

УДК 004.02

*Петренко К.М., Манко Г.І.***АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ
УПРАВЛІННЯ****ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна**

В даній роботі розглянуті питання автоматизації процесу ідентифікації динамічних об'єктів. Досліджено використання комп'ютерних технологій для забезпечення автоматизації процесів ідентифікації об'єктів управління. Виконаний аналіз існуючих методів оцінки адекватності моделей, що отримуються в ході ідентифікації, відмічені обмеження застосування цих методів. Обґрунтовано використання інформаційного підходу при розв'язанні задач оцінювання адекватності математичних моделей. Запропоновано використання універсальної, придатної при будь-якому методі ідентифікації інформаційного оцінювання адекватності на основі поняття корисної інформації Бонгарда. Наведені формули зручні для практичного використання при порівняльному оцінюванні точності моделей об'єктів управління різного типу. Описаний процес проектування графічного інтерфейсу користувача – Graphical User Interface (GUI) в спеціалізованому середовищі GUIDE системи MATLAB. Спроектований GUI дозволяє в інтерактивному режимі з максимальною мірою автоматизації виконувати ідентифікацію динамічних об'єктів. При цьому створення моделі і оцінювання її адекватності здійснюється з використанням різних методів. Розроблені сценарії і функції GUI вводять дані експериментальних досліджень динамічного об'єкта, усереднюють, нормалізують і виконують їх апроксимацію передатною функцією першого, другого, третього або четвертого порядку, виконують побудову графіків кривих розгону об'єкта і кривої відгуку моделі. Апроксимація здійснюється використанням функції мінімізації з обмеженнями *fmincon*. Наведені фрагменти функцій, що здійснюють апроксимацію кривої розгону об'єкта і розрахунок значень інформаційного критерію адекватності. Пересуванням слайдерів GUI можна коригувати модель, домагаючись бажаного виду кривої відгуку і контролюючи при цьому значення критерію адекватності. Використання GUI забезпечує побудову високоточних моделей динамічних об'єктів управління з мінімальними витратами часу. Використання інформаційного критерію адекватності дозволяє вибрати найбільш адекватну модель.

Ключові слова: графічний інтерфейс, ідентифікація, адекватність, комп'ютерні технології, крива розгону, передатна функція.

Постановка проблеми

Побудова якісної автоматизованої системи управління починається з ідентифікації об'єкта управління. В ході експериментального дослідження об'єкта управління будується крива розгону. Для її отримання треба на вхід об'єкта здійснити ступінчастий вплив. Визначають чинник, який впливає на регульовану величину, наприклад, температуру можна регулювати зміною подачі граючої пари. Стрибком змінюють вхідну дію на 10–20 відсотків ходу виконавчого механізму і спостерігають за зміною регульованої ве-

личини. Далі треба створити математичну модель, перехідний процес у якій при ступінчастій зміні вхідної величини якнайкраще співпадає з експериментальною кривою розгону. Найчастіше використовується модель у вигляді передатної функції n -го порядку:

$$W(s) = \frac{b_m \cdot s^m + b_{m-1} \cdot s^{m-1} + \dots + b_1 \cdot s + b_0}{a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s + a_0} \quad (1)$$

або матрична модель у просторі станів наступ-

ного вигляду:

$$X' = AX + BU;$$

$$Y = CX + DU. \quad (2)$$

Процес ідентифікації складається у виборі порядку моделі, а також у визначенні значень коефіцієнтів a_i та b_i або матриць коефіцієнтів A , B , C і D .

Виникає задача, по-перше, максимально автоматизувати цей процес, по-друге, надати можливість корекції коефіцієнтів для отримання бажаного перехідного процесу моделі, по-третє, забезпечити порівняльне оцінювання адекватності моделей для вибору кращої з них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Теорія ідентифікації динамічних об'єктів широко надана в науковій літературі. Значний вклад внесли Р. Ейкгофф, А. Седж, І. Задех, А.М. Дейч, В.В. Кафаров, Н.С. Райбман, Я.З. Ципкін та ін.

Загальні питання філософії та методології процесів ідентифікації і адекватності математичних і комп'ютерних моделей розглянуті в [1]. Окрема увага приділена питанням оцінювання невизначеності, яка ускладнює процес обґрунтування правильності моделей, створюючи ситуацію, в якій ані модельована, ані спостережувана поведінка системи не відома з упевненістю.

Н.С. Райбман виконав огляд методів ідентифікації, розроблених в Інституті проблем управління [2]. Це, переважно, теоретичні розробки. Особливу увагу в ньому приділено АСІ — адаптивним системам управління з ідентифікатором у колі зворотного зв'язку.

Питання оцінювання динамічних параметрів специфічних об'єктів — аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) — розглядаються в роботі [3]. Описується апаратно-програмна реалізація автоматизованої системи оцінювання динамічних параметрів АЦП.

У статті [4] отримані аналітичні вирази, що дозволяють визначити динамічні характеристики об'єктів управління за параметрами перехідних функцій замкнутих систем. Проте автоматизація такого процесу вкрай ускладнена.

У роботі [5] розглянуті особливості ідентифікація об'єктів управління засобами Toolbox PID Tuner у середовищі MATLAB. Треба зазначити, що такий підхід накладає низку обмежень. Наприклад, обмежений вибір структури передатної функції такими варіантами:

— один дійсний корінь (перший порядок);

— два дійсні корені (другий порядок);

— два комплексно зв'язаних кореня (другий порядок);

— два комплексно зв'язаних кореня і один дійсний корінь (третій порядок).

Указується, що автоматична ідентифікація не завжди дає задовільні результати.

Низка публікацій присвячена проблемам оцінювання адекватності моделей динамічних об'єктів.

О.М. Трунов [6] дає огляд робіт, присвячених пошуку загальних закономірностей добору критеріїв встановлення адекватності, в яких використовуються для цього різні поняття та способи кількісного виміру, а також різні міри близькості моделі до ідентифікованого об'єкта. Автор справедливо констатує, що вибір практичної реалізації процесу апроксимації суттєво ускладнюється у силу відсутності єдиного способу виміру адекватності, і пропонує використання «єдиного виразу оцінювання адекватності, що дозволяє враховувати декілька факторів впливу та запропонувати вирази для їх розрахунку». Пропонується як оцінювання нижньої границі величини адекватності використовувати показник ефективності процесу побудови моделі, зворотно пропорційний до середньо-квадратичного відхилення (СКВ) моделі від експериментальних значень. Такий підхід не можна вважати зовсім коректним, оскільки ідентифікація звичайно відбувається методом найменших квадратів, тобто і отримання моделі і її оцінювання здійснюються однаково — з визначенням квадрату різниці вихідних сигналів об'єкта і моделі. До того ж вибір критичного значення оцінки точності моделі за методом найменших квадратів пов'язаний, як правило, з цільовим призначенням моделі, при цьому одностаночно не вирішується.

Дисперсійні методи оцінювання адекватності відомі з середини минулого сторіччя. Вони отримують подальший розвиток і у наш час. Е.П. Черногоров визначає, що модель системи дозволяє нам моделювати деяку генеральну сукупність. Маючи окремий експеримент, відтворюючий «життя» деякої системи, ми можемо стверджувати, що маємо окрему реалізацію цієї генеральної сукупності. На моделі, відтворюючи умови експерименту, ми також отримуємо реалізацію генеральної сукупності. Кількісне оцінювання адекватності полягає в перевірці статистичних гіпотез про приналежність цих реалізацій одній і тій же генеральній сукупності.

Треба зауважити, що використання диспер-

сійних критеріїв адекватності суворо справедливе лише для випадку нормального розподілу ймовірностей значень вихідних змінних моделі. На практиці закон розподілу вихідної змінної може істотно відрізнятися від нормального. В цьому випадку виникає значна похибка при розрахунку міри точності моделі. Крім того, дисперсійні оцінювання типу критерію Фішера [7] не можуть бути використані для порівняльного оцінювання точності моделей, побудованих для об'єктів, які істотно відрізняються один від одного.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є створення програмного додатка, що дозволяє в інтерактивному режимі з максимальним ступенем автоматизації виконувати ідентифікацію динамічних об'єктів. При цьому процеси створення моделі та оцінювання її адекватності мають відбуватись з використанням різних підходів.

Інформаційний підхід до оцінювання адекватності

Універсальна інформаційна оцінка адекватності застосовується при будь-якому методі ідентифікації і дозволяє порівнювати точність моделей, які істотно відрізняються одна від одної методом отримання (аналітичним або експериментальним), характером (детерміновані або стохастичні моделі), конкретною реалізацією (фізичні або математичні моделі) і іншими ознаками, була запропонована в [8].

Згідно з М.М. Бонгарду [9], повідомлення, що змінює для спостерігача невизначеність N_1 на невизначеність N_2 , несе корисну інформацію:

$$I_{\pi} = N_1 - N_2. \quad (3)$$

Для спостерігача, що виходить з гіпотези, що деяке завдання характеризується розподілом імовірності відповіді $\{q_j\}$, тоді як реальним є розподіл $\{p_j\}$, невизначеність оцінюється виразом:

$$N_2 = - \sum_j p(x_j) \log q(y_j). \quad (4)$$

Вважатимемо, що до ідентифікації невизначеність динамічного об'єкта оцінюється інформаційною ентропією Шенона:

$$N_1 = H = - \sum_j p_j \log p_j. \quad (5)$$

Оскільки модель завжди дає лише наближений опис об'єкта, можна говорити про дезінформацію, що вноситься моделлю. Якщо ре-

альний вихідний змінний об'єкта у відповідає вихідна змінна моделі $\check{y}$, а реальному розподілу ймовірностей $P = \{p(y_j)\}$ значень величини у відповідає гіпотетичний розподіл $Q = \{q(\check{y}_j)\}$, що задається моделлю, то дана модель несе дослідникові дезінформацію в кількості:

$$D = N_2 - N_1 = \sum_j p(y_j) \log [p(y_j) / q(\check{y}_j)]. \quad (6)$$

Вираз (6) є інформаційним критерієм адекватності.

У задачах синтезу систем автоматичного регулювання звичайно виконується експериментальне дослідження динаміки об'єкта управління з побудовою розгонної характеристики. Графік зміни регульованої величини апроксимують моделлю у вигляді передатної функції певного порядку з чистим запізненням. Оскільки при цьому доводиться мати справу з детермінованими процесами, використання критерію (6) є неможливим.

В цьому випадку треба використовувати підхід, запропонований в роботі [10] для оцінювання кількості інформації в детермінованому процесі. Тут було показано, що інформаційна насиченість детермінованого сигналу $y(t)$ залежить від інтенсивності його зміни, величиною, що характеризується:

$$\pi_y(t) = \frac{\left| \frac{dy}{dt} \right|}{\epsilon_y}, \quad (7)$$

де ϵ_y — поріг розрізнюваності значень $y(t)$. Оскільки в системах управління застосовуються, як правило, цифрові пристрої, як поріг розрізнюваності доцільно використовувати крок квантування.

Як міра інформації в детермінованому процесі використовується інтегральна характеристика мінливості (ІХМ) змінної $y(t)$:

$$V_y = \frac{\int_T \pi_y(\theta) \log [\pi_y(\theta) \epsilon_t] d\theta}{\int_T \pi_y(\theta) d\theta}, \quad (8)$$

де $\theta = t/T$ — відносний час; T — інтервал часу спостереження змінної $y(t)$; ϵ_t — поріг розрізнюваності часу. Як поріг розрізнюваності може бути використаний інтервал дискретизації сигналу $y(t)$. Вираз (8) є аналогом ентропії Шенона.

Як аналог невизначеності Бонгарда можна

використовувати наступну формулу

$$V_B = - \frac{\int_T \pi_y(\theta) \log[\pi_y(\theta) \varepsilon_t] d\theta}{\int_T \pi_x(\theta) d\theta} . \quad (9)$$

Для оцінювання дезінформації, що вноситься моделлю, використовуємо вираз:

$$D = V_B - V_y = \frac{\int_T \pi_x(\theta) \log \frac{\pi_x(\theta)}{\pi_y(\theta)} d\theta}{\int_T \pi_x(\theta) d\theta} . \quad (10)$$

У разі ідеальної моделі сигнал $y(t)$ точно відстежує зміни $u(t)$, тобто виконується умова $\pi_y(t) = \pi_x(t)$. При цьому кількість дезінформації дорівнює нулю. Чим нижче адекватність моделі, тим більше значення величини D , розраховане відповідно до (10).

Для практичних розрахунків зручно використовувати дискретну форму виразу (10):

$$D = \frac{\sum_i \pi_{yi} \log \frac{\pi_{yi}}{\pi_{xi}}}{\sum_i \pi_{yi}} , \quad (11)$$

де π_{yi} і π_{xi} — значення інтенсивності зміни вихідних величин об'єкта і моделі, визначені для моменту часу θ_i .

Проектування графічного інтерфейсу користувача

У середовищі MATLAB створений Graphical User Interface (GUI), який реалізує поставлену задачу. Вигляд GUI показаний на рис. 1.

Для підвищення точності дослідження проводяться кілька експериментальних досліджень динамічного об'єкта. Результати досліджень заносяться у текстовий файл. Кожен рядок файлу містить відлік часу і ряд значень регульованої величини, отриманих при різних значеннях вхідних тестових сигналів. Всі числа у рядку розділяються комами. У першому рядку додатково вказуються значення вхідних сигналів.

По натисненні кнопки «Ввести» з текстового файлу, ім'я якого вказане у відповідному полі, вводяться дані досліджень об'єкта. У поле для графіку «Крива розгону» виводяться стільки кривих, скільки досліджень проведено. Натисненням кнопки «Усереднення» здійснюється усереднення даних усіх досліджень. За допомогою кнопки «Нормалізація» усереднений графік переноситься у початок координат і нормується діленням на коефіцієнт передачі об'єкта. Далі можна виконати апроксимацію кривої розгону передатною функцією (ПФ) першого, другого, третього або четвертого порядку натисканням

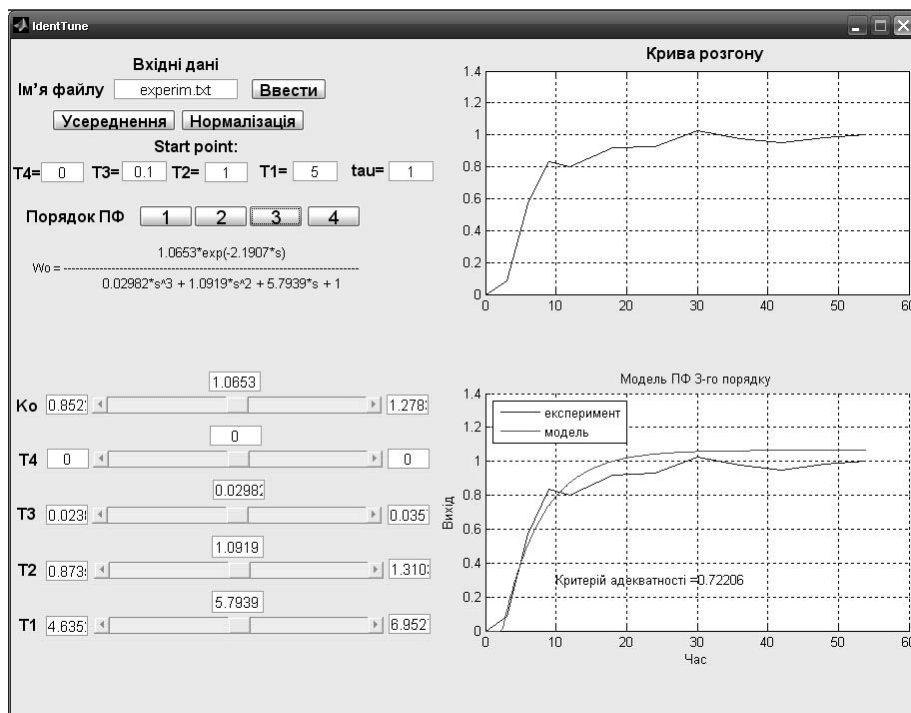


Рис. 1. Графічний інтерфейс користувача

на відповідну кнопку, позначену цифрою 1, 2, 3 або 4.

Апроксимація здійснюється використанням функції мінімізації з обмеженнями `fmincon`. Для прикладу, апроксимація ПФ третього порядку здійснюється командою наведеною на рис. 2.

```
fmincon("err3",[T3,T2,T1,tau],[[],[],[],lb,ub,[],options])
```

Рис. 2. Програмний код «Команда апроксимації»

Мінімізується цільова функція `err3` (рис. 3).

```
function error = err3(x)
% Помилка апроксимації для ПФ 3-го порядку
global t temp K Wo t1 temp1
Wo=tf(K, [x(1),x(2),x(3),1]); Wo.InputDelay=x(4);
temp1=temp;
for i=2:length(t)
    y= step(Wo,t(i));
    temp1(i)= y(length(y));
end
error=sum((temp-temp1).^2);
end
```

Рис. 3. Програмний код «Апроксимація»

Успіх розв'язання задачі мінімізації залежить від вдалого вибору початкових значень шуканих параметрів. Ці значення треба попередньо ввести у відповідні поля під заголовком «Start point».

Розрахунок інформаційного критерію адекватності (11) виконується за допомогою команд (рис. 4).

```
pio=abs(diff(temp));% інтенсивність зміни об'єкта
temp3=temp;
temp3(1)=0;
for i=2:length(t)
    y=step(Wo,t(i));
    temp3(i)= y(length(y));
end
pim=abs(diff(temp3)); % інтенсивність зміни моделі
% Обчислюється інформаційний критерій
A=sum(pio.*log2(pio./pim)); % чисельник
B=sum(pio); % знаменник
adeq=A/B
```

Рис. 4. Програмний код «Розрахунок інформаційного критерію адекватності»

Результатами розрахунку є параметри передатної функції K_0 (коефіцієнт передачі), T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , які виводяться над повзунками відпо-

відних слайдерів. Пересуванням слайдерів можна коректувати модель, домагаючись бажаного виду кривої відгуку і контролюючи значення критерію адекватності.

Результуюча передатна функція виводиться для наочності також і у символічному вигляді (рисунк).

Висновки

Розроблений інструментальний комп'ютерний засіб автоматизації розв'язування задач ідентифікації динамічних об'єктів управління з використанням інформаційного критерію адекватності. Використання цього засобу забезпечує побудову високоточних моделей з мінімальними витратами часу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Concepts of Model Verification and Validation* / Thacker B.H., Doebling S.W., Hemez F.M. et al. – Los Alamos: LANL, 2004. – 41 p.
2. Райбман Н.С. Идентификация объектов управления // Автоматика и телемеханика. – 1979. – Вып. 6. – С.80-93.
3. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Бортник О.Г. Автоматизована система оцінювання динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 2. – С.85-89.
4. Стрижнев А.Г., Марков А.В., Русакович А.Н. Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5 (67). – С.65-72.
5. Бильфельд Н.В. Идентификация объектов управления в Toolbox PID Tuner // Новый университет: серия «Технические науки». – 2016. – № 6-7. – С.52-53.
6. Трунов О.М. Критерий адекватности как оценка эффективности процесса построения модели // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 1/4 (73). – С.36-41.
7. Yang J., Yang J.Y., Zhang D. What's wrong with Fisher criterion? // Pattern Recognition. – 2002. – V. 35 (11). – pp.2665-2668.
8. Мальцев Н.Н., Манко Г.И. Информационная оценка адекватности математических описаний технологических процессов // Вопросы химии и химической технологии. – Харьков : Вища школа, 1977. – Вып. 47. – С.140-143.
9. Бонгард М.М. Проблемы узнавания. – М.: Наука, 1967. – 320 с.
10. Информационная оценка точности моделирования химико-технологических процессов / В.В. Кафаров, Г.И. Манко, В.П. Мешалкин, В.И. Пинский // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 1. – С.170-182.

Надійшла до редакції 25.09.2017

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**Петренко Е.Н., Манко Г.И.**

В данной работе рассмотрены вопросы автоматизации процесса идентификации динамических объектов. Исследовано использование компьютерных технологий для обеспечения автоматизации процессов идентификации объектов управления. Выполнен анализ существующих методов оценки адекватности моделей, получаемых в ходе идентификации, отмечены ограничения применения этих методов. Обосновано использование информационного подхода при решении задач оценивания адекватности математических моделей. Предложено использование универсальной, применимой при любом методе идентификации информационной оценки адекватности на основе понятия полезной информации Бонгарда. Приведены формулы, удобные для практического использования при сравнительной оценке точности моделей объектов управления различного типа. Описан процесс проектирования графического интерфейса пользователя – Graphical User Interface (GUI) в специализированной среде GUIDE системы MATLAB. Спроектированный GUI позволяет в интерактивном режиме с максимальной степенью автоматизации выполнять идентификацию динамических объектов. При этом создание модели и оценка ее адекватности проводятся с использованием разных методов. Разработанные сценарии и функции GUI вводят данные экспериментальных исследований динамического объекта, усредняют, нормализуют и выполняют их аппроксимацию передаточной функцией первого, второго, третьего или четвертого порядка, выполняют построение графиков кривых разгона объекта и кривой отклика модели. Аппроксимация осуществляется с использованием функции минимизации с ограничениями *fmincon*. Приведены фрагменты функций, осуществляющих аппроксимацию кривой разгона объекта и расчет значений информационного критерия адекватности. Передвижением слайдеров GUI можно корректировать модель, добиваясь желательного вида кривой отклика и контролируя при этом значение критерия адекватности. Использование GUI обеспечивает построение высокоточных моделей динамических объектов управления с минимальными затратами времени. Использование информационного критерия адекватности позволяет выбрать наиболее адекватную модель.

Ключевые слова: графический интерфейс, идентификация, адекватность, компьютерные технологии, кривая разгона, передаточная функция.

AUTOMATION OF THE CONTROL OBJECTS IDENTIFICATION PROCESS**Petrenko E.N., Manko G.I.****Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine**

The issues of automation of the dynamic objects identification process are reviewed in the paper. The use of computer technologies with the purpose of the automated identification is investigated. The analysis of existent methods of adequacy estimation for models obtained during authentication is executed and the limitations of application of these methods are noted. The application of informational approach to the mathematical models adequacy estimation is substantiated. The use of the universal adequacy informational estimate, applicable for any method of the identification, is suggested. This estimate is based on the concept of Bongard's useful information. The handy for the practical using formulas are cited for the comparative accuracy estimation of the control object models of different type. The process of design of the Graphical User Interface (GUI) in the special-purpose environment GUIDE of

MATLAB system is described. The designed GUI allows to execute authentication of dynamic objects in the interactive mode with the maximal degree of automation. At the same time the creation of model and estimation of its adequacy are performed with the use of different methods. The GUI's scripts and functions input the data of the dynamic object experimental researches, average, normalize and approximate it by the first, second, third or fourth order transfer function. Fragments of functions realizing the control object step response approximation and the calculation of the adequacy informational criterion values are shown. The approximation is carried out using the function *fmincon* for minimization with constraints. It is possible to correct a model by the movement of GUI's sliders with the monitoring of the desirable type of response curve and the controlling of the adequacy criterion value. The use of GUI provides the creation of high-precision models with the minimum time charges. Using the adequacy informational criterion allows to choose the most appropriate model.

Keywords: GUI, verification and validation, computer technology, step response, transfer function.

REFERENCES

1. Thacker B.H., Doebling S.W., Hemez F.M. *Concepts of Model Verification and Validation*. LANL, Los Alamos, 2004, 41 p.
2. Rajbman N.S. Identifikatsiya ob'ektov upravleniya [Identification of the control objects]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1979, vol. 6, pp. 80-93. (in Russian).
3. Bortnyk G.G., Vasylykivskiy M.V., Bortnyk O.G. Avtomatyzovana systema otsiniuvannia dynamichnykh parametriv analogo-tsifrovyykh peretvoriuvachiv [Automated system for evaluating the dynamic parameters of analog-digital converters]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tehnika v tekhnolohichnykh protsesakh*, 2016, no. 2, pp. 85-89. (in Ukrainian).
4. Strizhnev A.G., Markov A.V., Rusakovich A.N. Identifikatsiya ob'ekta upravleniya po perehodnoy karakteristike zamknytoy sistemy [Identification of the control object by the transient characteristic of a closed system]. *Doklady BGUIR*, 2012, vol. 67, no. 5, pp. 65-72. (in Russian).
5. Bilfeld N.V. Identifikatsiya ob'ektov upravleniya v Toolbox PID Tuner [Identification of the control objects in the Toolbox PID Tuner]. *Novyy universitet: seriya «Tekhnicheskie nauki»*, 2016, no. 6-7, pp. 52-53. (in Russian).
6. Trunov O.M. Kriterii adekvatnosti yak otsinka efektyvnosti protsesu pobudovy modeli [The criterion of adequacy as an assessment of the effectiveness of the process of constructing a model]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 2015, vol. 73, no. 1/4, pp. 36-41. (in Ukrainian).
7. Yang J., Yang J.Y., Zhang D. What's wrong with Fisher criterion? *Pattern Recognition*, 2002, vol. 35, no. 11, pp. 2665-2668.
8. Maltcev N.N., Manko G.I. Informatsionnaya otsenka adekvatnosti matematicheskikh opisaniy tekhnologicheskikh protsessov [Information assessment of the adequacy of mathematical descriptions of technological processes]. *Voprosy himii i himicheskoy tekhnologii*, Vischa shkola, Harkov, 1977, vol. 47, pp. 140-143. (in Russian).
9. Bongard, M.M. Problemy uznannya [Problems of recognition]. Nauka, Moscow, 1967, 320 p. (in Russian).
10. Kafarov V.V., Manko G.I., Meshalkin V.P., Pinskiy V.I. Informatsionnaya otsenka tochnosti modelirovaniya himiko-tekhnologicheskikh protsessov [Information assessment of the accuracy of modeling of chemical-technological processes]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1980, no. 1, pp. 170-182. (in Russian).