinates be measured precisely. We feed test signals in white noise form with unit variance in the 7 nodes listed above and measure 10 output CM coordinates over 500 sampling periods. First, we make sure that the outputs of the identified CM are equal to the real outputs in the IP mode (in Fig. 2 the solid line is the real system, the dotted line is the identified one, only the first 20 sampling periods are plotted).

Consider the first group of invariants — eigenvalues of the CM incidence matrix. In the original (real) system they are the following (Table 1):

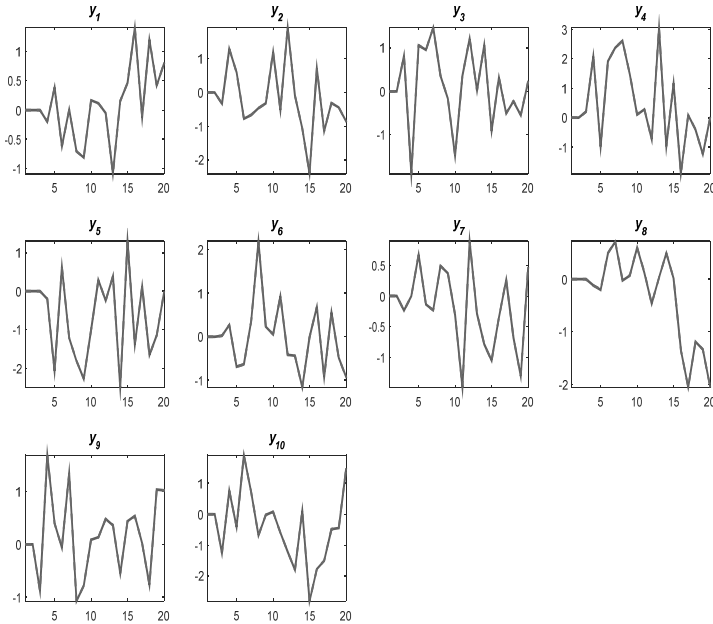


Fig. 2. Output coordinates of the original and identified CM

Table 1. Eigenvalues of the original CM

0.729817358793173
0.288473607378827 + 0.545877212297539i
0.288473607378827 - 0.545877212297539i
0.504529567265151
-0.595168489665732
0.0534731799408301 + 0.389920339850528i
0.0534731799408301 - 0.389920339850528i
-0.275361797240735 + 0.212821392357389i
-0.275361797240735 - 0.212821392357389i
-0.209793520825393
0.0374451042749558
-1.95541830461056e-16 + 9.03643387627237e-10i
-1.95541830461056e-16 - 9.03643387627237e-10i
1.71271169154324e-16
-2.82703848340360e-16
7.56176002022082e-17

It is likely that the last 5 eigenvalues from Table 1 are actually zero of multiplicity 5; this significantly complicates comparison of the invariants. Therefore, we will first of all consider the first 11 eigenvalues in the analysis because they mostly characterize the CM IP dynamics.

We will compare the invariant vector of eigenvalues of the identified and the original CM under different conditions. The following metric is suggested for comparison. Both vectors are sorted by absolute values, their difference is found and the maximum absolute value of the difference vector is calculated. In case when the structure of eigenvalues is not violated this metric reflects maximum deviation of the obtained values from the original ones.

The dependence of the suggested metric on the number of measured coordinates is shown (Fig. 3). For reliability of the research results, 10 models (with different inputs) were built and then averaged. With 10 measured coordinates (as in the example described above), the error is 0.0067, which can be seen as quite satisfactory. When the number of measured nodes is 4 or less, the error grows significantly.

The dependence of the same performance metric (based on the accuracy of eigenvalues identification) on the number of measurements (also after averaging over 10 models) is shown (Fig. 4). The number of measured nodes is 10. The error is 0.059 for 500 measurements (sampling periods). A significant raise of the error starts when number of measurements is less than 400.

The dependence on measurement noise (in previous studies it was assumed to be zero) is shown (Fig. 5). We feed uniformly distributed random noise (with amplitude depending on the maximum value of the useful signal) to all the measured nodes. So we will investigate dependence of the identification error on the noise to the useful signal ratio (with 500 measurements of 10 coordinates).

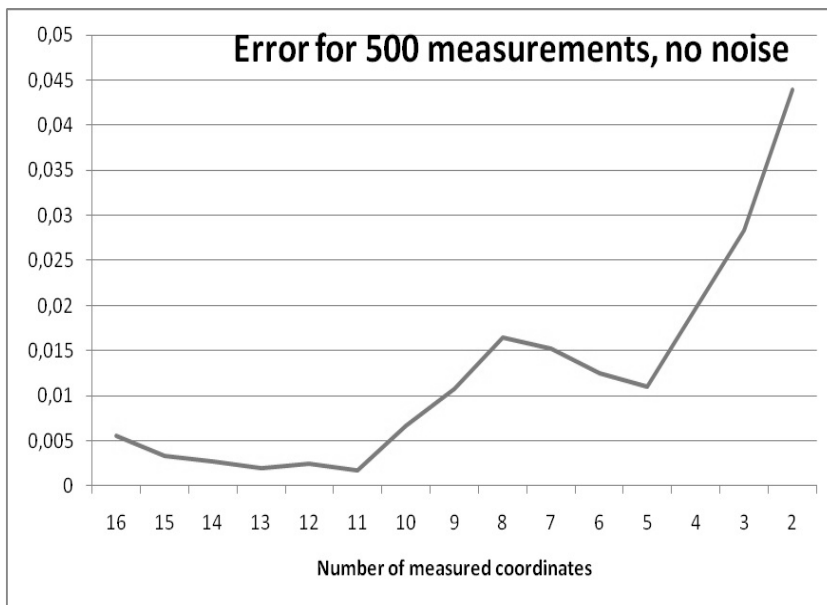


Fig. 3. Identification error vs number of measured coordinates

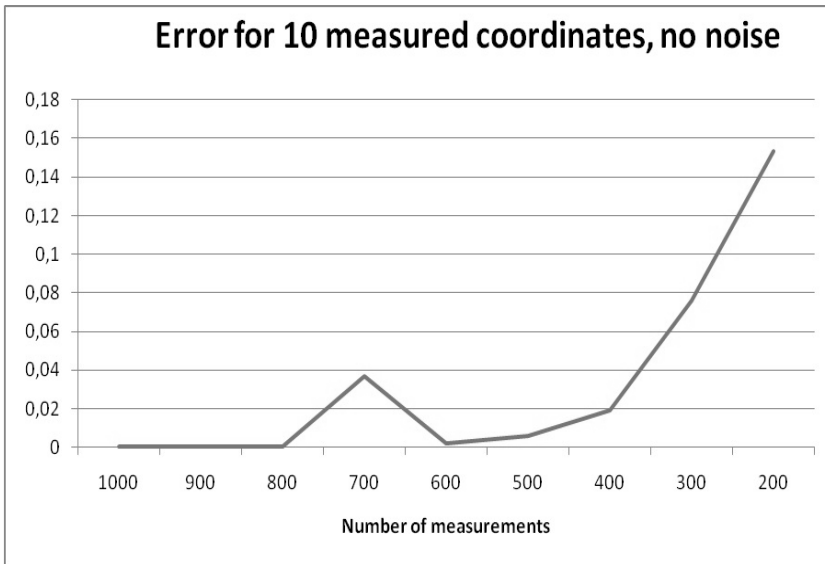


Fig. 4. Identification error vs number of measurements

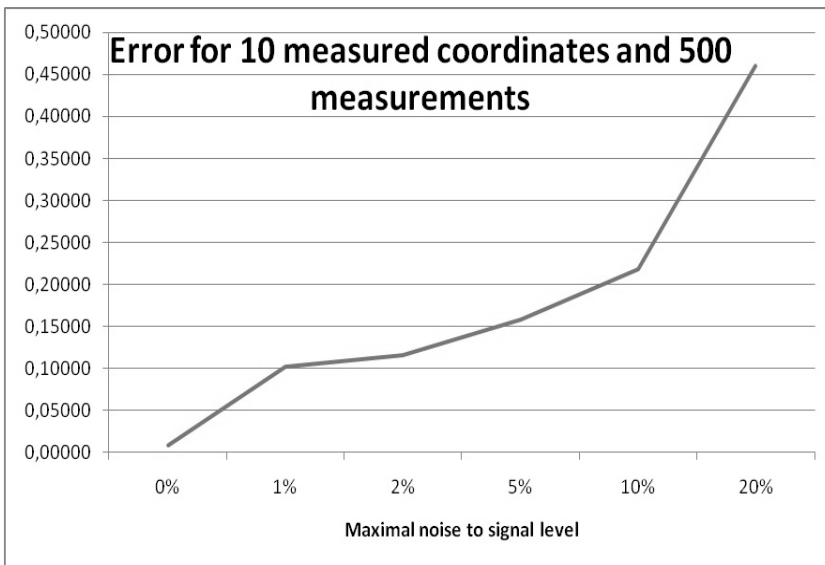


Fig. 5. Identification error vs noise to signal level

The dependence on measurement noise is especially important, so we present the results also in tabular form (Table 2). Here we calculate not the maximum error metric suggested above, but the identified modes of the system themselves. The absolute values of the noise amplitude are in the table header.

Table 2. Eigenvalues of the identified CM

0	1.00E-14	1.00E-10	1.00E-05
0.729990838616750 + 0.000000000000000i	0.729990838616752 + 0.000000000000000i	0.729795701554137 + 0.000000000000000i	0.729991153904236 + 0.000000000000000i
0.288527551393047 + 0.546013552369764i	0.504361922199503 + 0.000000000000000i	0.288425185463485 + 0.545841676379809i	0.288525198162765 + 0.546013875258183i
0.288527551393047 - 0.546013552369764i	0.288527551393046 + 0.546013552369763i	0.288425185463485 - 0.545841676379809i	0.288525198162765 - 0.546013875258183i
0.504361922199501 + 0.000000000000000i	0.288527551393046 - 0.546013552369763i	0.504727440971184 + 0.000000000000000i	0.504362027516735 + 0.000000000000000i
-0.595167227890913 + 0.000000000000000i	-0.595167227890916 + 0.000000000000000i	-0.595212059904572 + 0.000000000000000i	-0.595168251524833 + 0.000000000000000i
0.0534059512435629 + 0.389763957407337i	0.0534059512435720 + 0.389763957407340i	0.0531856330760910 + 0.389823025408581i	0.0534124939792743 + 0.389765316747699i
0.0534059512435629 - 0.389763957407337i	0.0534059512435720 - 0.389763957407340i	0.0531856330760910 - 0.389823025408581i	0.0534124939792743 - 0.389765316747699i
-0.275098990019907 + 0.213125022452357i	-0.275098990019885 + 0.213125022452346i	-0.275481781185811 + 0.212239094334225i	-0.275078260183521 + 0.213111222276663i
-0.275098990019907 - 0.213125022452357i	-0.275098990019885 - 0.213125022452346i	-0.275481781185811 - 0.212239094334225i	-0.275078260183521 - 0.213111222276663i
-0.211145050250800 + 0.000000000000000i	-0.211145050250820 + 0.000000000000000i	-0.208941997309267 + 0.000000000000000i	-0.211156370940011 + 0.000000000000000i
0.0374188299453503 + 0.000000000000000i	0.0374188299453380 + 0.000000000000000i	0.0374653239841545 + 0.000000000000000i	0.0374077126848873 + 0.000000000000000i
0.000853598779548921 + 0.000000000000000i	0.000853598779766390 + 0.000000000000000i	-0.00808130305896758 + 0.000000000000000i	-0.00137761954985350 + 0.000000000000000i
-0.000765459607735681 + 0.000000000000000i	-0.000765459608667301 + 0.000000000000000i	0.00770399293877252 + 0.000000000000000i	0.00100933752150903 + 0.000000000000000i
-3.46232972558093e-13 + 0.000000000000000i	-1.14730616044168e-15 + 0.000000000000000i	3.62004525836301e-10 + 0.000000000000000i	0.000244542992428858 + 0.000000000000000i
-8.38294372987105e-15 + 0.000000000000000i	5.45925393953776e-14 + 3.19610528245246e-14i	-2.45971146842435e-11 + 0.000000000000000i	1.07321950169192e-06 + 0.000000000000000i
-9.65897357673646e-17 + 0.000000000000000i	5.45925393953776e-14 - 3.19610528245246e-14i	-1.43698326020234e-11 + 0.000000000000000i	6.04341025062634e-06 + 0.000000000000000i

So, starting from the noise with order of values around 10^{-5} the error in some modes becomes significant; after that the structure of eigenvalues is broken (complex pairs turn into real eigenvalues etc.).

Invariants of the second group were also calculated based on the formulas (12), (13). The total number of these invariants is very large: for example, if we consider 10 measured coordinates, with 7 test signals we get 1120 invariants.

Therefore, the results of the analysis based on them are not shown in the article. However, in general it should be said that a noticeable discrepancy between these invariants for the identified and the original systems also starts at noise level around 10^{-5} .

IDENTIFICATION OF A COGNITIVE MAP WITH UNMEASURABLE NODES

The paper studies the problem of identifying weight coefficients of the CM incidence matrix under the condition that some of its nodes are not measurable. For this purpose 4SID method is used, which allows, firstly, to find some realization of the system in state space, and, secondly, to get back closer to the original realization, which has the specific type of control and observation matrices. The identified and original systems are identical in output, i.e. measured coordinates response identically to the same input test signals. Quality of the identification was thoroughly analyzed by comparing groups of invariants of the original and identified systems. The practical example of the IT company's CM was analyzed. The analysis confirmed applicability of the suggested identification method and helped to find its limitations.

CONCLUSIONS

As a result of the research, it can be concluded that the identification method for a CM in IP mode is efficient, but only under certain conditions and limitations. Its efficiency severely depends on number of measurements, number of measured nodes coordinates and especially on measurements noise. In fact, even without measurement noise, identification is not completely accurate because of the computational error, which is essential for multivariate complex systems (e.g., a 16-dimensional CM). When noise exceeds a certain threshold (about 10^{-5} in this case, but in general it depends on the structure of the CM), accurate identification becomes impossible. This is not a disadvantage of the suggested method, but an inevitable property of any identification method, since, starting from a certain threshold, the problem becomes incorrect (ill-posed). Thus, the 4SID method is recommended to be used for CM identification with a sufficient number of measurements with low noise. A general case method will be developed in further research.

REFERENCES

1. Roberts F. Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1976. 559p.
2. V. Gubarev, V. Romanenko, Y. Milyavsky. Identification in cognitive maps in the impulse process mode with full information. *Problems of control and informatics*. 2018. № 4. P. 30–43 (in Russian).
3. Verhagen M., Dewilde P., Subspace model identification. Part I: the output-error state space model identification class of algorithms. *Int. J. Control*. 1992., №56. P. 1187–1210.
4. V. Romanenko, Y. Milyavsky, M. Polyakov, Y. Letser, G. Shevchenko. Research of scenarios of IT company development based on decision-making in cognitive maps impulse process control mode. *Proceedings of 1st international scientific and practical forum "Science and business"*. (29-30 of June, 2015, Dnipropetrovsk), Dnipropetrovsk, 2015. P. 233–237. 2015. P. 233–237 (in Russian).

Received 27.11.2018

ЛИТЕРАТУРА

1. Roberts F. Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1976. 559 p.
2. В.Ф. Губарев, В.Д. Романенко, Ю.Л. Милиавский. Идентификация в когнитивных картах в режиме импульсных процессов при полной информации. *Проблемы управления и информатики*. 2018. № 4. С. 30–43.
3. Verhagen M., Dewilde P., Subspace model identification. Part I: the output-error state space model identification class of algorithms. *Int. J. Control*. 1992. № 56. P. 1187–1210.
4. Романенко В.Д., Милиавский Ю.Л., Поляков М.В., Лецер Ю.А., Шевченко Г.Я. Исследование сценариев развития ИТ-компании на основе принятия решений в режиме управления импульсными процессами когнитивных карт. Тезисы докладов 1-го международного научно-практического форума "Наука и бизнес", 29-30 июня, 2015, г. Днепропетровск). Днепропетровск, 2015 г. С. 233–237.

Получено 27.11.2018

Мілявський Ю.Л., старший викладач
кафедри математичних методів системного аналізу
e-mail: yuriy.milyavsky@gmail.com
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

ИДЕНТИФИКАЦИЯ В КОГНИТИВНЫХ КАРТАХ У РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ ЗА УМОВИ НЕПОВНОГО ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ВЕРШИН

Вступ. Когнитивная карта — популярный способ моделирования сложных багатозв'язних систем. Зазвичай вагові коефіцієнти ребер, що зв'язують вершини когнитивної карти, визначаються експертами. Але таке визначення завжди є неточним. У разі, якщо координати вершин вимірюються, є можливість здійснити математичну ідентифікацію цих коефіцієнтів. Однак проблема полягає в тому, що дуже часто вимірюються не всі координати вершин когнитивної карти, а лише деякі з них. В цьому разі задача ідентифікації значно ускладнюється.

Метою статті є розроблення і дослідження методу ідентифікації вагових коефіцієнтів ребер когнитивної карти у випадку, коли кількість вершин карти відома, але не усі з них вимірюються.

Результати. Запропоновано метод ідентифікації, що базується на 4SID методі (методі виділеного підпростору). Цей метод дає змогу знайти деяку реалізацію системи, еквівалентну за виходом з початковою когнитивною картою, водночас матриці керування та спостереження залишаються без змін. Проаналізовано інваріанти вихідної та ідентифікованої систем. Розглянуто практичний приклад ідентифікації когнитивної карти ІТ компанії. Показано, від чого залежить точність запропонованого методу та за яких умов його можна застосовувати.

Висновки. Як показало дослідження, в результаті ідентифікації когнитивних карт запропонованим методом було досягнуто практично повного збігу за вимірюваними координатами між початковою та ідентифікованою системами, хоча самі матриці суміжності можуть не співпадати. Інваріанти системи, зокрема власні числа, ідентифікуються достатньо точно, якщо задачу добре зумовлено, тобто за достатньої кількості вимірюваних координат, достатньої кількості інтервалів вимірювань та за умови невеликого рівня шуму вимірювань. Якщо ці умови не виконуються, результати ідентифікації стають некоректними.

Ключові слова: когнітивна карта, ідентифікація, метод виділеного підпростору, невимірювані координати.

Милявский Ю.Л., старший преподаватель
кафедры математических методов системного анализа
e-mail: yuriy.milyavsky@gmail.com
Национальный технический университет Украины
«Киевський політехнічний інститут ім. І. Сикорського»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ В КОГНИТИВНЫХ КАРТАХ
В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ НЕПОЛНОМ ИЗМЕРЕНИИ КООРДИНАТ ВЕРШИН**

Исследована задача идентификации весовых коэффициентов матриц смежности когнитивных карт в случае, когда часть координат вершин не измеряется. Предложен метод идентификации, основывающийся на 4SID методе. Проанализированы инварианты исходной и идентифицированной систем. Рассмотрен практический пример идентификации когнитивной карты IT компании. Показано, при каких условиях предложенный метод применим.

Ключевые слова: когнитивная карта, идентификация, метод выделяемого подпространства, неизмеряемые координаты.

Медицинская и биологическая кибернетика

DOI: [https:// 10.15407/kvt195.01.064](https://10.15407/kvt195.01.064)

UDC 617.7-073.178: 004

KAPLIN I.V.¹, ophthalmologist of the Kyiv Center for Eye Therapy and Microsurgery, PhD student of the Ophthalmology Department
e-mail: smashdown@mail.ru

KOCHINA M.L.², DSc (Biology), Professor, Head of the Medical and Biological Basics of Sports and Physical Rehabilitation Department,
e-mail: kochinaml@gmail.com

DEMIN Iu.A.¹, DSc (Medicine), Professor, Head of Ophthalmology Department,
e-mail: deminprof@gmail.com

FIRSOV O.H.³, PhD (Technics), Chief Designer
e-mail: shagrath.hire@gmail.com

¹ Kharkiv Medical Academy of Postgraduate Education, 58, Amosova str., Kharkiv, Ukraine, 61000

² Petro Mohyla Black Sea National University 10, 68-Desantniv str., Mykolaiv, Ukraine, 54000

³ ASTER-AITI, LTD 1, Aviation str., Kharkiv, Ukraine, 61166

THE SYSTEM OF INTRAOCULAR PRESSURE ASSESSMENT USING INTERFERENCE EYE PICTURES

Introduction. According to the World Health Organization (WHO), glaucoma accounts for 4–5% of the total ocular pathology, making it one of the most common eye diseases in the world. The first sign of the disease is a constant or periodic increase in intraocular pressure, which leads to the development of visual field defects, optic nerve atrophy, and dystrophic changes in eye tissues. Detection of glaucoma and ocular hypertension is done by measuring the intraocular pressure, which is the standard procedure for diagnosis of the condition of eyes in all patients over 40 years of age. Patients with a diagnosis of "glaucoma" should constantly measure the intraocular pressure, which is necessary to control the effectiveness of treatment, its correction and evaluation of the effectiveness of drugs.

The purpose of the article is to develop the system for assessing the intraocular pressure level using the interference pictures parameters observed on the eye cornea in the polarized light.

Results. The proposed system of two-level classification of the intraocular pressure level, which contains a pair of complementary fuzzy models, formalized in the form of logical rules and sets of numerical parameters of functions (membership and conclusion), and additional decisive rules that consist of a regression equation and a classification criterion.

Such a hybrid system adequately reflects the general communication of adjusted interference picture parameters with a measured value of intraocular pressure by classical Goldman tonometry, which allowed offering it to practical use as a basis for intraocular pressure express assessment.

Conclusion. Using the developed software module evaluation of intraocular pressure, based on the proposed concept of express assessment of intraocular pressure, integrates fuzzy models and decisive rules allowing to improve the results of glaucoma treatment at early detection of high level of intraocular pressure.

Keywords: intraocular pressure, central eye cornea thickness, interference pictures, express assessment.

INTRODUCTION

According to the WHO, glaucoma accounts for 4–5% of the total onset of the pathology, making it one of the most common eye diseases in the world. About 3% of the total population of the Earth suffer from glaucoma (in particular, from 0.5 to 2% comprise people younger 40 years old, and 7% of the world population by the age of 80) [1–5]. In the world, there are more than 8 million people who got blinded because of this disease, among them 7 million people lost sight of both eyes. Glaucoma takes the second place after cataract as to the frequency of blindness, with a clear tendency to increase the rate of morbidity of glaucoma [6–9].

The first sign of the disease is a constant or periodic increase in intraocular pressure (hereinafter — IOP), which leads to the development of defects in the vision fields, the optic nerve atrophy, dystrophic changes in the eye tissues. The earlier this pathology will be detected, the more effective the treatment and prevention of changes in the visual system will be [10]. Detection of glaucoma and ocular hypertension is carried out by measuring the IOP, which is the standard procedure for diagnosis of the eyes condition in all patients over 40 years of age. Patients with a diagnosis of "glaucoma" should constantly measure the IOP, which is necessary to control the effectiveness of treatment, its correction and evaluation of the effectiveness of drugs [10]. This requires a permanent visit to the hospital, that is difficult in many cases, for example, in rural areas.

THE PROBLEM SETTING

For the IOP express estimation using interference pictures (hereinafter — IP) observed on the eye cornea in polarized light, there was proposed the telemedicine system creation, developed the IP parametrization method, and implemented in the working software [11].

The interference pictures parameters of each eye consist of axial segments (OK, OH, OP, OR) drawn from the center of the cornea to the isochrome points located on the vertical and horizontal corneal diameters, as well as diagonal segments (OB1, OB2, OB3, OB4) that are held at an angle of 45° to the axial straight lines from the center of the cornea to certain points of the isochrome. The lengths of all the segments after their definition are automatically

normalized by the software on the average diameter of the cornea (by dividing) and are dimensionless values.

According to many studies, the thickness of the cornea has a definite effect on the IOP values obtained using appanatomic tonometry; therefore, at present, corrections are made to the measured values of the IOP, depending on the central corneal thickness [12–16]. Based on physical representations that the thickness of the cornea has a definite influence on the value and distribution of internal stresses in it, there is a need to consider it when using the IP parameters to determine the IOP. The eye cornea has a complex geometric shape, which is manifested by a change in its thickness from the center to periphery and affects the shape of IP [17].

The value of the eye cornea thickness in its center differs in different patients. In addition, studies have shown that it may be different for the right and left eyes in one patient [16] which should also be taken into account when evaluating IOP.

Determining the level of IOP by IP parameters is the next step in the development of the telemedicine system. To do this, it is necessary to develop a system for assessing the level of IOP using the IP parameters.

The object and methods of research. To develop the system of IOP level assessment using the IP parameters, we determined the IP parameters of 100 eyes with different levels of IOP, 70 of which were used as a training sample and 30 of them were used for checking the system. Since it is known that the IOP value has a certain effect on the eye cornea thickness, we determined its value using the method of parathyroidism in all patients.

The purpose of the article is to develop the system for assessing the intraocular pressure level using the interference pictures parameters observed on the eye cornea in the polarized light.

DEVELOPMENT OF THE SYSTEM OF ASSESSING THE INTRAOCULAR PRESSURE LEVEL USING THE INTERFERENCE PICTURES PARAMETERS

The process of developing models and solving the problems of the system for assessing the IOP level using IP parameters observed on the eye cornea in polarized light is shown in Fig.1. The interference pictures obtained from the patients are processed (parameterized) using previously developed software [11].

As noted earlier, the thickness of the cornea is different for different individuals, and varies from the center of the cornea to its periphery. This led to the need to develop measures taking into account the thickness of the cornea of a particular eye by correction of the length of all measured segments of parametrized IP. For this purpose, the central thickness of the cornea was determined in all patients by the method of optical pachymetry. Next, for the whole sample, the median value was determined and the correction coefficient of the IP parameters for each eye was calculated using the following formula:

$$k_{cor}^i = \frac{t_{cornea}^i}{M_e^{cornea}},$$

where k_{cor}^i is correction coefficient of IP parameters, t_{cornea}^i — is measured thickness of the cornea, M_e^{cornea} — is median thickness of the cornea, i — is ordinal index of the eye.

The correction of the IP parameters values was carried out by dividing the length of the segments by the corresponding correction coefficient. These measures allowed to bring all the IP parameters to a single scale.

After registration of patients IP photos, were performed IOP measurements using Goldman tonometer. The obtained IOP values were conventionally divided into classes according to the following rule: IOP up to 24 mm Hg (inclusively) were treated as acceptable with code 1; larger IOP values were considered to be high-pressured with code 2:

$$PC = \begin{cases} 1, IOP \leq 24 \text{ mmHg} \\ 2, IOP > 24 \text{ mmHg} \end{cases}$$

where PC — conditional indication of the intraocular pressure class.

Since the pressure class is presented as a real number in the range of 0 to 3 at the output of the fuzzy inference system, then there was a need for additional solving rules, by which one can uniquely determine the discrete code of each class. In addition, the models M1 and M2 mutually complement each other, that is, erroneously determined PC with the help of one model will be clearly defined by another model, and vice versa. The rules for obtaining a discrete PC code are the form of a linear regression equation derived from the initial data of models and a priori values of PC in conjunction with a simple rule:

$$PC_{M1, M2} = a \cdot PC_{M1} + b \cdot PC_{M2}$$

$$PC = \begin{cases} 1, PC_{M1, M2} \leq 1,5 \\ 2, PC_{M1, M2} > 1,5 \end{cases}$$

where PC is the discrete value of PC, $PC_{M1, M2}$ is the PC of the total result of the models M1 and M2, PC_{M1} is a separate result of the fuzzy output of the model M1, PC_{M2} is a separate result of the fuzzy output of the model M2, a, b are coefficients of the regression equation.

To construct the model for the IOP class determining, a Takagi–Sugeno fuzzy inference system [18] was used, which is executed on the following odd basis:

$$(x_1 = \tilde{a}_{1j} \Theta_j \ x_2 = \tilde{a}_{2j} \Theta_j \ \dots \ x_n = \tilde{a}_{nj}) \Rightarrow y_j = b_{j0} + \sum_{i=1, n} b_{ji} x_i,$$

where \tilde{a}_{nj} is the fuzzy term, which evaluates the input variable x_n in the j -M rule; n is the number of rules in the base; Θ_j is logical operation, which combines fragments of the rule j -th (logical operation "AND", "OR"); \Rightarrow is a fuzzy implication; b_{ji} are coefficients of the linear function (products) represented by some real numbers.

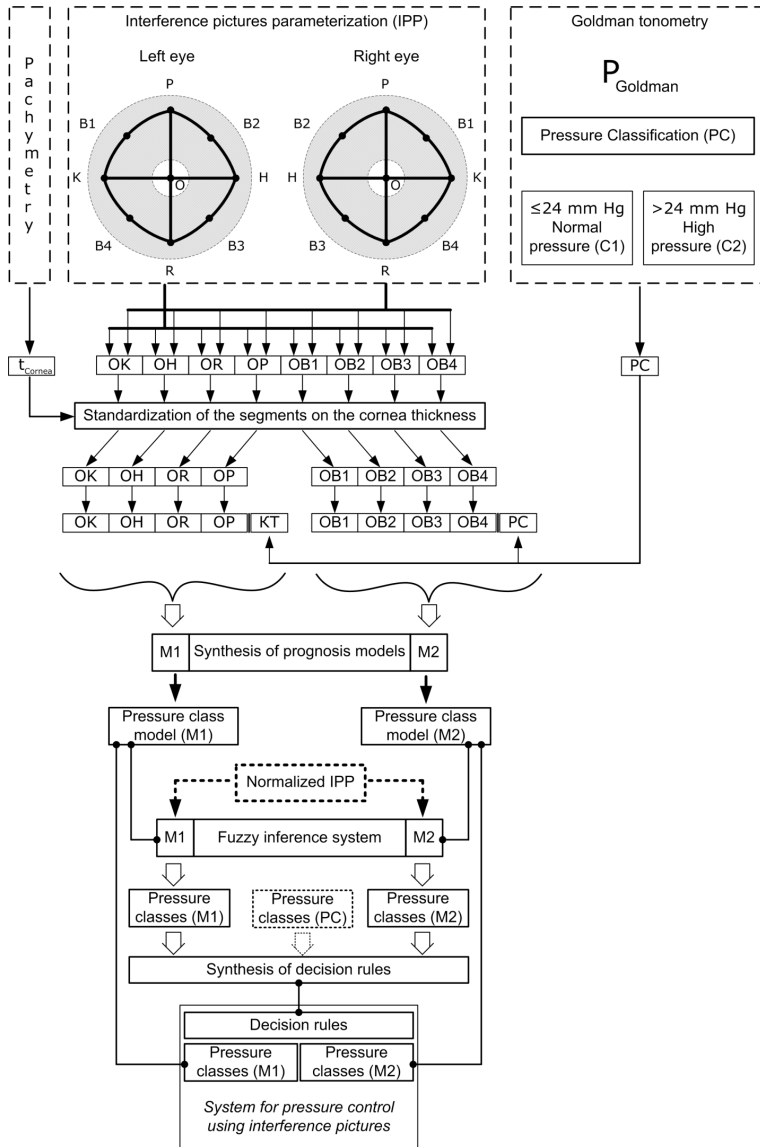


Fig. 1. The process of developing the system for assessing the IOP level

Fuzzy rules are synthesized based on clustering results. For this purpose, for each cluster, one fuzzy rule is put into conformity: "IF $x = x'$, then $y = y'$ ", where x is the input value of the parameter, y is the output value of the parameter, x' , y' are fuzzy terms "CLOSE TO x' ", "CLOSE TO y' ". The coordinates of the maxims of the functions of affiliation (hereinafter – AF) are taken equal to the centers of the obtained clusters. AF of these fuzzy terms are given by Gaussian function [18]:

$$\mu^i(x) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, & x \neq b, \\ 1, & x = b \end{cases}$$

where $\mu'(x)$ is AF of variable x to the term t ; b is AF parameter, corresponding to the maximum coordinate (in this case to the coordinate of the cluster center); C is parameter of AF compression-stretching.

The algorithm for the synthesis of models for determining the IOP class is shown in Fig. 2. Uploaded from the database matrix with the prepared data, they are first subjected to subtractive clusterization (under the mountain algorithm) [19]. Next, each of the received clusters corresponds to one fuzzy rule, and the coordinates of its center are the points of the AF maximum (for the Gaussian function, parameter b) [18]. Further, coefficients of linear functions of the conclusions used in the Sugeno fuzzy deducing system are calculated. The set of logical rules and sets of AF parameters and conclusions form the fuzzy model for determining the IOP class. After that, a fuzzy logical conclusion is made using the Sugeno fuzzy excursion. According to its results and the a priori value of PC, the value of the mean square error pressure classification error (hereinafter — SPCE) is calculated.

Next, the configuration of the model is made. For this purpose, we cyclically change the AF parameters (for the Gaussian function parameter c) and the coefficients of the conclusion functions and repeat the conclusion and the calculation of the values of the SPCE to obtain its minimum value. Since the number of cycles required to set the model is not known in advance, then the restriction is introduced for this operation: the cycle is interrupted if for each subsequent cycle of the setting the value of the SPCE decreases by less than 1% of the value obtained in the previous cycle. To reduce the dimensionality of the model and reduce the probability of its re-training it is optimized. To do this, the cycle changes the parameters of the clustering algorithm (acceptance and rejection coefficients), with subsequent repetition of all subsequent operations (clustering, matching and model setting). This cycle is repeated until the number of clusters becomes minimal, provided that the accuracy of the model determined by the SPCE does not decrease by more than 1%.

To confirm that the resulting model not only corresponds to the training data, but also adequately reflects the general relationship of the IP parameters with the measured IOP value, an additional verification is carried out. To do this, one line is extracted from the input matrix, the corresponding IP parameters and PC set of one patient, and the synthesis of the model is performed again. If the values of SPCE then do not change by more than 1% (when deleting any data row) then such a model is considered adequate if all lines are checked.

According to the study samples consisting of 50 photos of patients eyes IP with glaucoma with different levels of IOP and 20 IPs of healthy people (70 eyes on the whole), we obtained 2 fuzzy models for determining the class of the IOP. They consist of 6 fuzzy logic equations, 6 AF fuzzy rules (estimate the corresponding input variable) approximated by the Gaussian function and 6 linear functions in the conclusions of fuzzy rules, the definition of the IOP class.

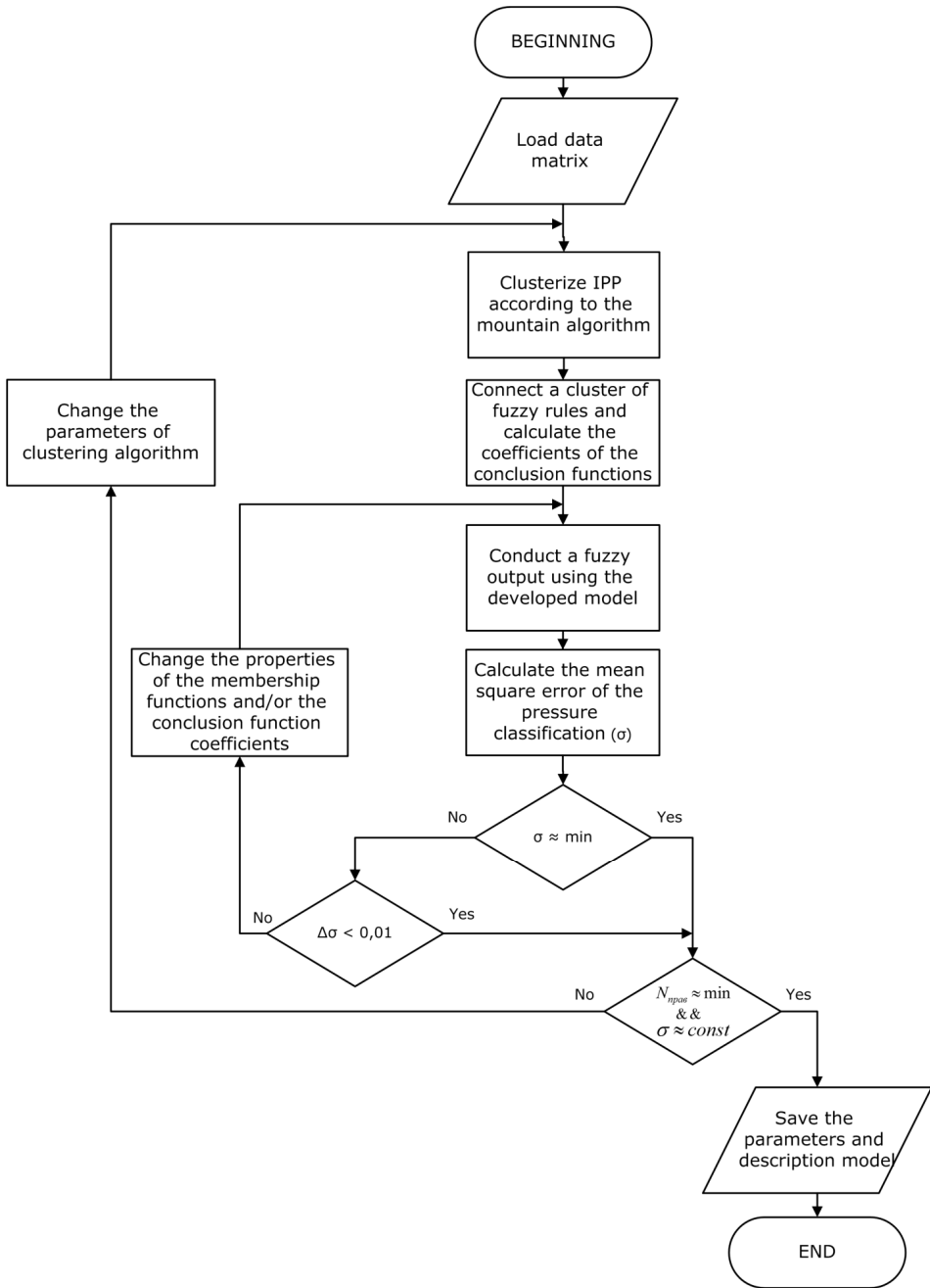


Fig. 2. Algorithm for the synthesis of IOP classification models

The knowledge database rules of the M1 model correspond to the system of fuzzy logic equations:

$$\mu_{PC}^1(X) = \mu_{OK}^1(x_{OK}) \wedge \mu_{OH}^1(x_{OH}) \wedge \mu_{OR}^1(x_{OR}) \wedge \mu_{OP}^1(x_{OP})$$

$$\mu_{PC}^2(X) = \mu_{OK}^2(x_{OK}) \wedge \mu_{OH}^2(x_{OH}) \wedge \mu_{OR}^2(x_{OR}) \wedge \mu_{OP}^2(x_{OP})$$

$$\mu_{PC}^3(X) = \mu_{OK}^3(x_{OK}) \wedge \mu_{OH}^3(x_{OH}) \wedge \mu_{OR}^3(x_{OR}) \wedge \mu_{OP}^3(x_{OP})$$

$$\mu_{PC}^4(X) = \mu_{OK}^4(x_{OK}) \wedge \mu_{OH}^4(x_{OH}) \wedge \mu_{OR}^4(x_{OR}) \wedge \mu_{OP}^4(x_{OP})$$

$$\mu_{PC}^5(X) = \mu_{OK}^5(x_{OK}) \wedge \mu_{OH}^5(x_{OH}) \wedge \mu_{OR}^5(x_{OR}) \wedge \mu_{OP}^5(x_{OP}),$$

where $\mu_{PC}^n(X)$ is the degree to which the fuzzy knowledge base rules are executed for the input vector of the indices $X = \{x_{OK}, x_{OH}, x_{OR}, x_{OP}\}$ $\mu_{OK}^n(x_{OK}), \mu_{OH}^n(x_{OH}), \mu_{OR}^n(x_{OR}), \mu_{OP}^n(x_{OP})$ is AF of the corrected normalized length of the axial segments of the fuzzy term of the knowledge database, n is the serial number of the fuzzy rule.

Table 1 shows the AF parameters of the fuzzy rules of the model M1 approximated by the Gaussian function (parameters of maximum and compression-stretching).

Table 2 shows the coefficients of linear functions in the derivation of fuzzy rules of the model M1.

Table 1. Parameters of the membership function of the model M1 fuzzy rules

Rule number	AF paramaters	Values of Parameters			
		OK	OH	OR	OP
1	b_1	0,36918	0,41677	0,37697	0,37844
	c_1	0,03991	0,03997	0,02856	0,02180
2	b_2	0,41500	0,46013	0,44946	0,38566
	c_2	0,03699	0,05173	0,04774	0,04744
3	b_3	0,40862	0,44621	0,42220	0,38232
	c_3	0,04007	0,02737	0,01566	0,04982
4	b_4	0,38057	0,36672	0,34821	0,35697
	c_4	0,02576	0,04400	0,03318	0,03718
5	b_5	0,42269	0,50764	0,45839	0,43533
	c_5	0,03299	0,04585	0,02240	0,04389

Table 2. Coefficients of linear functions in the derivation of the model M1fuzzy rules

Rule number	Values of Linear Functions				
	OK	OH	OR	OP	Residual Member
1	-12,27402	-25,87299	-24,12933	-20,15253	32,68096
2	17,54735	5,53546	-4,80440	-67,90470	19,38437
3	-6,60772	-65,54054	-55,83284	60,54832	34,55925
4	7,26108	-16,19525	-3,23262	12,52714	1,36121
5	20,66198	-48,97063	30,44241	-15,30205	12,22603

The rules of the knowledge database of the model M2 correspond to the system of fuzzy logic equations:

$$\begin{aligned} \mu_{PC}^1(X) &= \mu_{OB1}^1(x_{OB1}) \wedge \mu_{OB2}^1(x_{OB2}) \wedge \mu_{OB3}^1(x_{OB3}) \wedge \mu_{OB4}^1(x_{OB4}) \\ \mu_{PC}^2(X) &= \mu_{OB1}^2(x_{OB1}) \wedge \mu_{OB2}^2(x_{OB2}) \wedge \mu_{OB3}^2(x_{OB3}) \wedge \mu_{OB4}^2(x_{OB4}) \\ \mu_{PC}^3(X) &= \mu_{OB1}^3(x_{OB1}) \wedge \mu_{OB2}^3(x_{OB2}) \wedge \mu_{OB3}^3(x_{OB3}) \wedge \mu_{OB4}^3(x_{OB4}) \\ \mu_{PC}^4(X) &= \mu_{OB1}^4(x_{OB1}) \wedge \mu_{OB2}^4(x_{OB2}) \wedge \mu_{OB3}^4(x_{OB3}) \wedge \mu_{OB4}^4(x_{OB4}) \\ \mu_{PC}^5(X) &= \mu_{OB1}^5(x_{OB1}) \wedge \mu_{OB2}^5(x_{OB2}) \wedge \mu_{OB3}^5(x_{OB3}) \wedge \mu_{OB4}^5(x_{OB4}), \end{aligned}$$

where $\mu_{PC}^n(X)$ is the degree of execution of the fuzzy knowledge database rules for the input vector of indicators $X = \{x_{OB1}, x_{OB2}, x_{OB3}, x_{OB4}\}$; $\mu_{OB1}^n(x_{OB1}), \mu_{OB2}^n(x_{OB2}), \mu_{OB3}^n(x_{OB3}), \mu_{OB4}^n(x_{OB4})$ is AF of corrected normalized length of diagonal segments of the fuzzy term of knowledge database, n is the serial number of the fuzzy rule.

Table 3 shows the parameters of the AF fuzzy rules of the model M2 approximated by the Gaussian function (parameters of maximum and compression-stretching).

Table 4 shows the coefficients of linear functions in the derivation of fuzzy rules of the model M2.

Table 3. Parameters of the membership function of the model M2 fuzzy rules

Rule number	AF parameters	Values of Parameters			
		OB1	OB2	OB3	OB4
1	b_1	0,34248	0,34743	0,35303	0,31608
	c_1	0,03340	0,04569	0,11324	0,04307
2	b_2	0,37303	0,35059	0,35440	0,34852
	c_2	0,02613	0,03143	0,11114	0,04170
3	b_3	0,38751	0,39324	0,37913	0,36465
	c_3	0,04704	0,02782	0,11554	0,03125
4	b_4	0,42245	0,39006	0,41332	0,37167
	c_4	0,02453	0,04276	0,11587	0,04478
5	b_5	0,30514	0,27628	0,34245	0,30944
	c_5	0,03212	0,03403	0,11676	0,04423

Table 4. The coefficients of linear functions in the derivation of the model M2 fuzzy rules

Rule number	Linear function Parameters				
	OB1	OB2	OB3	OB4	Residual Member
1	-78,62481	-33,51865	-7,69473	-25,87150	47,59678
2	-72,83438	17,35565	-8,78933	-88,77824	58,90563
3	-102,65654	-11,93603	44,8187	-82,18424	57,16713
4	18,85960	-44,30061	-13,91040	-11,47781	25,42608
5	-5,80666	-54,26055	5,09097	78,50133	-7,18751

Decisive rules for obtaining a discrete PC code are obtained in the form of a linear regression equation derived from the data output models and a priori values of PC and simple rules:

$$PC_{M1,M2} = 0,60 \times PC_{M1} + 0,59 \times PC_{M2} - 0,26$$

$$PC = \begin{cases} 1, & PC_{M1,M2} \leq 1,45 \\ 2, & PC_{M1,M2} > 1,45 \end{cases}$$

where PC is the discrete value of PC, $PC_{M1,M2}$ is the class of PC total result of models M1 and M2, PC_{M1} is a separate result of the fuzzy output of the model M1, PC_{M2} is a separate result of the fuzzy output of the model M2.

THE SOFTWARE FOR THE SYSTEM OF ASSESSING THE INTRAOCULAR PRESSURE LEVEL USING THE INTERFERENCE PICTURES PARAMETERS

Initial data processing and analysis, as well as the development of IOP classification models, were conducted using the Scilab computer algebra system [20] and sciFLT's fuzzy logic package [21], which implements the Sugeno fuzzy logic output machine. The Scilab package was developed by the staff of the French National Institute of Computer Science and Automation (INRIA) and distributed free under the free CeCILL license. Formalized M1 and M2 models in the Scilab system are stored in the form of text files with the description of membership functions (the type of approximating function with tabulated parameters), the parameters of linear functions in the output of the rules and the type of the system of fuzzy output (Sugeno). In order to get the IOP class you have to input data of the vector of IP segments values in the Scilab command window. Then, with the help of commands, a file with the description of the model was downloaded and a fuzzy output procedure was launched (built into the sciFLT package), the results of which were the calculation of PC using decisive rules. Scilab's capabilities for the practical application of already developed models are redundant, and the need for working with the command interface makes it unsuitable for untrained user work.

In this regard, for the practical use of the results of work, was developed a software module, which integrated a fuzzy pull-out machine of Sugeno with models and decisive rules. It allows to form a fuzzy conclusion using M1 and M2 models, and to obtain an IOT class with the use of decisive rules with the help of normalized IP parameters and measured corneal thickness to automatically adjust the lengths of IP segments.

The program module is developed using the C# programming language from the Microsoft .NET Framework software platform and integrated into the software that performs the parameterization of the IP [11]. Fuzzy Logic Library for Microsoft .Net (fuzzynet) [22], which is provided by its author in the form of a dynamic library of executable codes or source codes in the C # programming language, is used to implement the fuzzy inference system. The diagram of the classes of the software module EyePressureClassifier is shown in Fig. 3.

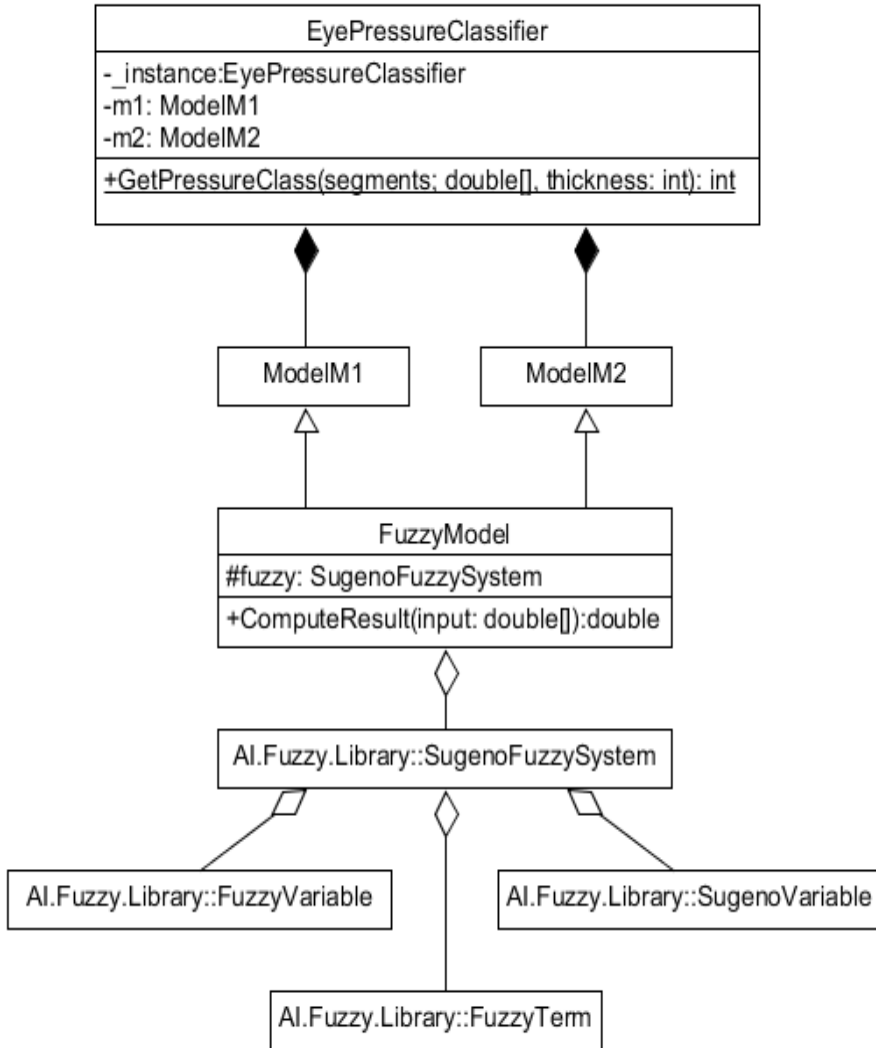


Fig. 3. The diagram of the classes of the software module EyePressureClassifier

The class of the program module implements the static method `GetPressureClass`, which is called from the program code of the application with the input parameters: an array of segments of type `double` with the normalized lengths of the IP parameter segments and the thickness of the `int` type. The result of the calculation will be represented by integer type `int`.

The algorithm of the `GetPressureClass` method is presented in Fig. 4.

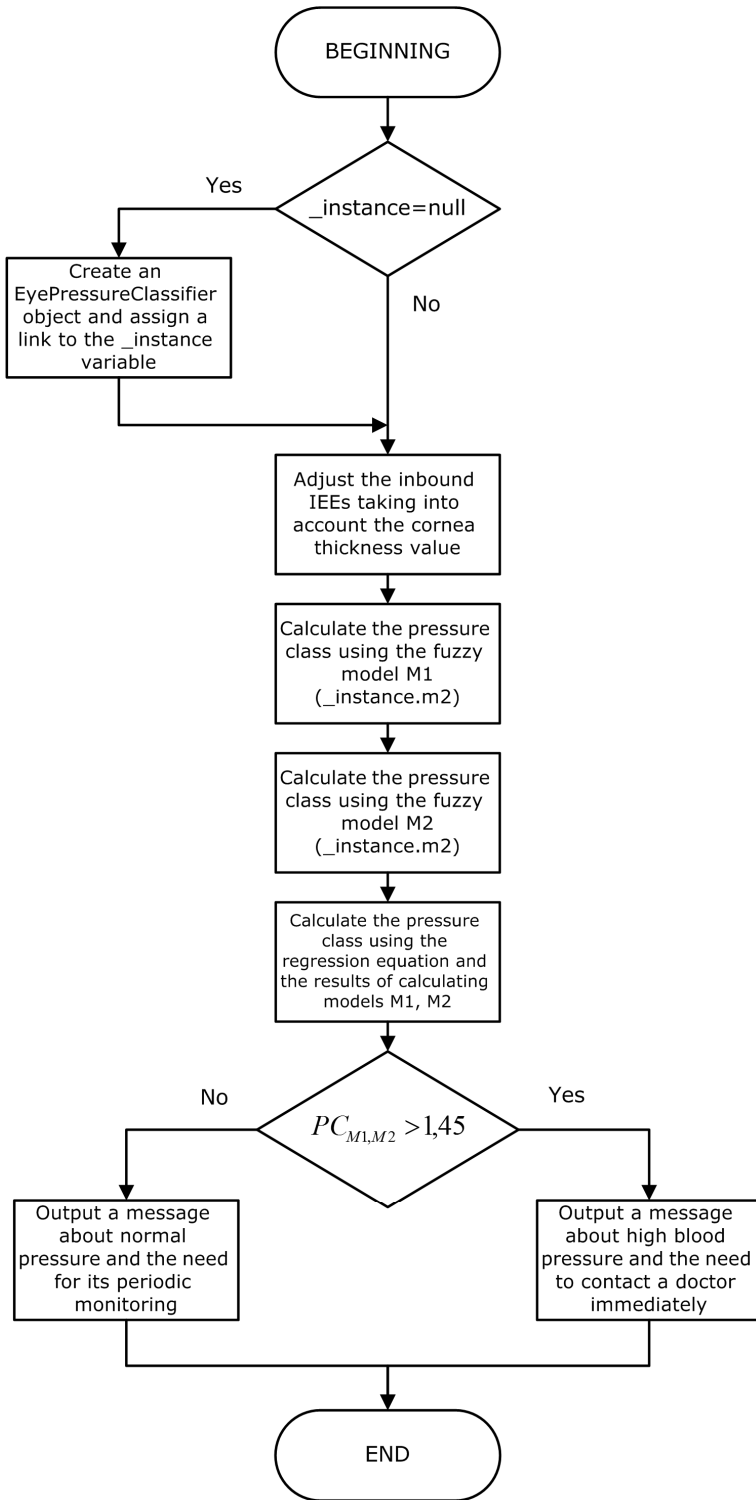


Fig. 4. Algorithm of the GetPressureClass method

Since the EyePressureClassifier class implements the Singleton software template and if the GetPressureClass method is called for the first time, an application object called EyePressureClassifier is created in the program memory and the link to it is stored in the `_instance` variable. Further, the values of the normalized IP segments transmitted into the form of an array of segments are adjusted to take into account of the cornea thickness (parameter thickness) and followed by a fuzzy conclusion using the models M1 and M2 carried out by calling the method Calculate objects `_instance.m1` and `_instance.m2` objects ModelM1 ModelM2 type, respectively. After that, the calculation of the pressure class is carried out using the regression equation. If this value is $PC_{M1, M2}$ is less than or equal to 1.45 there appears an IOP message on the screen showing the normal range (Fig. 5). If the value of $PC_{M1, M2}$ exceeds 1.45 there is a message about high IOP (Fig. 6) and recommendations to follow up.

Calling the GetPressureClass method in the IP parameterization software application is performed automatically when selecting the "Calculate PC" menu item (Fig. 7).

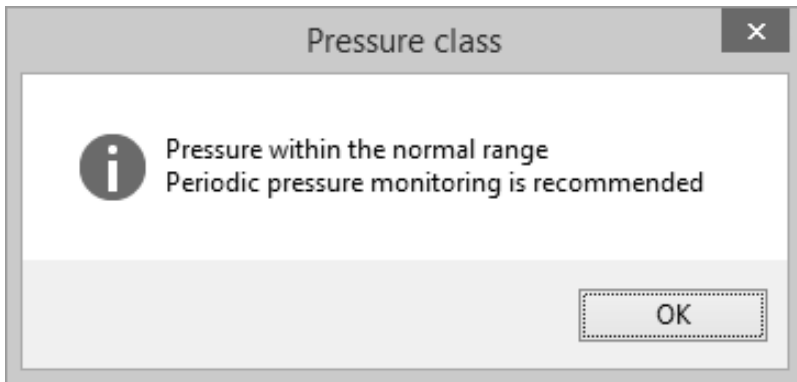


Fig. 5. Message about IOP within the normal range (class 1)

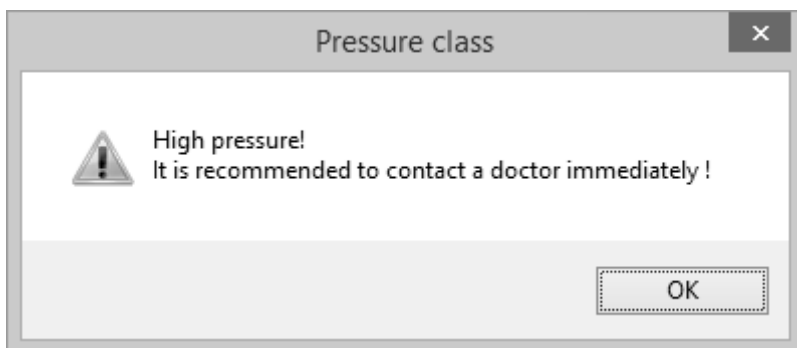


Fig. 6. Message about high IOP (class 2)

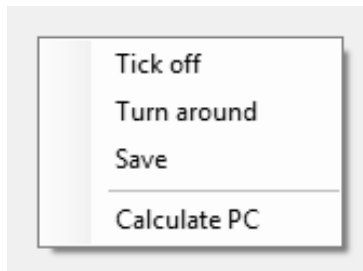


Fig. 7. Menu item "Calculate PC" application for IP parameterization

Thus, the development of the telemedicine system of the IOP express assessment was developed by the introduction of an additional integrated software module, which enables the automatic interactive mode to process IP images and determine the IOP level.

CONCLUSION

The cornea thickness differs in different people, as well as in one eye depending on the position relative to the cornea center. To take into account these features of the cornea during determining the level of intraocular pressure we introduced the correction factor for the parameters of interference patterns for each eye, which was determined by the ratio of the measured central corneal thickness of a particular patient to its median, calculated on the basis of the obtained indicators of 70 people. Correction of the parameters values of parametrized interference pictures was carried out by dividing them into an appropriate correction factor, which made it possible to bring all measured parameters of interference pictures to a single scale.

A proposed system of two-level classification of intraocular pressure contains a pair of complementary fuzzy models, formalized in the form of logical rules and sets of numerical parameters of functions (membership and conclusion), and additional decisive rules that consist of a regression equation and a simple criterion. Such a hybrid system adequately reflects the overall correlation between the corrected parameters of interference pictures with the measured values of intraocular pressure using the classic Goldman's tonometry, which allowed offering it for practical use as a basis for the express assessment of intraocular pressure.

The use of the developed software module for assessing the level of intraocular pressure, based on the proposed concept of express assessment of intraocular pressure and integrating fuzzy models and decisive rules provides an opportunity to improve the results of glaucoma treatment due to the timely detection of high intraocular pressure.

REFERENCES

1. Tham Y.C., Li X., Wong T.Y., Quigley H.A., Aung T., Cheng C.Y. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology*. 2014; 121:2081-90.
2. Leske M. C. Ocular perfusion pressure and glaucoma: clinical trial and epidemiologic findings. *Curr. Opin. Ophthalmol.* 2009. Vol. 20, N 2. P. 73–78.
3. Howard D. L., Kim M. M., Hartnett M. E. Predicting glaucoma diagnosis in an elderly sample: revisiting the established populations for epidemiologic studies of the elderly. *J Natl Med Assoc* .2011. Vol. 103. P. 332–341.
4. Day A.C., Baio G., Gazzard G. The prevalence of primary angle close glaucoma in European derived population: a systematic review. *Br J Ophthalmol*. 2012. Vol. 96. P. 1162–1167.
5. Ravi Thomas. Glaucoma a in developing countries. *Indian J Ophthalmol*. 2012. Vol. 60. 5. P. 446–450.
6. Rykov S.A., Vitovskaya O.P., Stepanyuk G.I. Incidence, prevalence of ophthalmopathy and eye disability in Ukraine. *News of Glaucoma*. 2009. No. 1. 34–35. (in Russian)
7. Povch Z.V. Contemporary regional features and dynamics of glaucoma morbidity of adult population of Ukraine, gender aspects. *Health of Society*. 2014.1 2. P. 36–40. (in Ukrainian)
8. Povch Z.V. Approaches to improving the glaucoma prevention taking into account the regional peculiarities of its prevalence among different age groups of the population of Ukraine. *Health of Society*. 2014. 1–2. P. 79. (in Ukrainian)
9. Rykov S.O. Medvedovskaya N.V., Troyanov D.P. Current state and dynamics of glaucoma incidence among adult population of Ukraine. *Ukraine. The health of the Nation*. 2012. 2–3. P. 119–121. (in Ukrainian)
10. Rykov S.A., Shargorodskaya I.V., I.I. bakdardin, Simchuk I.V. Diagnosis and treatment of glaucoma. Supplement to lectures; ed. S.O. Rykova. [2nd ed.]. K.: LLC "Firm ASAVA", 2014. 72p. (in Russian)
11. Kaplin I.V., Kochina M.L., Demin Y.A., Firsov A.G. The conception of telemedicine system for express estimation of intraocular pressure's level. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2018. № 1 (191). P. 76–94. (in Ukrainian)
12. Brandt J. D., Gordon M.O., Beiser J. A. The Ocular Hypertension Treatment Study (OHTS) Group. Adjusting Intraocular Pressure for Central Corneal Thickness Does Not Improve Prediction Models for Primary Open-Angle Glaucoma. *Ophthalmol*. 2012. Vol. 119(3). P. 437–442.
13. Egorov E.A., Vasina M.V. The influence of the cornea thickness on the level of intraocular pressure among various groups of patients. *Clinical Ophthalmology*. 2006. No. 1. P. 16–19. (in Russian)
14. Eremina M.V., Elichev V.P., Yakubova L.V. The influence of the central thickness of the cornea on the level within the eye pressure is normal and with glaucoma (overview). *Glaucoma*. 2006. No. 4. P. 78–83. (in Russian)
15. Alekseev V. N., Litvin I. B. The influence of corneal thickness on the level of intraocular pressure and prognosis in primary open-angle glaucoma. *Clinical ophthalmol*. 2008. No. 4. P. 130–132. (in Russian)
16. Avetisov S.E., Petrov S.Yu., Bubnov I.A. Influence of the central cornea thickness on the results of tonometry (review of literature). *Vestn. Ophthalmol*. 2008. No. 5. P. 3–7. (in Russian)
17. Kochina M.L., Demin Y.A., Kaplin I.V., Kovtun N.M. Model of stress-deformation status of the eye cornea *East European Scientific Journal*. 2017. 2(18). P. 61–66.
18. Shtovba S.D. Designing fuzzy systems by means of MATLAB. Horiachaia liniia — Telecom. M., 2007. 288p with pictures. (in Russian)
19. Yager R., Filev D. Essential of Fuzzy Modeling and Control. John Willey & Sons, 1994. 388 p.
20. Open source software for numerical computation. Access mode: <http://www.scilab.org/> (Last accessed: 21.06.2018.)
21. Fuzzy Logic Toolbox. Access mode: <http://atoms.scilab.org/toolboxes/sciFLT/0.4.7> (Last accessed: 21.06.2018)

22. Fuzzy Logic Library for Microsoft .Net Access mode: <https://sourceforge.net/projects/fuzzynet/> (Last accessed: 21.06.2018)

Received 03.12.2018

ЛІТЕРАТУРА

1. Tham Y.C., Li X., Wong T.Y., Quigley H.A., Aung T., Cheng C.Y. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology*. 2014; 121:2081-90.
2. Leske M. C. Ocular perfusion pressure and glaucoma: clinical trial and epidemiologic findings. *Curr. Opin. Ophthalmol.* 2009. Vol. 20, N 2. P. 73–78.
3. Howard D. L., Kim M. M., Hartnett M. E. Predicting glaucoma diagnosis in an elderly sample: revisiting the established populations for epidemiologic studies of the elderly. *J Natl Med Assoc* .2011. Vol. 103. P. 332–341.
4. Day A.C., Baio G., Gazzard G. The prevalence of primary angle close glaucoma in European derived population: a systematic review. *Br J Ophthalmol*. 2012. Vol. 96. P. 1162–1167.
5. Ravi Thomas. Glaucoma a in developing countries. *Indian J Ophthalmol*. 2012. Vol. 60. 5. P. 446–450.
6. Рыков С.А., Витовская О.П., Степанюк Г.И. Заболеваемость, распространенность офтальмопатологии и инвалидность вследствие нее в Украине. *Новости глаукомы*. 2009. № 1. 34–35.
7. Повч З.В. Сучасні регіональні особливості та динаміка захворюваності на глаукому дорослого населення України, її гендерні аспекти. *Здоров'я суспільства*. 2014. 1–2. С. 36–40.
8. Повч З. В. Підходи до удосконалення профілактики глаукоми з урахуванням регіональних особливостей її поширеності серед різних вікових груп населення України. *Здоров'я суспільства*. 2014. 1–2. С. 79.
9. Риков С. О. Медведовська Н.В., Троянов Д.П. Сучасний стан та динаміка поширеності глаукоми серед дорослого населення України. Україна. *Здоров'я нації*. 2012. 2–3. С. 119–121.
10. Диагностика и лечение глаукомы. Дополнение к лекциям / [Рыков С. А., Шаргородская И. В., Бакбардина И. И., Симчук И. В. и др.] ; под ред. С. О. Рикова. — [2-е изд]. К. : ТОВ «Фирма «АСАВА», 2014. 72с.
11. Каплін І.В., Кочина М.Л., Фірсов А.Г. Концепція телемедичної системи для експрес-оцінювання рівня внутрішньоочного тиску. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2018. № 1(191). С. 76–94.
12. Brandt J. D., Gordon M.O., Beiser J. A. The Ocular Hypertension Treatment Study (OHTS) Group. Adjusting Intraocular Pressure for Central Corneal Thickness Does Not Improve Prediction Models for Primary Open-Angle Glaucoma. *Ophthalmol*. 2012. Vol. 119(3). P. 437–442.
13. Егоров Е. А., Васина М.В. Влияние толщины роговицы на уровень внутри глазного давления среди различных групп пациентов. *Клин. Офтальмология*. 2006. № 1. С. 16–19
14. Еремина М. В., Еричев В.П., Якубова Л.В. Влияние центральной толщины роговицы на уровень внутри глазного давления в норме и при глаукоме (обзор). *Глаукома*. 2006. № 4. С. 78–83.
15. Алексеев В. Н., Литвин И.Б. Влияние толщины роговицы на уровень внутриглазного давления и прогноз при первичной открытоугольной глаукоме. *Клин. офтальмол*. 2008. № 4. С. 130–132
16. Аветисов С.Э., Петров С.Ю., Бубнова И.А. Влияние центральной толщины роговицы на результаты тонометрии (обзор литературы). *Вестн. офтальмол*. 2008. № 5. С. 3–7.
17. Kochina M.L., Demin Y.A., Kaplin I.V., Kovtun N.M. Model of stress-deformation status of the eye cornea. *East European Scientific Journal*. 2017. 2(18). P. 61–66.
18. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Горячая линия — Телеком. М., 2007. 288с., ил.
19. Yager R., Filev D. *Essential of Fuzzy Modeling and Control*. John Willey & Sons, 1994. 388 p.

20. Open source software for numerical computation. Access mode: <http://www.scilab.org/> (Last accessed: 21.06.2018.)
21. Fuzzy Logic Toolbox. Access mode: <http://atoms.scilab.org/toolboxes/sciFLT/0.4.7> (Last accessed: 21.06.2018)
22. Fuzzy Logic Library for Microsoft .Net Access mode: <https://sourceforge.net/projects/fuzzynet/> (Last accessed: 21.06.2018)

Отримано 03.12.2018

*Каплін І.В.*¹, лікар-офтальмолог Київського центру терапії та мікрохірургії ока,

аспірант кафедри офтальмології
e-mail: smashdown@mail.ru

*Кочина М.Л.*², д-р. біол. наук, проф.,

Зав. каф. медико-біологічних основ спорту та фізичної реабілітації
e-mail: kochinaml@gmail.com

*Дьомін Ю.А.*¹, д-р. мед. наук, проф.,

Зав. кафедрою офтальмології
e-mail: deminprof@gmail.com

*Фірсов О.Г.*³, канд. техн. наук,
головний конструктор

e-mail: shagrath.hire@gmail.com

¹ Харківська медична академія післядипломної освіти,

вул. Амосова, 58, 61000, м. Харків, Україна

² Чорноморський національний університет ім. Петра Могили,

вул. 68 Десантників, 10, 54000, м. Миколаїв, Україна

³ ТОВ «АСТЕР-АЙТИ»,

вул. Авіаційна 1, 61166, м. Харків, Україна

СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ВНУТРІШНЬООЧНОГО ТИСКУ ЗА ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИМИ КАРТИНАМИ ОКА

Вступ. За даними ВООЗ глаукома складає 4–5% всієї очної патології, що робить її одним з найпоширеніших очних захворювань у світі. Першою ознакою захворювання є постійне або періодичне підвищення внутрішньоочного тиску (ВОТ), що призводить до розвитку дефектів полів зору, атрофії зорового нерва, дистрофічних змін тканин ока. Виявлення глаукомою та очної гіпертензії здійснюють шляхом виміру ВОТ, що є стандартною процедурою під час проведення діагностики стану очей у всіх пацієнтів старше за 40 років. Хворі з встановленим діагнозом “глаукома” повинні постійно вимірювати ВОТ, що необхідно для контролю ефективності лікування, його корекції та оцінювання ефективності дії ліків.

Мета роботи — розроблення системи оцінювання рівня внутрішньоочного тиску за параметрами інтерференційних картин, спостережених на рогівці ока у поляризованому світлі.

Результати. Запропоновано систему дворівневої класифікації рівня внутрішньоочного тиску, яка містить, окрім пари взаємодоповнювальних нечітких моделей, формалізованих у вигляді логічних правил і наборів числових параметрів функцій (приналежності та висновку), додаткові вирішувальні правила, які складаються з регресійного рівняння та класифікаційного критерію.

Така гібридна система адекватно відображає загальний зв'язок скоригованих параметрів інтерференційних картин з вимірним значенням внутрішньоочного тиску за класичною гольдманівською тонометрією, що дало змогу запропонувати її для практичного використання як бази для експрес-оцінювання внутрішньоочного тиску.

Висновки. Використання розробленого програмного модулю оцінювання рівня внутрішньоочного тиску, який базується на запропонованій концепції експрес-

оцінювання внутрішньоочного тиску і інтегрує нечіткі моделі і вирішувальні правила, надає можливість покращити результати лікування глаукоми за рахунок своєчасного виявлення підвищеного рівня внутрішньоочного тиску.

Ключові слова: внутрішньоочний тиск, центральна товщина рогівки, інтерференційні картини, експрес-оцінювання.

Каплин И.В.¹, врач-офтальмолог Киевского центра
терапии и микрохирургии глаза,
аспирант кафедры офтальмологии
e-mail: smashdown@mail.ru

Кочина М.Л.², доктор биологических наук, профессор,
Зав.каф. медико-биологических основ
спорта и физической реабилитации
e-mail: kochinaml@gmail.com

Демин Ю.А.¹, доктор медицинских наук, професор
Зав. каф. офтальмологии
e-mail: deminprof@gmail.com

Фирсов А.Г.³, канд. техн. наук, главный конструктор
e-mail: shagrath.hire@gmail.com

¹ Харьковская медицинская академия последипломного образования,
ул. Амосова, 58, 61000, г. Харьков, Украина

² Черноморский национальный университет им. Петра Могилы,
ул. 68 Десантников, 10, 54000, г. Николаев, Украина

³ ООО «АСТЕР-АЙТИ»,
ул. Авиационная 1, 61166, г. Харьков, Украина

СИСТЕМА ОЦЕНКИ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ КАРТИНАМ ГЛАЗА

Представлена система двухуровневой классификации внутриглазного давления, которая содержит пару взаимодополняющих нечетких моделей, формализованных в виде логических правил и наборов числовых параметров функций (принадлежности и заключений), и дополнительные решающие правила, состоящие из регрессионного уравнения и простого критерия. Такая гибридная система классификации адекватно отражает связь скорректированных параметров интерференционных картин глаз со значениями внутриглазного давления, измеренного с помощью тонометра Гольдмана, что позволяет использовать ее в качестве базы для экспресс-оценки внутриглазного давления. Использование разработанного программного модуля оценки уровня внутриглазного давления позволяет улучшить результаты лечения глаукомы за счет своевременного выявления его повышенного уровня.

Ключевые слова: внутриглазное давление, центральная толщина роговицы, интерференционные картины, экспресс-оценка.

DOI: [https:// 10.15407/kvt195.01.082](https://10.15407/kvt195.01.082)

UDC 602.9:611.018

CHERNYSHOVA T.A., physician,
e-mail: tetyana.che@gmail.com
Aviation Medical Center of the
National Aviation University,
Komarova av., 1, Kyiv, 03058, Ukraine

CRITERIA AND METHOD FOR DETECTION OF CIRCULATING TUMOR CELLS

Introduction. Modern advances in science and technology have substantially expanded the possibilities for detecting malignant neoplasms. A great number of methods for the detection and allocation of circulating tumor cells clearly indicates the interest of researchers to this problem.

The purpose of the work is to form a complex of criteria for tumor malignancy evaluation and to improve the method of detecting circulating tumor cells in human blood.

Results. The proposed method for determining circulating tumor cells, which is an improvement of ISET technology, combines two stages. At the first stage the improvement is in adding two additional polycarbonate filters with 5 and 3 micron diameter pores, and providing a mode of 100% sealing of the chamber with hemolysis, and constant pressure throughout the filtration process. At the second stage, we carried out the determination of malignancy degree of the isolated cells using the developed set of criteria. The use of the developed method in the automated system for the analysis of digital microscopic images of circulating tumor cells provides the detection and calculation of characteristic features for assigning an object to a certain class of malignancy and the creation of scanned images database with recorded existing cells or their entities, as well as the final verification of the results of tumor malignancy evaluation for template masks of circulating tumour cells and benign tumor cells.

Conclusions. The application of the proposed method for the detection of circulating tumor cells allows detecting smaller cells than in case of using traditional methods, ensures their integrity and intactness.

Keywords: circulating tumor cells, criteria for evaluation of tumormalignancy, method of determining circulating tumor cells in human blood.

INTRODUCTION

Modern achievements in science and technology have substantially expanded the possibilities for detecting malignant neoplasms. However, despite the wide arsenal of auxiliary research methods, the physician often has significant difficulties in making the accurate diagnosis, which is ultimately reflected in the treatment. The problem of detecting and recognizing the circulating tumor cells (hereinafter — CTC) has become relevant in the last few decades because it is important for the treatment of a patient for

© CHERNYSHOVA T.A., 2019

a number of reasons [1–2]. At the beginning of the primary tumor development, the detecting of CTC allows making an early diagnosis. The amount of CTC is reduced in response to treatment, that is why monitoring the CTC amount let us analyze the effectiveness of a particular treatment regimen [3]. At the same time, the change in the CTC amount can be used as a means for tracking relapse in patients with no signs of disease in case of adjuvant chemotherapy [4].

There are a great number of methods for CTC detecting and allocating which clearly point to researchers interest to this problem. Despite the diversity of methods, the findings of patient screening and determining the clinical prognosis of existing CTC is always associated with a negative prognosis for survival.

THE PROBLEM STATEMENT

Now, the tremendous efforts of doctors and scientists are focused on optimizing the methodological, informational and technical aspects of the CTC detection and evaluation for various types of cancer and, above all, breast cancer, prostate cancer, skin cancer (melanoma), colorectal cancer and micellar lung cancer.

These efforts are mainly aimed at reducing the qualitative and quantitative errors in the CTC calculation, as well as minimizing the CTC loss caused by excessive blood transfusion during treatment. Most of the available approaches for capturing CTC are based on the differences in these cells from normal cellular blood components by physical (size, density, potential difference) and molecular (e.g., surface expression) characteristics.

Optical method for estimating the CTC amount in a blood sample is based on automatic digital microscopy. To reduce the time of scanning large areas of cytological preparations, the technology of massive optical fiber scanning is proposed, which can scan 500 times bigger area than automatic digital microscopy technology without degrading the sensitivity of this process for a shorter period of time [5, 6]. There are a number of technologies and systems based on the methods of immunofluorescence, immunomagnetic division, flow cytometry and other immunomagnetic methods that allow the tumor cells isolation by means of magnetic field, using the ability of these cells to interact with antibodies against CTC markers with conjugated magnetic particles [7–14]. But there is no analytical consideration of using such technologies for the purpose of early non-invasive detection of cancer.

The CTC selection was also performed morphologically. One of the directions of such methods development is the detection of the studied CTC by size using microfilters [15, 16]. Although these methods allow a significant increase in resolution, cells are often deformed and destroyed during detection [16, 17], which stimulates to pay special attention to prevent such destruction or to increase the integrity of the detected cellular fractions [15, 17].

One of the most informative markers for the tumor process progression is the CTC in blood, the increased number of which can lead to a more thorough examination of patients in the "asymptomatic period" [18, 19]. According to the results of randomized trials conducted in several clinical and research centers, authors determined the role of the CTC level increasing in the development of tumor progression in breast cancer, prostate and colorectal cancer [20]. In the studied patients, elevated levels of CTC (from 3 to 400 cells per specimen) were detected in 75% of cases.

Table 1. Dependence of the amount of CTC in peripheral blood on the degree of the tumor differentiation [20]

Degree of the tumor differentiation	Number of patients, absolute numbers (%) with CTC > 3n = 30	Number of patients, absolute numbers (%) with CTC < 3n = 10
Well differentiated adenocarcinoma	5 (12,5 %)	3 (7,5 %)
Moderately differentiated adenocarcinoma	9 (25 %)	5 (10 %)
Poorly differentiated adenocarcinoma	16 (42,5 %)*	2 (2,5 %)*

Note: * - a statistically significant difference in the detection of patients with CTC > 3 and < 3 with poorly differentiated adenocarcinoma, p = 0.0235.

According to the standardized requirements for the CTC study, the sample is considered to be positive for any number of CTC which exceeds 3 cells. The degree of tumor differentiation affects the amount of CTC in peripheral blood (Table 1).

Retrospective analysis showed that early relapses and metastases (up to 24 months) developed more frequently in patients with the CTC level of more than 3 cells.

Due to the analysis of numerous studies in this area, the presence of circulating tumor cells in the blood indicates the acquisition of fundamentally new qualities of tumor such as invasiveness and the ability to metastasize. Undoubtedly, CTCs are not the only key to understanding the biology of metastasis, but also a prognostic and predictive newcomer oncomarker that reflects the effectiveness of antitumor treatment. One of the most important issues for improving the methods of determining the CTC is to ensure the separation of integral and intact CTCs with further evaluation and determination of effective criteria for assigning selected cells to malignant neoplasms.

The purpose of the work is to form a complex of criteria for tumor malignancy evaluation and to improve the method of detecting circulating tumor cells in human blood.

COMPLEX OF CRITERIA FOR DETERMINING THE MALIGNANCY OF CIRCULATING TUMOR CELLS

The principle of forming a set of criteria is a combination of the sequential definition of two groups of criteria and the expansion of the criterion space to 5 micron and 3 micron cells.

The 1st group of criteria. By the ISET method [21–24], the definition of tumor malignancy is carried out according to five criterion characteristics: the variation of the nuclei size of isolated cells, anisonucleosis — C1; exceeding the size of the cell nucleus for a triple calibrated pore size — C2; presence of abnormalities of the nucleus (shape, contours, area) — C3; the value of nuclear-cytoplasmic ratio (NCR), that is, the ratio of the area of the nucleus (Sn) to the area of the cytoplasm of the cell (Sc) — C4; the presence of cellular complexes-C5 (Table 2).

Table 2. Criteria for tumor malignancy according to ISET in our version

	Criterion characteristics	Criterion	
1	Anioniculosis is the ratio of different sizes of cell nuclei	$C_1 > 0,5$	
2	Nucleus size	- for 8 μm pore size	$C_2 > 24 \mu\text{m}$
		- for 5 μm pore size	$C_2 > 15 \mu\text{m}$
		- for 3 μm pore size	$C_2 > 7,5$
3	Abnormality of the nucleus (shape, contours, squares)	present	
4	Nuclear-cytoplasmic ratio	high	
5	Cellular complexes	present	

Table 3. Criteria for the degree of the tumor malignancy according to P. Scarft, H. Bloom, W. Richardson [25]

Index	Criterion	Points
Formation of tubular and flow structures	$R_1 > 75\%$	1
	$75\% > R_1 > 10\%$	2
	$R_1 < 10\%$	3
The number of mitoses	$R_2 < 10\%$	1
	$20\% > R_2 > 10\%$	2
	$R_2 > 20\%$	3
Cellular polymorphism	cells of the same size and shape, shallow, with dispersed distribution of chromatin, without nucleoli	1
	small polymorphism of the nuclei and some aggregation of cells	2
	The nuclei are large, of different shapes, with one or more nucleoli and coarse chromatin	3

A detected CTC is considered to be malignant if it meets 4 of the above 5 criteria.

The 2nd group of criteria. To improve the results reliability in the case of some forms of cancer and, when determining the degree of tumor malignancy becomes a complex and time-consuming process, we additionally use the modified scheme of P. Scarft, H. Bloom, W. Richardson [25]. It reveals 3 groups of malignancy according to such characteristics as formation of tubular and flow-like structures (R_1), number of mitoses (R_2), cellular polymorphism (R_3) (Table 3).

The degree of tumour malignancy (hereinafter — DTM) is determined by the sum of points according to three characteristics:

$$\text{DTM} = R_1 + R_2 + R_3$$

Classification of the degree of malignancy:

I (low) — 3–5 points;

II (moderate) — 6–7 points;

III (high) — 8–9 points.

Thus, the developed set of criteria for the DTM is based on a combination of sequential determination on two criteria scales: 1) ISET with the proposed expansion of the criterion space on the cell range (5 microns and 3 microns), and 2) the modified scheme of P. Scarft, H. Bloom, W. Richardson [25].

DETECTION AND EVALUATION OF MALIGNANCY OF CIRCULATING TUMOR CELLS

Using the Isolation by Size of Tumor Cells Isolation Method. The basic method of our study is the Isolation by Size of Tumor Cells (ISET®) method [21, 22, 26]. This innovative, proprietary method allows for the loss of isolation from CTCs (as well as circulating tumor microembolism or clusters from several CTCs), provided that their integrity is maintained and analyzed by various methods, including blood cytopathology [27, 28]. In addition, ISET® Cytopathology for blood is the most sensitive method for CTC diagnosis, which is an early sign of cancer invasion. Long before the metastases, the CTCs flow in the bloodstream and can be diagnosed using this technology. Thus, oncologists receive additional information about the invasive potential of cancer which helps to stop cancer invasion before the formation of metastases [28].

The ISET system is based on the classic cytopathological criteria: tumor cells, originating from various solid tumors (more than 16 microns in diameter) are larger than blood cells. The ISET technology allows quick processing of a blood sample on a filter without using antibodies and isolated unharmed fixed tumor cells up to 8.5 µm in diameter using a standard membrane with a nominal pore size of 8 µm [29].

Improvement of the method. The question of the hypothetical loss of "small" CTC through pores of 8 microns is really important. We emphasize that to this day the minimum size of the CTC diagnosed with different methods was more than 8 microns.

Improvement of the basic method is carried out due to:

- installation of two additional polycarbonate filters with 5 and 3 microns diameter pores,
- providing a mode of 100% sealing of the camera with hemolysis and constant pressure throughout the filtration process,
- use of the developed set of criteria,
- application of the proposed method for processing microscopic CTC images, which enables to detect CTC of any size, integral and intact.

The research was carried out on an experimental installation, which was developed by an author team of scientists from Vinnitsa and Mariupol [30]. Differences in the methods, approaches, information provision and hardware and software used provided practically 100% sealing of the cylinder and the uniform distribution of pressure on CTC during their filtration, as well as the exclusion of the influence of the subjective factor in the process of creating pressure on the sample.

The proposed method involves two stages which are two blocks of research.

The first stage is the allocation of integral intact CTC. The principle of this stage involves filtering of patients' blood through a polycarbonate membrane with specified pore sizes using the ISET system [22] with the inclusion of two additional polycarbonate filters with pores diameter of 5 and 3 microns. Thus, the filtration module consists of 10 membranes; each of them allows to simultaneously filter 1 ml of blood (10 ml of blood) through 10 membranes with 8 µm diameter pores, then 10 membranes with 5 µm diameter pores and 10 membranes with 3 µm diameter pores.

At the first, preparatory step, a blood sample of a patient is prepared for the study. A blood sample of 10 ml (peripheral or venous) obtained from the patient was mixed to prepare hemolysis with 100 ml of distilled water. The prepared sam-

ple was mixed in a haematological scanner-analyzer such as Vision Hema @ Assist. Next, we performed citation tests — the division of the blood sample into plasma, red blood cells, lymphocytes, platelets with selective removal of pathologically altered cells using a centrifuge-generator of the scanner. The degree of sedimentation of the particles in the solution (precipitation or expulsion, depending on the density of the solution) was estimated by the sedimentation factor (S):

$$S = \frac{M(1 - \bar{V}\rho)}{f},$$

where M — is the molecular weight of the particle; f — is a form of the particle (coefficient of friction); \bar{V} — is the partial volume of particle; ρ — is the solution density.

The preparatory step ended with the procedure of disaggregation of cells and lyse of red blood cells (within 20 minutes). The general view of the membrane with the study areas is presented in Fig. 1.

In subsequent steps, the membranes were dried, washed with 96% alcohol or phosphate-basic buffer. We performed cytomorphological, cytoimmunological and molecular analysis on the slots of the received membranes. The painting of slots was carried out using the Romanovskii-Giemsa methods or the modified May-Grunwald-Giemsa method [30].

After filtration and appropriate treatment of the membrane, the doctor receives a sample of the cell preparation.

The study process involved the step-by-step obtaining of microscopic images of the CTC, where we can see the lymphocyte (1), the CTC (2), the nuclear-free CTC, i.e. the CTC death due to the courses of therapy or the body's immune response (3), and filter pores (4) (Fig. 2).

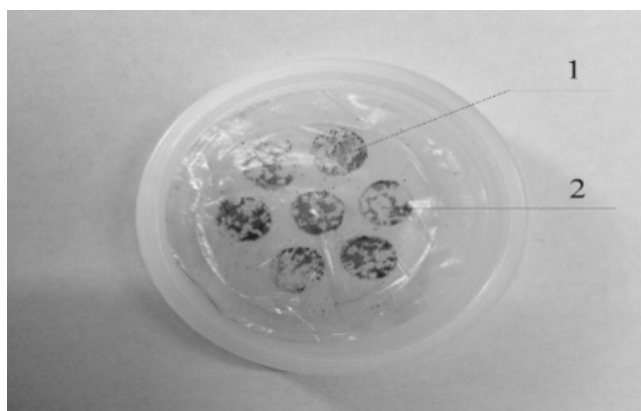


Fig. 1. The general view of the membrane with the study areas (1 — the site was treated with Cytokeratin clon AE /1 AE /3; 2 — the site was treated according to Romanovskii-Giemsa)

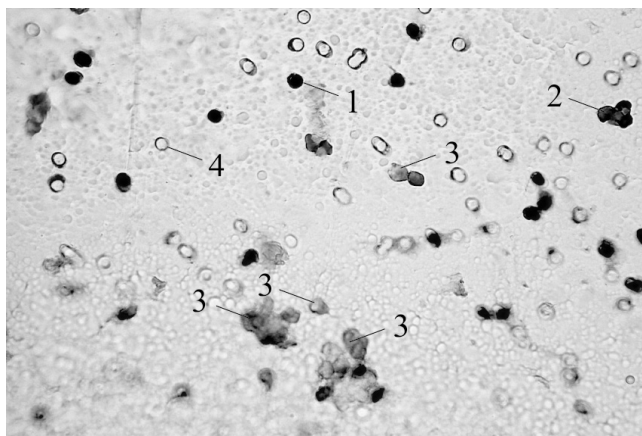


Fig. 2. Results of the CTC detection

Thus, the first stage of the advanced method of the detection and allocation of integral intact circulating tumor cells comprised the following steps: step 1 — preparation of a patient's blood sample for research; step 2 — the blood sample division into plasma and uniform elements with the help of a centrifuge-generator of the scanner; step 3 — sedimentation of particles in solution (sedimentating) or (expulsion) and determination of degree of sedimentation.

The second stage II — confirmation of the tumor malignancy. This is the key stage of the method because it is precisely at this stage we determine whether there are CTCs in the patient's blood. At the first steps of this stage, confirmation of tumor malignancy is carried out using the developed set of criteria described above. For this purpose, the criteria of the first group are sequentially determined. If there are at least 4 criteria out of 5 in this group, the primary conclusion about the tumor malignancy is drawn.

As a result of empirical and practical laboratory studies using the ISET method, we found out that the NCR of two or even three cancer cells might have practically the same meaning for essentially different sizes of CTCs and their nuclei. To avoid the ambiguity of the results integration, we proposed to switch to the absolute sizes of cells and their nuclei and introduce a blood contamination index, which was defined as the amount of CTCs detection in 1 ml (or 10 ml) of blood.

For the final examination of the results of the tumor malignancy evaluation, we compared them with the CTC template masks and benign tumor cells. The algorithm for evaluation of tumor malignancy is presented in Fig. 3.

Automated CTC image formation. The developed method is the basis of the automated system for the CTC digital images analysis [31, 32]. In order to automate the analysis of a biomedical image, in particular blood cells, in the first stage imaging procedures are performed that are associated with suppressing the distorting factors of the image (filtering obstacles, eliminating lighting inequalities, etc.).

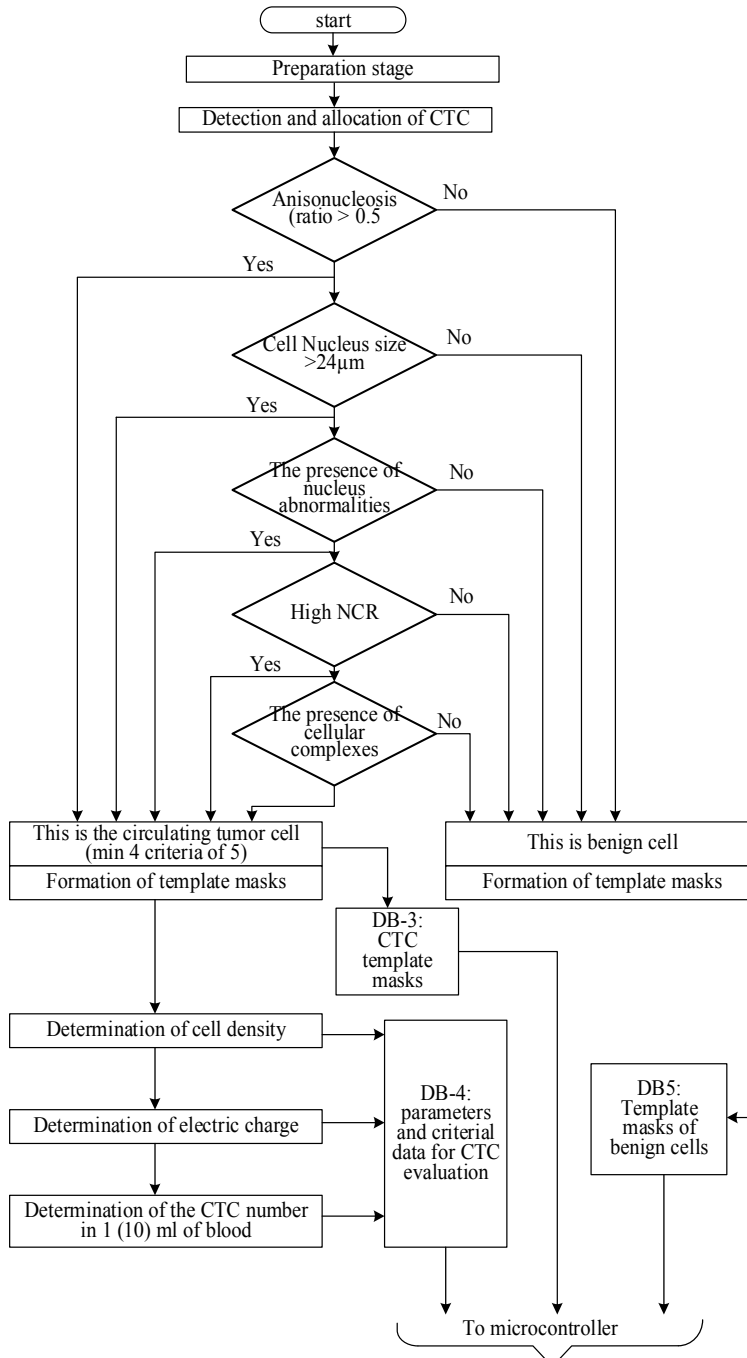


Fig 3. An algorithm for determining the tumor malignancy

Next, the process of scanning images of cells located on the surface of polycarbonate membranes is carried out. The size of the image which is scanned in one step of the microscope's subject table should not exceed the microscope monocular diameter. At the beginning of the process of scanning the 8 µm pores

membrane, there are images (scans) that lack any cells or their formation regardless their origin (malignant or benign) and they are excluded from further processing and analysis. Detected scans with existing cells or their entities are recorded and stored in the appropriate database (DB 1). After completion of the 8 μm pores membrane scanning, all of the above procedures are performed with the 5 μm pores membrane (DB 2), and then with the 3 μm pores membrane (DB 3). The databases with CTC images scanning of various sizes provide a qualitative and flexible classification of types of cancer and create the basis for oncological patients' registration with their CTCs.

The further steps of this stage deal with the identification of disseminated tumor cells and CTCs. Bringing the image to the required quality is based on changing the contrast of the image, changing the narrowed or shifted range of pixel brightness of the image, and its uneven filling, etc. [33].

Processing of histological sections images containing cellular structures is a set of solutions of the following tasks: evaluation of visual quality of digital images; linear image filtering; threshold processing; median filtration. Figure 4 shows the CTC image after calculating the brightness gradient (Fig. 4a) and the CTC image after filling in the inner regions (Fig. 4b).

At the description stage we perform the definition and calculation of feature characteristics of the object which are the basis for the third step connected with the assignment of an object to a particular class. The description stage is the main stage out of these three. The choice of signs and their informativity (the possibility of attributing an object to a particular class due to its characteristics) are crucial in determining the result of detection.

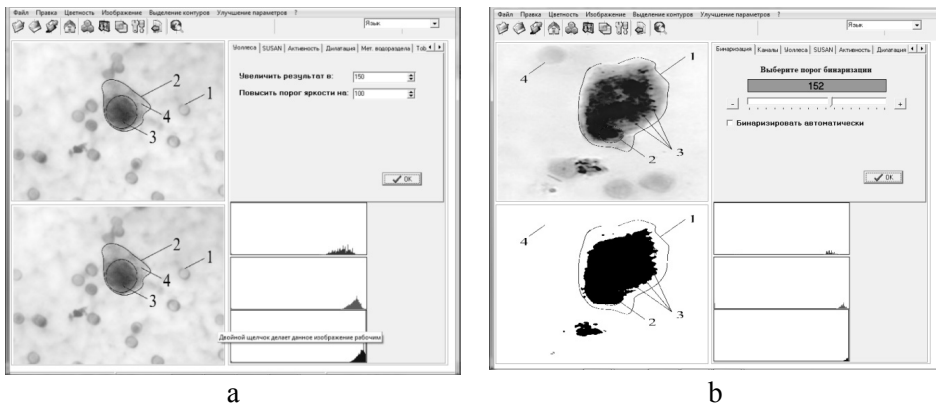


Fig 4. CTC image after calculating the brightness gradient (a) and the CTC image after filling in the inner regions (b)

RESEARCH USING THE PROPOSED METHOD

We performed the analysis of peripheral blood samples in patients with primary diagnosis of colon, breast, lungs, prostate and skin cancer. Blood samples were provided by oncology centers and clinics in Mariupol, Vinnitsa and Ternopil, and were encoded by the name of the city and the serial number of the sample. The studies were conducted at the specified clinical bases simultaneously with other methods because of the need to adhere to certain requirements, such as: blood sampling should be 10 ml in anticoagulant test tubes EDTA (blood from the peripheral vein); storage time before the analysis beginning should be no more than 90 minutes; storage temperature should be 4 °C; blood dilution in the ratio of 1:10 (up to 100 ml) should be performed with a proprietary buffer solution (sanolin, paraformaldehyde, EDTA, pour albumin), which was used for red blood cells lysis [34, 35].

The obtained results analysis showed that the use of the developed method enabled to determine false-positive diagnoses in 6.2–8.9% of cases.

We also found out that in patients with colorectal cancer, CTC in the blood was more often detected in the case of low-differentiated tumors. In patients with breast cancer, the most cases of CTC detection fell on the third stage of the disease (85% or 12 patients), other 15 % were on the second stage. It should be noted that most patients with prostate cancer with detected CTC had metastases in the liver and bones. The obtained data for small-cell lung cancer did not contradict the literary data indicating a decrease in the CTC incidence in non-small cell lung cancer than in the case of small-cell lung cancer. A similar conclusion can be made about skin cancer. That is, the obtained results correlate with a high degree of statistical significance (> 95%) with the data suggested by the literature.

We sent the obtained microscopic CTC images and diagnosis made according to them with unchanged codes to the appropriate clinics and conducted a final discussion of these results. After a full-format analysis, we performed the correction of range and treatment tactics in cases where it was necessary.

CONCLUSIONS

The proposed method for determining circulating tumor cells, which is an improvement of ISET technology, combines two stages. At the first stage we improved the ISET technology by adding two additional polycarbonate filters with 5 and 3 micron diameter pores, and providing a mode of 100% sealing of the chamber with hemolysis, and constant pressure throughout the filtration process. At the second stage, we carried out the DTM of the isolated cells using the developed set of criteria. The application of the proposed method for processing microscopic CTC images allows to detect smaller CTCs than in the case of using traditional methods, and to ensure their integrity and intactness.

The use of the developed method in the automated system for the digital images analysis of circulating tumor cells provides the detection and calculation of characteristic features for assigning an object to a certain class of malignancy. Scanning of images of the researched cells is carried out and detected scans with existing cells or their entities are sequentially recorded and stored in the appropriate database. For the final examination of the results of the tumor malignancy evaluation, comparisons are made with the CTC template masks and benign tumor cells.

Clinical and experimental study using the proposed method for CTC detecting revealed an opportunity to clarify the diagnosis and identify false positive diagnoses. The study proved that colorectal cancer was more often diagnosed with low-differentiated tumors and, the highest breast cancer incidence occurred at the third stage of the disease. The effectiveness of the proposed method was also confirmed in patients with other types of cancer.

REFERENCES

1. Krivacic R., Ladanyi A., Curry D., Hsieh H., Kuhn P., Bergsrud D., Kepros J. A rare-cell detector for cancer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2004. V. 101, N 29. P. 10501–10504.
2. Harouaka R., Kang Z., Zheng S.Y., Cao L. Circulating tumor cells: advances in isolation and analysis, and challenges for clinical applications. *Pharmacol Ther.* 2014. Vol. 141. P. 209–221.
3. Tewes M., Aktas B., Welt A., Mueller S., Hauch S., Kimmig R., Kasimir-Bauer S. Molecular profiling and predictive value of circulating tumor cells in patients with metastatic breast cancer: an option for monitoring response to breast cancer related therapies. *Breast cancer research and treatment*. 2009. Vol. 115, N 3. P. 581–590.
4. Danila D.C., Heller G., Gignac G.A. et al. Circulating tumor cell number and prognosis in progressive castration-resistant prostate cancer. *Clin Cancer Res.* 2007. Vol. 13(23). P. 7053–7058.
5. Krivacic R., Ladanyi A., Curry D., Hsieh H., Kuhn P., Bergsrud D., Kepros J. A rare-cell detector for cancer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2004. Vol. 101, N 29. P. 10501–10504.
6. Ntouroupi T., Ashraf S., McGregor S., Turney B., Seppo A., Kim Y., Wang X. Detection of circulating tumour cells in peripheral blood with an automated scanning fluorescence microscope. *British journal of cancer*. 2008. Vol. 99, N 5. P. 789–795.
7. Bauer K., de la Torre-Bueno J., Diel I., Hawes D., Decker W., Priddy C., Bossy B. Reliable and sensitive analysis of occult bone marrow metastases using automated cellular imaging. *Clinical cancer research: an official journal of the American Association for Cancer Research*. 2000. Vol. 6, N 9. P. 3552–3559.
8. Kagan M., Howard D., Bendele T., Mayes J., Silvia J., Repollet M., Doyle J. A Sample Preparation and Analysis System for Identification of Circulating Tumor Cells. *Journal of Clinical Ligand Assay*. 2002. Vol. 25, N 1. P. 104–110.
9. Andreopoulou E., Yang L.-Y., Rangel K., Reuben J., Hsu L., Krishnamurthy S., Valero V. Comparison of assay methods for detection of circulating tumor cells in metastatic breast cancer: AdnaGen AdnaTest BreastCancer Select. Detect™ versus Yeridex CellSearch™ system. *Int. journal of cancer*. 2012. Vol. 130, N 7. P. 1590–1597.
10. Nezos A., Pissimisis N., Lembessis P., Sourla A., Dimopoulos P., Dimopoulos T., Tzelepis K. Detection of circulating tumor cells in bladder cancer patients. *Cancer treatment reviews*. 2009. V. 35, N 3. P. 272–279.
11. Tewes M., Aktas B., Welt A., Mueller S., Hauch S., Kimmig R., Kasimir-Bauer S. Molecular profiling and predictive value of circulating tumor cells in patients with metastatic breast cancer: an option for monitoring response to breast cancer related therapies. *Breast cancer research and treatment*. 2009. V. 115, N 3. P. 581–590.
12. Ignatiadis M, Lee M, Jeffrey SS. Circulating Tumor Cells and Circulating Tumor DNA: Challenges and Opportunities on the Path to Clinical Utility. *Clin Cancer Res.* 2015. No 21(21) P. 4786–800.
13. Alix-Panabieres C, Pantel K. Technologies for detection of circulating tumor cells: facts and vision. *Lab Chip*. 2014. No 14(1) P. 57–62.
14. Ferreira M.M, Ramani V.C, Jeffrey S.S. Circulating tumor cell technologies. *Mol Oncol*. 2016. 10(3) P. 374–94.
15. Gertler R., Rosenberg R., Fuehrer K., Dahm M., Nekarda H., Siewert J. Detection of circulating tumor cells in blood using an optimized density gradient centrifugation.

- Recent results in cancer research. Fortschritte der Krebsforschung. Progres dans les recherches sur le cancer.* 2003. Vol. 162. P. 149–155.
16. Tan S., Yobas L., Lee G., Ong C, Lira C. Microdevice for the isolation and enumeration of cancer cells from blood. *Biomedical microdevices.* 2009. V. 11, N 4. P. 883–892.
 17. Tan S., Yobas L., Lee G., Ong C, Lira C. Microdevice for the isolation and enumeration of cancer cells from blood. *Biomedical microdevices.* 2009. V. 11, N 4. P. 883–892.
 18. Kovalev A.A, Grudinskaya T.V., Kuznetsov T.P., Kovalev K.A. Heterogeneity of circulating tumor cells. *Oncology.* 2012. V.4. No. 2 12.12-12.(in Russian)
 19. Pavlov S.V, Kozhemyako V.P, Burdenyuk I.I. Rami Rebhi Hamdi. Optical and electronic technologies for the analysis of biomedical images. Vinnitsa: VNTU, 2011. 166 p. (in Ukrainian)
 20. Nepomnyashchaya E.I., Kit O.I., Nistratova O.V., Novikova I.A. and others. Circulating tumor cells and some morpho-immuno-histochemical indices at colorectal cancer. *Modern problems of science and education.* 2016. No. 2. (in Russian)
 21. G. Vona, C. Bérout, A. Benachi, A. Quenette, J.P. Bonnefont, Y. Dumez, B. Lacour, P. Paterlini-Bréchot. Enrichment and genetic analyses of fetal cells circulating in the maternal blood by the ISET technique and single cell microdissection: a non-invasive tool for early prenatal diagnosis. *Am. J. Pathol.* 2002. No 160. P. 51–58.
 22. Ismayilova G., Laget S., Paterlini-Brechot P. Diagnosis of circulating tumor cells using ISET technology and their molecular characteristics for fluid biopsy. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-tsirkuliruyuschih-opuholevyh-kletok-s-pomoschyu-tehnologii-iset-i-ih-molekulyarnaya-harakteristika-dlya-zhidkostnoy>. (Last accessed: 08.12.2018)
 23. Ledov V.K., Skrinnikova MA, Popova O.P. Isolation of Circulating Tumor Cells by Isolated Size (ISET) (overview). *Voprosy Oncologii*, 2014. №60 (5). P.548–552. (in Russian)
 24. Baikhenko A.K, Shaimardinova G. M., Popova N.V., Zhusinova B.T., Ismayilova G.N. Circulating Cancer Cells: Molecular Characteristics and Monitoring of Cancer Treatment. *Clinical Medicine of Kazakhstan.* 2013. Vol. 4 №30. (in Russian)
 25. Volchenko N.N. Cytological diagnostics of tumors of the mammary gland. *Mammology*, 2006, No. 1, P. 35–39. (in Russian)
 26. Paterlini-Bréchot P, Benali-Furet NL. Circulating tumor cells (CTC) detection : Clinical impact and future directions. *Cancer Letter.* 2007. No 253. P. 180–204.
 27. Zubtsov D.A., Zubtsova J.I., Lavrov A.V., Legchenko E.V. et al. Circulating tumor cells (CAC) in breast cancer: prognostic significance and methods of excretion. *Trudy MFTI.* 2012. Volume 4. No. 3. P. 18–26. (in Russian)
 28. Chimitov A.A., Ryantsantsev N.V, Dambayev G.T., Khitrichev V.E. and others. Filtration of venous blood of boluses with the aim of cytological diagnostics of malignant neoplasms. *Bulleten VSNi SO RAMN*, 2010. No. 3 (73). (in Russian)
 29. Laget S, Broncy L, Hormigos K, Dhingra DM, BenMohamed F, Capiod T, et al. Technical Insights into Highly Sensitive Isolation and Molecular Characterization of Fixed and Live Circulating Tumor Cells for Early Detection of Tumor Invasion. *PLOS ONE*, 2017, 12 (1): e0169427. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169427>
 30. Ushakova G.O. Modern methods of clinical diagnostics. Guidelines. Dnipropetrovsk: DNU. 2003. 52 p.
 31. Zlepko S.M., Chernyshova T.A., Timchik S.V., Krivonosov V.E., Zlepko O.S. Information system (IS) for receiving and processing microscopic images of circulating tumor cells (CTC). *Achievements of clinical and experimental medicine*, 2017, № 4. P. 39–46. (in Ukrainian)
 32. Azarhov O.Yu., Zlepko S.M., Timchik S.V., Chernyshova T.A., Danilkov S.O Methods and tools for computer analysis of microscopic images of circulating tumor cells. *Bulletin of scientific researches.* 2017. No. 4. P. 162–166. (in Ukrainian)
 33. Golovnya V.M., Zlepko S.M. The system of express diagnostics of formed blood elements. *Measuring and computing engineering in technological processes.* 2010, 2. P. 163–168. (in Ukrainian)

34. Lyadov V.K., Ledin E.V., Skrypnikova M.A. Cytological diagnostics of pancreatic adenocarcinoma by the method of isolating the size of circulating tumor cells from peripheral blood: a message from practice. *Clinical Laboratory Diagnostics*, 2017. No. 11. P. 31–39. (in Russian)
35. Kit O.I., Novikova I.A., Selutina O.N., Dontsov V.A., Chernikova E.N., Samaneya N.Yu., Nistratova O.V. Investigation of the level of the central ankylosing spondylitis in epithelial tumors of various localizations. *International Journal of Applied and Fundamental Researches*. 2018. No. 12-5. P.817–820. (in Russian)

Resieved 26.12.2018

ЛИТЕРАТУРА

1. Krivacic R., Ladanyi A., Curry D., Hsieh H., Kuhn P., Bergsrud D., Kepros J. A rare-cell detector for cancer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2004. V. 101, N 29. P. 10501–10504.
2. Harouaka R., Kang Z., Zheng S.Y., Cao L. Circulating tumor cells: advances in isolation and analysis, and challenges for clinical applications. *Pharmacol Ther*. 2014. Vol. 141. P. 209–221.
3. Tewes M., Aktas B., Welt A., Mueller S., Hauch S., Kimmig R., Kasimir-Bauer S. Molecular profiling and predictive value of circulating tumor cells in patients with metastatic breast cancer: an option for monitoring response to breast cancer related therapies. *Breast cancer research and treatment*. 2009. Vol. 115, N 3. P. 581–590.
4. Danila D.C., Heller G., Gignac G.A. et al. Circulating tumor cell number and prognosis in progressive castration-resistant prostate cancer. *Clin Cancer Res*. 2007. Vol. 13(23). P. 7053–7058.
5. Krivacic R., Ladanyi A., Curry D., Hsieh H., Kuhn P., Bergsrud D., Kepros J. A rare-cell detector for cancer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2004. Vol. 101, N 29. P. 10501–10504.
6. Ntouroupi T., Ashraf S., McGregor S., Turney B., Seppo A., Kim Y., Wang X. Detection of circulating tumour cells in peripheral blood with an automated scanning fluorescence microscope. *British journal of cancer*. 2008. Vol. 99, N 5. P. 789–795.
7. Bauer K., de la Torre-Bueno J., Diel I., Hawes D., Decker W., Priddy C., Bossy B. Reliable and sensitive analysis of occult bone marrow metastases using automated cellular imaging. *Clinical cancer research: an official journal of the American Association for Cancer Research*. 2000. Vol. 6, N 9. P. 3552–3559.
8. Kagan M., Howard D., Bendele T., Mayes J., Silvia J., Repollet M., Doyle J. A Sample Preparation and Analysis System for Identification of Circulating Tumor Cells. *Journal of Clinical Ligand Assay*. 2002. Vol. 25, N 1. P. 104–110.
9. Andreopoulou E., Yang L.-Y., Rangel K., Reuben J., Hsu L., Krishnamurthy S., Valero V. Comparison of assay methods for detection of circulating tumor cells in metastatic breast cancer: AdnaGen AdnaTest BreastCancer Select. Detect™ versus Yeridex CellSearch™ system. *Int. journal of cancer*. 2012. Vol. 130, N 7. P. 1590–1597.
10. Nezos A., Pissimisis N., Lembessis P., Sourla A., Dimopoulos P., Dimopoulos T., Tzelepis K. Detection of circulating tumor cells in bladder cancer patients. *Cancer treatment reviews*. 2009. V. 35, N 3. P. 272–279.
11. Tewes M., Aktas B., Welt A., Mueller S., Hauch S., Kimmig R., Kasimir-Bauer S. Molecular profiling and predictive value of circulating tumor cells in patients with metastatic breast cancer: an option for monitoring response to breast cancer related therapies. *Breast cancer research and treatment*. 2009. V. 115, N 3. P. 581–590.
12. Ignatiadis M., Lee M, Jeffrey SS. Circulating Tumor Cells and Circulating Tumor DNA: Challenges and Opportunities on the Path to Clinical Utility. *Clin Cancer Res*. 2015. No 21(21) P. 4786–800.
13. Alix-Panabieres C, Pantel K. Technologies for detection of circulating tumor cells: facts and vision. *Lab Chip*. 2014. No 14(1) P. 57–62.
14. Ferreira M.M, Ramani V.C, Jeffrey S.S. Circulating tumor cell technologies. *Mol Oncol*. 2016. 10(3) P. 374–94.
15. Gertler R., Rosenberg R., Fuehrer K., Dahm M., Nekarda H., Siewert J. Detection of circulating tumor cells in blood using an optimized density gradient centrifugation.

- Recent results in cancer research. Fortschritte der Krebsforschung. Progres dans les recherches sur le cancer.* 2003. Vol. 162. P. 149–155.
16. Tan S., Yobas L., Lee G., Ong C, Lira C. Microdevice for the isolation and enumeration of cancer cells from blood. *Biomedical microdevices.* 2009. V. 11, N 4. P. 883–892.
 17. Tan S., Yobas L., Lee G., Ong C, Lira C. Microdevice for the isolation and enumeration of cancer cells from blood. *Biomedical microdevices.* 2009. V. 11, N 4. P. 883–892.
 18. А.А.Ковалев, Т.В. Грудинская, Т.П. Кузнецов, К.А. Ковалев. Гетерогенность циркулирующих опухолевых клеток. *Онкология.* 2012. Т.4. №2. С.126–129.
 19. Павлов С.В., Кожем'яко В.П., Бурденюк І.І. Рамі Ребхі Хамді. *Опτικο-електронні технології аналізу біомедичних зображень.* Вінниця: ВНТУ, 2011. 166 с.
 20. Непомнящая Е.И., Кит О.И., Нистратова О.В., Новикова И.А. и др.. Циркулирующие опухолевые клетки и некоторые морфо-иммуно-гистохимические показатели при колоректальном раке. *Современные проблемы науки и образования.* 2016. №2.
 21. G. Vona, C. Bérout, A. Benachi, A. Quenette, J.P. Bonnefont, Y. Dumez, B. Lacour, P. Paterlini-Bréchot. Enrichment and genetic analyses of fetal cells circulating in the maternal blood by the ISET technique and single cell microdissection: a non-invasive tool for early prenatal diagnosis. *Am. J. Pathol.* 2002. No 160. P. 51–58.
 22. Исмаилова Г. Laget S., Paterlini-Brechot P. Диагностика циркулирующих опухолевых клеток с помощью технологии ISET и их молекулярная характеристика для жидкостной биопсии. [https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-tsirkuliruyuschih-opuholevykh-kletok-s-pomoschyu-tehnologii-iset-i-ih-molekulyarnaya-harakteristika-dlya-zhidkostnoy](https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-tsirkuliruyuschih-opuholevykh-kletok-s-pomoschyu-tehnologii-iset-i-ih-molekulyarnaya-harakteristika-dlya-zhidkostnoy-biopsii).
 23. Ледов В.К., Скринникова М.А., Попова О.П. Выделение циркулирующих опухолевых клеток методом «изоляции по размеру» (ISET) (обзор). *Вопр. Онкологии.* 2014. №60(5). С.548–552.
 24. Байченко А.К., Шаймардинова Г. М., Попова Н.В., Жусинова Б.Т., Исмаилова Г.Н. Циркулирующие раковые клетки : молекулярная характеристика и мониторинг лечения рака. *Клиническая медицина Казахстана.* 2013. Vol.4. №30.
 25. Волченко Н.Н. Цитологическая диагностика опухолей молочной железы. *Маммология,* 2006, №1, С. 35–39.
 26. Paterlini-Bréchot P, Benali-Furet NL. Circulating tumor cells (CTC) detection : Clinical impact and future directions. *Cancer Letter.* 2007. No 253. P. 180–204.
 27. Д.А.Зубцов, Ж.И. Зубцова, А.В. Лавров, Е.В. Легченко и др. Циркулирующие опухолевые клетки (ЦОК) при раке молочной железы: прогностическая значимость и методы выделения. *Труды МФТИ.* 2012. Том 4. №3. С. 18–26.
 28. А.А. Чимитов, Н.В.Рязанцева, Г.Ц.Дамбаев, В.Е.Хитрихеев и др. Фильтрация венозной крови больных с целью цитологической диагностики злокачественных новообразований. *Бюллетень ВСНИ СО РАМН,* 2010. №3(73).
 29. Laget S, Broncy L, Hormigos K, Dhingra DM, BenMohamed F, Capiod T, et al. Technical Insights into Highly Sensitive Isolation and Molecular Characterization of Fixed and Live Circulating Tumor Cells for Early Detection of Tumor Invasion. *PLOS ONE,* 2017, 12 (1): e0169427. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169427>
 30. Ушакова Г.О. *Сучасні методи клінічної діагностики. Методичні рекомендації.* Дніпропетровськ: ДНУ. 2003. 52 с.
 31. Злепко С.М., Чернишова Т.А., Тимчик С.В., Кривонос В.Є., Злепко О.С. Інформаційна система (ІС) для отримання та оброблення мікроскопічних зображень циркулюючих пухлинних клітин (ЦПК). *Здобутки клінічної і експериментальної медицини,* 2017, № 4, С. 39–46.
 32. О.Ю. Азархов, С.М. Злепко, С.В. Тимчик, Т.А. Чернишова, С.О. Данилков. Методи і засоби для комп'ютерного аналізу мікроскопічних зображень циркулюючих пухлинних клітин. *Вісник наукових досліджень.* 2017. № 4. С. 162–166.
 33. Головня В.М., Злепко С.М. Система експрес-діагностики формених елементів крові. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 2010, «2, с. 163–168.
 34. Лядов В.К., Ледин Е.В., Скрипникова М.А. Цитологическая диагностика аденокарциномы поджелудочной железы методом выделения по размеру циркулирующих

- опухолевых клеток из периферической крови: сообщение из практики. *Клиническая лабораторная диагностика*, 2017. №11. С.31–39.
35. Кит О.И., Новикова И.А., Селютина О.Н., Донцов В.А., Черникова Е.Н., Саманеева Н.Ю., Нистратова О.В. Исследование уровня ЦОК при эпителиальных опухолях различных локализаций. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. №12-5. С.817–820.

Получено 26.12.2018

Чернишова Т.А., лікар,
e-mail: tetyana.che@gmail.com
Авіаційний медичний центр
Національного авіаційного університету,
просп. Комарова, 1, 03058, Україна

КРИТЕРІЇ ТА МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ЦИРКУЛЮЮЧИХ ПУХЛИННИХ КЛІТИН

Вступ. Сучасні досягнення науки і техніки суттєво розширили можливості розпізнавання злоякісних новоутворень. Наявність великої групи методів виявлення і виділення циркулюючих пухлинних клітин (ЦПК) явно вказує на інтерес, який проявляють дослідники до ЦПК.

Мета роботи — формування комплексу критеріїв оцінювання злоякісності пухлини та удосконалення методу виявлення циркулюючих пухлинних клітин в крові людини.

Результати. Запропонований метод визначення циркулюючих пухлинних клітин, який є удосконаленням технології ISET, об'єднує два етапи. На першому етапі здійснюється виділення ЦПК з удосконаленням за рахунок встановлення двох додаткових полікарбонатних фільтрів з порами діаметром 5 і 3 мкм та забезпеченні режиму 100% герметизації камери з гемолізатом і постійного тиску протягом всього процесу фільтрації. На другому етапі за використання сформованого комплексу критеріїв здійснюється визначення ступеня злоякісності виділених клітин. Використання розробленого методу у автоматизованій системі аналізу цифрових мікроскопічних зображень циркулюючих пухлинних клітин забезпечує визначення і розрахунок характерних ознак для віднесення об'єкта до певного класу злоякісності та формування бази даних сканованих зображень з наявними клітинами або їх утвореннями, а також остаточну перевірку результатів оцінювання злоякісності пухлини за шаблонами-масками ЦПК і доброякісної пухлинної клітини.

Висновки. Застосування запропонованого методу визначення циркулюючих пухлинних клітин уможливило виявлення цих клітин меншого розміру, ніж у разі використання традиційних методів, а також забезпечення їх цілісності та неушкоженості.

Ключові слова: циркулюючі пухлинні клітини, критерії оцінювання злоякісності пухлин, метод визначення циркулюючих пухлинних клітин у крові людини.

Чернышева Т.А., врач,
e-mail: tetyana.che@gmail.com
Авиационный медицинский центр
Национального авиационного университета,
просп. Комарова,1, Киев, 03058, Украина

КРИТЕРИИ И МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ЦИРКУЛИРУЮЩИХ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК

Предложенный метод определения циркулирующих опухолевых клеток, который является усовершенствованием технологии ISET, объединяет два этапа. На первом этапе осуществляется выделение ЦОК с усовершенствованием за счет установки двух дополнительных поликарбонатных фильтров с порами диаметром 5 и 3 мкм и обеспечении режима 100% герметизации камеры гемолиза и постоянного давления в течение всего процесса фильтрации. На втором этапе при использовании сформированного комплекса критериев осуществляется определение степени злокачественности выделенных клеток. Использование разработанного метода в автоматизированной системе анализа цифровых микроскопических изображений циркулирующих опухолевых клеток обеспечивает определение и расчет характерных признаков для отнесения объекта к определенному классу злокачественности и формирования базы данных сканированных изображений с занесением имеющихся клеток или их образований, а также окончательную проверку результатов оценки злокачественности опухоли по шаблонам-маскам ЦОК и доброкачественной опухолевой клетки.

Ключевые слова: циркулирующие опухолевые клетки, критерии оценки злокачественности опухолей, метод определения циркулирующих опухолевых клеток в крови человека.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

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

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

Требования к рукописям статей

1. Рукопись предоставляется на белой бумаге в двух экземплярах (язык — русский, украинский, английский, 12—16 с.) и электронная версия.

К рукописи прилагаются:

- аннотации — на русском и украинском языках (УДК, фамилия, инициалы автора/ов, место работы и адрес, название статьи, 5—6 строк текста, ключевые слова), на английском языке (фамилия, инициалы автора/ов, место работы и адрес, название статьи, текст от 250 слов, с выделением рубрик: введение, цель, результаты, выводы, ключевые слова);

- лицензионный договор;

- сведения об авторе/ах на русском, украинском и английском языках должны включать: ФИО, ученую степень, научное звание, должность, отдел, место работы, почтовый адрес организации, телефон (служ., моб., дом.), E-mail, авторские идентификаторы ORCID или ResearcherID.

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

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

Структура статьи

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

Список литературы на языке оригинала — в порядке упоминания в тексте, по стандарту ДСТУ 8302: 2015.

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

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

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

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

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

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

Требования к текстовому файлу

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

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

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

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

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

Таблицы выполняются стандартным встроенным в Word инструментарием «Таблица». **Ширина таблицы не более 12 см.**

В розничную продажу журнал не поступает.

Оформление подписки для желающих опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.

Подписка осуществляется:

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