

THE PROBLEM OF ENSURING THE STABILITY OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF TECHNOLOGICAL OBJECTS

A. Ladanyuk, L. Vlasenko, N. Lutska, Y. Smityuh

National University of Food Technologies

Key words:

*Intelligent control systems
Stability
Quality*

Article history:

Received 05.03.2019
Received in revised form
21.03.2019
Accepted 05.04.2019

Corresponding author:

A. Ladanyuk
E-mail:
npnuht@ukr.net

ABSTRACT

The intellectual control systems (ICS) of technological objects (processes, aggregates, complexes), which have a number of essential features in terms of automation, which objectively allows it to be categorized into one class are considered. The analysis of ICS structures with logic controllers is carried out, the importance of objective assessments of the stability and quality of control process of technological objects is demonstrated.

It is shown that modern ICS are large complex of systems with a hierarchical structure built on the basis of basic intellectual technologies such as artificial neural networks, genetic algorithms, fuzzy logic, diagnostic and prognostication methods, associative memory, etc., where special attention is devoted to «non-destructive lower level» in their construction. In this case, it is a subject with requirements of typical large complex systems, as well as additional, in particular, specific requirements for its operation in different situations and conditions (depending on the technological object), taking into account various types of uncertainties, insufficiency or redundancy of information, etc.

One of the main requirements, besides the above-mentioned, is the requirement of sustainability of the ICS. The stability of traditional ACS is a well-known and well-studied problem, and for intellectual systems, this characteristic, and especially the methods of its definition, are in the stage of research and development peak. The variants of the most well-known approaches in determination of stability for different types of ICS are considered and presented. It is shown how the method of determination of stability is used when using fuzzy controllers in systems with different additional characteristics. Thus, for essentially non-linear objects with statistical uncertainties and uncertainties that arise in mathematical models, it is inappropriate to use the classical stability criteria of Mikhailov, Rausa-Hurwitz and Nyquist; for non-linear objects with parametric uncertainty and additive control, it is possible to use the Nyquist criterion with the subdivision of areas on a complex plane, and for a neural network system, a small gain factor theorem is used.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-2-3

ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

А.П. Ладанюк, Л.О. Власенко, Н.М. Луцька, Я.В. Смітюх
Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто інтелектуальні системи керування (ІСК) технологічними об'єктами (процесами, агрегатами, комплексами), які мають ряд суттєвих особливостей з точки зору автоматизації, що об'єктивно дає змогу виділити їх в один клас. Виконано аналіз структур ІСК з логічними регуляторами, доведено важливість об'єктивних оцінок стійкості та якості процесів керування технологічними об'єктами.

Показано, що сучасні ІСК — це великі складні системи з ієрархічною структурою, побудовані на основі таких основних інтелектуальних технологій, як штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми, нечітка логіка, методи діагностики та прогнозування, асоціативна пам'ять тощо, де особливо увага приділяється «неруйнуванню нижнього рівня» при їх побудові. При цьому до них висуваються вимоги, характерні для великих складних систем, а також додаткові, зокрема, специфічні вимоги щодо їх функціонування в різних ситуаціях та умовах (залежно від технологічного об'єкта) врахування різних видів невизначеностей, недостатності або надлишковості інформації тощо.

Однією з головних вимог, окрім вищезазначених, є вимога стійкості ІСК. Стійкість традиційних САР — відома і добре досліджена проблема, а для інтелектуальних систем ця характеристика, особливо методи її визначення, знаходяться в стадії дослідження та на піці розроблення. Розглядаються і наводяться варіанти найбільш відомих підходів визначення стійкості для різних типів ІСК. Показано, як змінюється методика визначення стійкості при використанні нечітких регуляторів у системах з різними додатковими характеристиками. Так, для суттєво нелінійних об'єктів із статистичними невизначеностями та невизначеностями, що виникають у математичних моделях, недоцільно використовувати класичні критерії стійкості Михайлова, Рауса-Гурвіца та Найквіста; для нелінійних об'єктів з параметричною невизначеністю та адитивним керуванням можливе використання критерію Найквіста з дододатковим виділенням областей на комплексній площині, а для нейромережевої системи — теорема про малий коефіцієнт підсилення.

Ключові слова: інтелектуальні системи керування, стійкість, якість.

Постановка проблеми і теоретичні основи побудови ІСК. У технічній літературі розглядаються різні аспекти проектування, аналізу та дослідження процесів функціонування ІСК. Одна з останніх теоретичних праць присвячена використанню логічних регуляторів [1; 2], аналізу стійкості баз знань у системах підтримки прийняття рішень приділено увагу в [3]. Найбільш детально матеріал про призначення, склад і забезпечення процесу функціонування ІСК викладено в [4]. У [5] найбільш повно викладені аспекти форму-

вання структури ІСК та побудови баз знань з самоорганізацією, адаптацією та «робастністю». Достатньо велика кількість досліджень присвячена використанню нечітких (логічних) регуляторів для конкретних об'єктів [6—9]. Але в сучасній технічній літературі не зустрічається фундаментальних праць, у яких розглядаються питання стійкості ІСК (визначення стійкості ІСК, забезпечення їх стійкості, критерії і показники стійкості ІСК тощо).

Мета статті: провести аналіз і класифікацію існуючих ІСК технологічними об'єктами та виділити основні їх умови стійкості.

Матеріали і методи. Для подальшого викладення матеріалу необхідно визначити основні терміни і поняття стосовно ІСК, що різними фахівцями інтерпретуються по-різному. Прийmemo, що на нижньому рівні функціонує автоматична система регулювання (АСР), яка забезпечує підтримання необхідного технологічного режиму функціонування з необхідними показниками стійкості та якості перехідних процесів при стабілізації регульованих координат або зміні їх заданих значень в умовах інтенсивних збурень. Тож вважаємо, що виконується принцип «неруйнування нижнього рівня» при створенні ієрархічної структури ІСК за рахунок додавання нових баз даних, знань і необхідних алгоритмів для забезпечення задач оптимізації, адаптації, робастності, координації тощо.

Одним з найбільш поширених термінів є: інтелектуальна система — інформаційно-обчислювальна структура з інтелектуальною підтримкою при розв'язанні задач без участі особи, яка приймає рішення (ОПР). При цьому використовуються основні інтелектуальні технології (штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми, нечітка логіка, асоціативна пам'ять, методи діагностики та прогнозування). Доцільність їх використання визначається можливістю реалізації розподілених схем і структур виконання обчислень без додаткових пошуків інформації, можливості використання простих зрозумілих результатів щодо складного нелінійного об'єкта, опису множини виробничих ситуацій у різних режимах функціонування, пошуку розв'язків слабоформалізованих задач. Часто до цього визначення додається використання знань (knowledge — based system).

Для ІСК технологічними об'єктами необхідно додати вимогу формування знань щодо невідомих характеристик об'єкта та зовнішнього середовища в процесі навчання й адаптації, а отримана інформація використовується в процесі автоматичного прийняття рішень так, що покращуються основні ресурсо- та енергопоказники при виконанні технологічних вимог і обмежень об'єкта.

Основними вимогами до ІСК технологічними об'єктами є:

- наявність необхідної взаємодії з навколишнім середовищем, використання спеціальних інформаційних каналів;
- відкритість системи для підвищення її інтелектуальності (обмін речовиною, енергією та інформацією);
- наявність прогностичних механізмів щодо змін зовнішнього середовища та власної поведінки системи в динамічно змінюваних ситуаціях;
- ієрархічна структура ІСК відповідно до принципу «підвищення інтелектуальності та зменшення вимог до точності при підвищенні рангу ієрархії»

(і навпаки)». В цьому випадку збільшення рівня інтелектуальності та використання сучасних механізмів прийняття рішень в умовах невизначеності компенсують неточність знань щодо моделей об'єкта та його поведінки в різних ситуаціях;

- підтримання функціонування за відсутності зв'язків або керувальних дій від вищих рівнів ієрархії.

Отже, приймається на нижньому рівні ІСК наявність виконавчо-регулювального шару за класичною моделлю АСР, а решта шарів — надбудова, яка відповідає вимогам сучасних інформаційних технологій роботи зі знаннями, що значно розширює функціональні можливості ІСК. Мінімальна надбудова — база знань, яка складається, наприклад, з кількох продукційних правил. У цьому випадку інтелектуальність забезпечена «у малому». При трьох шарах ІСК має інтелектуальність «у великому», при чотирьох — «у цілому».

Для різних технологічних об'єктів існують об'єктивно свої вимоги до їх функціонування в різних ситуаціях та умовах, але на основі системного аналізу поведінка «об'єкта-системи» може описуватись нематематичними засобами у базі знань, де формуються розв'язки на відміну від рішень диференціальних рівнянь на правилах, нечіткій логіці, нейронних мережах. ІСК будь-якого призначення повинна реалізувати основні функції:

- *збір даних та їх попередня (первинна) обробка.* При виконанні цієї функції головною метою та вимогою є отримання інформації про стан об'єкта, виробничі ситуації та рекомендації щодо керувальних дій;

- *формування керувальних дій.* Особливого значення тут набувають робастні методи для забезпечення ресурсо- та енергоефективності;

- *навчання та адаптація.* Для створення робастно-адаптивної системи керування математичні моделі, алгоритми керування, бази знань та інші інструменти формування керувальних дій повинні адаптуватись до змін середовища через ідентифікацію, логічні висновки, набуття знань і навчання;

- *виконання керування, тобто формування керувальних дій* реалізується за допомогою інтелектуального адаптивного комплексу виконавчих засобів та здійснює вплив на об'єкт з урахуванням виробничої ситуації.

Тож загальна проблема оцінки стійкості ІСК повинна розв'язуватись з позицій системного аналізу методами декомпозиції, зокрема стійкість нижнього виконавчого рівня, стійкості рішень, які приймаються у відповідних ситуаціях, стійкості баз знань (правил) з урахуванням можливостей оптимізації, адаптації, робастності, координації, діагностування і прогнозування. В цій проблемі, очевидно, неможливо і недостатньо орієнтуватись на формалізовані критерії як для одноконтурних лінійних АСР, а кожному шару (рівню) ієрархічної структури ІСК формулювати свої вимоги, моделі, обмеження та додаткові механізми узгодження цих вимог за рахунок багаторівневої підсистеми координації. В технічній літературі практично не розглядається як окремий показник *стійкість об'єкта (технологічного процесу)*, але часом доводиться в структуру системи автоматизації вводити додаткові контури для забезпечення цього показника, в найпростішому вигляді як від'ємний зворотний зв'язок для забезпечення властивості самовирівнювання об'єкта. Очевидно, цю властивість передають технологам та іншим фахівцям, що проектують

сам об'єкт, в якому забезпечується певний технологічний режим, а координати стану обмежені нерівностями $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$, або належностями до допустимих множин типу $x \in \Omega_x^{\text{доп}}$. Такі ж обмеження формуються для керувальних дій U , вихідних дій Y та збурень. Мова йде про об'єкти промислового призначення, тому що для спеціальних об'єктів (наприклад, атомної енергетики) формуються інші показники. При цьому приймається, що ІСК розробляється для стійких технологічних об'єктів, які протягом заданого часу забезпечують виконання регламентованих показників процесу функціонування в різних ситуаціях для випуску заданої кількості продукції потрібної якості в умовах обмежень на ресурси (матеріальні, енергетичні, трудові тощо).

Викладення основних результатів дослідження. З огляду на складність проблеми стійкості в сучасних ІСК, в [1] визначається актуальна проблема аналітичного моделювання з урахуванням невизначеностей на основі статистичних диференціальних рівнянь, нечітких диференціальних рівнянь і диференціальних включень з урахуванням властивостей нечітких регуляторів. У цій та інших працях зазначається, що такі системи є суттєво нелінійними і класичні критерії стійкості Рауса-Гурвіца, Михайлова, Найквіста не можуть застосовуватись, натомість рекомендується використовувати класичний та узагальнений методи функцій Ляпунова. Варто відзначити, що є специфічні вимоги до стійкості керованих систем, наприклад, безпеки людей, економічних і фінансових систем тощо. Часто ставиться задача наявності чи отримання наближених моделей у вигляді диференціальних і різницевих рівнянь. У цьому випадку початкова модель за допомогою універсальної апроксимації приводиться до виду моделі Тагачі-Сугено (ТС-моделі) [10]. Тоді для оцінки стійкості та стабілізації системи на основі ТС-моделей використання методу функцій Ляпунова зводиться до аналізу лінійних матричних нерівностей, вид яких визнається як функцією Ляпунова, так і обмежень. В [1] дослідження стійкості динамічних систем з логічними регуляторами базуються на розвитку функцій Ляпунова, спектрально-біфуркаційного та інших методів, у тому числі представленні нелінійних систем за допомогою ТС-моделей, але при цьому визначається, що умови стійкості і стабілізації не мають загальних підходів, а можуть використовуватись лише для деяких класів систем, наприклад, робототехнічних, які аналізуються як перевернутий маятник.

У праці [6], яка має прикладний характер, запропоновано методика синтезу стабілізуючого регулятора для нелінійних об'єктів з параметричною невизначеністю та адитивним керуванням, наведено результати комп'ютерного моделювання. Нечіткий регулятор має нелінійну характеристику «вхід-вихід», тому в адаптивній системі характеристики цього регулятора можуть визначатись з точністю до параметрів. Це одна з праць, в якій не висувається вимога гарантованої стійкості об'єкта автоматизації. Показано, що для забезпечення стійкості можна застосовувати частотний критерій. Для цього на комплексній площині виділяється спеціально сформоване коло і далі висувається вимога розташування нелінійності та годографа Найквіста щодо цієї області. Це так званий круговий частотний критерій стійкості для систем зі стійкою лінійною частотою. Для систем з адаптивними нечіткими регулято-

рами пропонується структура системи з двома регуляторами (рис. 1): Нечіткий регулятор у прямому контурі НР та супервізорний СР, який включається в роботу лише за умови досягнення межі області D_x на комплексній площині (D_0 — задана область).

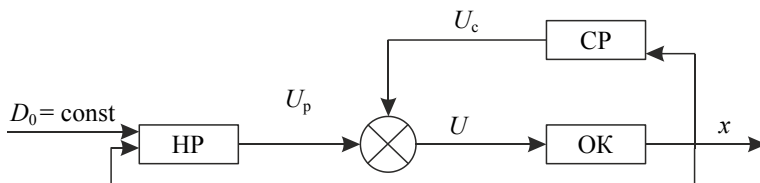


Рис. 1. Структура нечіткої АСР

На рис. 1 модель об'єкта подається у координатах стану: x — координати; U_p , U_c , U — відповідно, вихід нечіткого регулятора, супервізорного, загальний сигнал керування.

Супервізорний регулятор формує керувальний вплив, який включається лише для повернення об'єкта в межі заданої області (цей регулятор названо стабілізуючим). Математичне забезпечення системи достатньо громіздке, тому навести його неможливо. Головний висновок дослідження полягає в тому, що описаний підхід можна використовувати для стабілізації об'єктів з параметричною невизначеністю.

У статті [7] дається більш детальний аналіз розв'язання задачі забезпечення стійкості системи з нечіткими регуляторами, звертається увага на урахування невизначеностей, нестационарностей, післядія об'єктів керування, що потребує спеціальних підходів, насамперед адаптивних, робастних, нечітких, нейронних для зменшення впливу нечітких характеристик та недостатньої оцінки властивостей як об'єкта, так і зовнішнього середовища.

Звертається увага на те, що нечітке керування базується не стільки на теоретичних та аналітичних методах, скільки на експертних знаннях, найбільш часто у вигляді логічних конструкцій типу продукційних правил «*IF ... THEN*». При цьому нечіткі регулятори дають змогу реалізувати ефективне керування об'єктами із суттєвими нелінійностями, а нейронні мережі — це спрощена біологічно подібна структура, головною особливістю якої є адаптивне навчання. Відомий вчений, один з основоположників нечіткого керування Мамдані (Mamdani) писав: «Промисловість ніколи не вимагала, щоб аналітичний аналіз стійкості був необхідною та достатньою умовою для визнання добре розробленої системи керування. Така умова — це просто бажання вчених, але воно не має жодної цінності за межами академічних кіл. Значно важливішим, ніж аналіз стійкості, є дослідження прототипу: самостійний аналіз стійкості ніколи не можна вважати достатнім тестом. Більш того, в будь-якій практично корисній методології етап аналізу стійкості — бажаний, але менш додатковий, не необхідний етап».

Водночас для традиційних методів теорії керування дослідження стійкості є обов'язковою умовою працездатності системи, у тому числі різного призначення, а для нечітких систем це може зменшити помилки не лише при проектува-

нні, а й при експлуатації. В цьому напрямі заслуговує на увагу дослідження [8], у якому наведені результати імітаційного моделювання системи з нечітким регулятором та алгоритмом виведення Мамдамі (Сугено), що дало можливість дослідити фазові траєкторії системи, зокрема фазовий портрет поблизу стійкого фокуса.

Прикладом практичної розробки системи з нечіткими регуляторами є праця [9], у якій побудовані нелінійні математичні моделі автоматичного керування паровою турбіною в просторі станів з різними регуляторами. Запропонована векторна цільова функція для багатоцільової оптимізації систем керування паровою турбіною та представлені результати багатоцільового параметричного синтезу нелінійних систем стабілізації частоти, виконано порівняльний аналіз якості системи керування зі стандартними та нечіткими регуляторами, показана перевага останніх, використано комплекс методів для оптимізації векторної цільової функції: адаптації кроку пошуку, Хука-Джівса, Нелдера-Міда, модифікований генетичний алгоритм.

У [11—13] розглядається стійкість нейромережевої системи, яка є інтелектуальною «у малому» та включає стандартний ПІД-регулятор і нечіткий регулятор. Показана можливість використання для аналізу стійкості такої нелінійної системи, теореми про малий коефіцієнт підсилення. Зазначено, що можна знайти такий лінійний закон керування зі зворотним зв'язком в еквівалентній структурній схемі нелінійної АСР, в якій всі перехідні процеси відносно зовнішніх сигналів будуть асимптотично стійкими у цілому. В [9] показана також можливість забезпечення відмовостійкості об'єкта за допомогою нейромережевого регулятора, який включає додаткові програми керування або спрощені алгоритми для дублювання основних, які обираються за допомогою селектора.

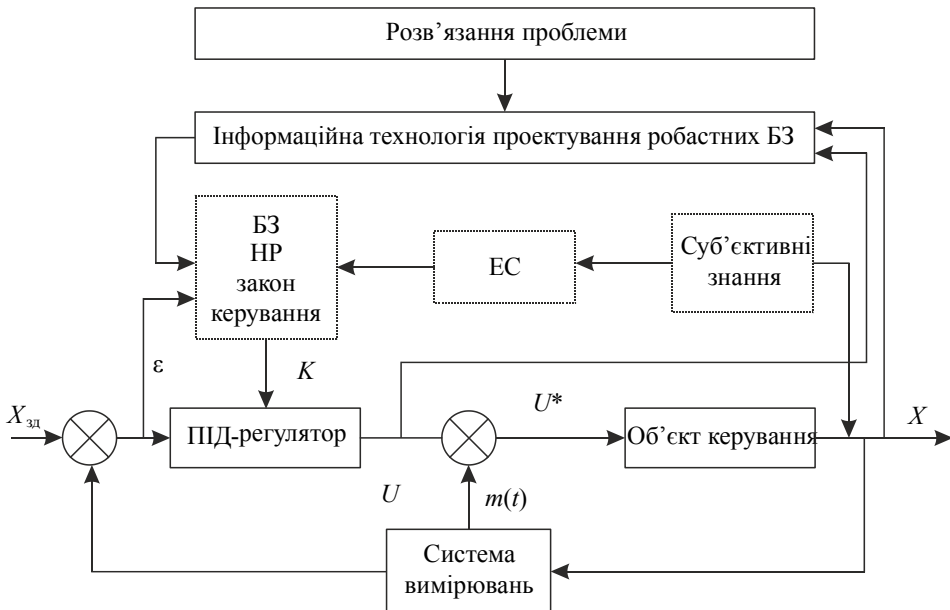


Рис. 2. Структура типової ІСК технологічним об'єктом

Узагальнюючи викладений матеріал, можна навести найбільш використовувану ІСК для технологічних об'єктів (рис. 2) [5], яка доповнюється та змінюється при урахуванні особливостей характеристик і процесів функціонування об'єкта.

На рис. 2 позначено: $X, X_{зд}$ — відповідно, регульована координата та її задане значення; $e = X_{зд} - X(t)$, U, U^* — відповідно, вихід регулятора та його значення з перешкодою $m(t)$; НР — нечіткий регулятор; ЕС — експертна система. Вихідний сигнал з НР визначає вектор параметрів ПД-регулятора $K = \{K_p, K_i, K_d\}$ — коефіцієнти, відповідно, пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. Експертна система ЕС використовується тоді, коли технологія проектування включає експертні продукційні правила в БЗ у вигляді продукційних правил та їх інтерпретації на основі аналізу координат X .

Висновки

1. Інтелектуальні системи керування технологічними об'єктами (процесами, агрегатами, комплексами) — основний напрям підвищення ефективності функціонування об'єктами різної природи, призначення та складності. В ієрархічній структурі виділяються різні шари за інтелектуальністю «в малому», «у великому» та «у цілому». Ці системи відкриті, тому існують широкі можливості додавання до нижнього виконавчого шару ефективних алгоритмів оптимізації, адаптації, робастності, координації, прогнозування, діагностика тощо.

2. Різні методи аналізу нечітких систем керування не дають, як правило, чіткого обґрунтування стійкості, а лише забезпечують можливість перевірки працездатності за існуючих збурень і вихідних сигналів, початкових умов тощо.

3. Для більшості практичних задач ефективним є використання емпіричних та експериментальних підходів з подальшим застосуванням комп'ютерного моделювання, але при цьому не існує можливості узагальнення результатів на класи об'єктів, особливо багатовимірних і з внутрішніми перехресними зв'язками.

4. Типовою структурою для забезпечення та підвищення інтелектуальності АСР є надбудова у вигляді баз даних і знань (правил) з можливістю використання продукційних правил, зокрема для адаптації параметрів типових регуляторів до зміни виробничих ситуацій.

5. Необхідною умовою стійкості ІСК в цілому є стійкість технологічного об'єкта як властивість функціонування із заданими показниками щодо якості та кількості продукції, використання обмежених ресурсів у системах і нештатних ситуаціях.

6. Для оцінки стійкості ІСК необхідно застосовувати системний аналіз і декомпозиційний підхід, що визначає свої моделі, критерії й обмеження на різних рівнях ієрархічної структури, наприклад, для шару АСР або баз знань і процесу прийняття рішень.

Література

1. Дружинина О.В., Масина Н.О. О подходах к анализу устойчивости нелинейных динамических систем с логическими регуляторами. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2017. Том 13, № 2. С. 40—49.

2. Lam H.-K., Leung F.H.F. Stability Analysis of Fuzzy-Model-Based Control Systems: Linear-Matrix-Inequality Approach. . *Berlin: Springer*, 2011. 785 p.
3. Цыганок В.В. Повышение устойчивости баз знаний систем поддержки принятия решений к погрешностям экспертного оценивания. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2010. Том 12, № 4. С. 90—96.
4. Трофимов В.Б., Кулаков С.М. Интеллектуальные автоматизированные системы управления технологическими объектами. Москва: Инфа-инженерия, 2016. 232 с.
5. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Интеллектуальные системы управления. I. Квантовые вычисления и алгоритм самоорганизации. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2009. № 6. С. 102—141.
6. Соловьев В.В., Номерчук А.Я., Денисенко М.Е. Устойчивость систем с адаптивными нечеткими регуляторами. *Известия ЮФУ. Технические науки: Тематический выпуск: Проблемы управления в топливно-энергетических комплексах и энергосберегающие технологии*. 2014. № 5(154). С. 30—36.
7. Белоглазов Д.А., Косенко Е.Ю. Анализ методов устойчивости нечетких систем управления. *Известия ЮФУ. Технические науки: Тематический выпуск*. 2013. № 2(139). С. 128—132.
8. Манчук Д.А., Черный С.П. Анализ устойчивости нечетких систем управления в малом, большом, в целом. *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 5—1. С. 74—75.
9. Северин В.П., Никулина Е.Н., Черной В.Ф., Годлевская К.Б. Многоцелевой синтез нелинейных систем управления паровой турбиной АЭС по прямым показателям качества. Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит: Спец. выпуск. 2013. Т 2, № 8(114). С 134—140.
10. Talagaev Y.V. An approach to analysis and stabilization of Takagi-Sugeno fuzzy control systems via superstability conditions. *IFAC-PapersOnLine* 2015. Volume 48, Issue 11. P. 426—433.
11. Васильев В.И., Идрисов И.И. Алгоритмы проектирования и анализа устойчивости интеллектуальной системы управления ГТД. *Вестник УГАТУ*. 2008. Т. 11, № 1. С 34—42.
12. Гулина И.Г., Мартыненко А.А., Гулин А.А. Построение интеллектуальных прогнозирующих систем управления нелинейными технологическими процессами. *Системы обработки інформації*. 2017. Вип. 3 (149). С 101—105.
13. Nelles O. Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural and Fuzzy Models. *Berlin: Springer*, 2001. 785 p.