



ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

IDENTIFICATION OF CHANGES IN THE CONTROL OBJECT PROPERTIES

Левінський М.В.¹, Левінський В.М.²Levinskyi M.¹, Levinskyi V.²¹ Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна² Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна¹National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine²Odesa National University of Technology, Odessa, UkraineORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-6544-5110>, ² <https://orcid.org/0000-0002-3563-528X>E-mail: ¹ MaxLevinskyi@gmail.com, ² ValeryLevinskyi@gmail.com

Copyright © 2026 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

DOI: 10.15673/atbp.v18i2.3449

Анотація. Актуальність теми. У сучасній промисловості існує клас об'єктів керування, чий динамічний властивості, зокрема здатність до самовирівнювання, не є константними. Такі зміни можуть бути зумовлені особливостями технологічного процесу (наприклад, явище «замелювання» у дробарках або зміна профілю резервуара) або деградацією обладнання. Втрата властивості самовирівнювання за незмінних параметрів регулятора призводить до погіршення якості регулювання або втрати стійкості системи. Тому розробка методів ідентифікації структурних змін об'єкта безпосередньо у замкненому контурі системи автоматичного регулювання (САР) є актуальним завданням для побудови систем адаптації та технічної діагностики.

Мета дослідження. Визначення інформативних ознак у частотному спектрі сигналу похибки регулювання, які свідчать про зміну структури об'єкта керування (перехід від статичної до інтегруючої моделі), та розробка методики отримання їхньої чисельної оцінки без порушення нормального режиму функціонування САР.

Методи дослідження. Для досягнення мети використано методи імітаційного моделювання в середовищі Simulink. Дослідження проводилися на тестовій моделі САР, що містила ПІД-регулятор та об'єкт із запізненням, структура якого могла перемикатися між інерційною ланкою та інтегруючою. Аналіз частотних характеристик здійснювався за допомогою інструментів спектральної щільності потужності (Sptool) та проектування цифрових фільтрів (DSP System Toolbox) пакету MatLab.

Результати. Встановлено, що при зміні структури об'єкта керування в умовах дії випадкових неконтрольованих збурень суттєво змінюється частотний склад сигналу похибки регулювання. Зокрема, виявлено появу додаткової складової в діапазоні частот 0,075...0,15 Гц. Запропоновано алгоритм обробки сигналу, який включає смугову фільтрацію похибки регулювання з наступним експоненціальним усередненням модуля вихідного сигналу. Експериментально підтверджено, що отриманий чисельний показник для об'єктів без самовирівнювання у 2,5–6 разів перевищує аналогічний показник для об'єктів із самовирівнюванням (залежно від співвідношення запізнення до сталої часу), що дозволяє достовірно ідентифікувати стан системи.

Висновки. Доведено можливість ідентифікації втрати властивості самовирівнювання об'єкта в замкнутій САР шляхом моніторингу енергії сигналу похибки у специфічному частотному діапазоні. Отримана чисельна оцінка може бути використана як діагностична ознака для систем автоматичного контролю стану обладнання або як вхідний параметр для систем адаптивного керування.

Abstract. Subject relevance. In modern industry, there is a class of control objects whose dynamic properties, particularly the self-alignment capability, are not constant. Such changes can be caused by the specific features of the technological process (e.g., the "clogging" phenomenon in crushers or changes in the reservoir profile) or equipment degradation. The loss of the self-alignment property with unchanged controller parameters leads to a deterioration in control quality or loss of system stability. Therefore, the development of methods for identifying structural changes of the object directly in the closed loop of the automatic control system (ACS) is an urgent task for building adaptation and technical diagnostic systems.



The purpose of the study is to identify informative features in the frequency spectrum of the control error signal that indicate a change in the structure of the control object (transition from a static to an integrating model) and to develop a methodology for obtaining their numerical estimation without disrupting the normal operation of the ACS.

Methods of the study. To achieve this goal, simulation modeling methods in the Simulink environment were used. The studies were conducted on a test ACS model containing a PID controller and an object with delay, the structure of which could switch between an inertial link and an integrating one. Frequency characteristics were analyzed using power spectral density tools (Sptool) and digital filter design tools (DSP System Toolbox) of the MatLab package.

Results. It was found that when the structure of the control object changes under the influence of random uncontrolled disturbances, the frequency composition of the control error signal changes significantly. In particular, the appearance of an additional component in the frequency range of 0.075...0.15 Hz was detected. A signal processing algorithm is proposed, which includes band-pass filtering of the control error followed by exponential averaging of the output signal magnitude. It has been experimentally confirmed that the obtained numerical index for objects without self-alignment is 2.5–6 times higher than the same index for objects with self-alignment (depending on the ratio of delay to time constant), which allows for reliable identification of the system state.

Conclusions. The possibility of identifying the loss of the self-alignment property of an object in a closed-loop ACS by monitoring the error signal energy in a specific frequency range has been proven. The obtained numerical estimate can be used as a diagnostic feature for automatic equipment condition monitoring systems or as an input parameter for adaptive control systems.

Ключові слова: ідентифікація, САР, об'єкт керування, зміна властивості до самовирівнювання

Keywords: identification, ACS, control object, change in property to self-alignment

Вступ

Більшість технологічних процесів, які протікають в машинах або агрегатах, за своїми властивостями, як об'єктів керування (ОК), поділяють на дві групи відповідно до реакції регульованої змінної на зміну керуючої дії. Розрізняють об'єкти, регульована змінна в яких після зміни керуючої дії має властивість переходити із початкового стабільного у часі значення до іншого стабільного значення. Тобто такі об'єкти мають властивість до самовирівнювання.

На противагу до них, існують об'єкти керування, які мають лише одне значення керуючої дії, при якому значення регульованої змінної лишаються постійними у часі. При всіх інших значеннях керуючої дії значення регульованої змінної зростають або спадають. Такі об'єкти не мають властивості до самовирівнювання.

Відповідно відрізняється і математичний опис об'єктів керування в задачах аналізу і синтезу систем автоматичного регулювання (САР): об'єкти із самовирівнюванням доволі часто описують статичними інерційними ланками першого або другого порядків, а об'єкти без самовирівнювання описують інтегруючими ланками першого або другого порядків.

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Приклади математичного опису об'єктів керування із властивістю до самовирівнювання і без неї наводяться в різних літературних джерелах [1, 2, 3]. При цьому практично завжди сама властивість розглядається як незмінна, притаманна такому класу об'єктів. Наприклад, тепловий процес нагрівання або охолодження – це завжди об'єкт із самовирівнюванням, або процес стабілізації рівня в ємності, з якою рідина відкачується насосом – це завжди об'єкт без самовирівнювання.

Насправді існують технологічні процеси, в яких властивість до самовирівнювання залежить від значення керуючої дії або від інших умов функціонування. Наприклад, дробарки зерна, через сита яких виходить подрібнений продукт, можна розглядати, як об'єкт із самовирівнюванням, оскільки декільком значенням витрат зерна на вході відповідають декілька значень струму навантаження її електропривода. Однак для певних культур зростання подачі може привести до так званого явища «замелювання», коли продукт перестає виходити крізь сито, що викликає збільшення струму навантаження, тобто властивість до самовирівнювання втрачається [4]. Другий приклад – резервуар має циліндричну форму, яка переходить у конус, знизу якого самопливом витікає рідина. Якщо рівень рідини знаходиться в циліндрі, то при зміні витрат рідини на вході в резервуар встановиться новий рівень, тобто об'єкт керування має властивість до самовирівнювання. Але коли рівень рідини знаходиться в конусі, то об'єкт втрачає цю властивість [5].

Нелінійну динаміку мають також деякі технологічні агрегати, наприклад, відцентрові насоси, які відкачують воду із ємності. Декільком значенням частоти обертання колеса насоса відповідають певні витрати і тиск, тобто такий об'єкт має властивість до самовирівнювання. Але із зниженням рівня рідини в ємності зростає висота всмоктування, що може привести до виникнення кавітації. При цьому співвідношення між швидкістю обертання колеса насоса, витратами і тиском на виході може істотно змінитися [6].

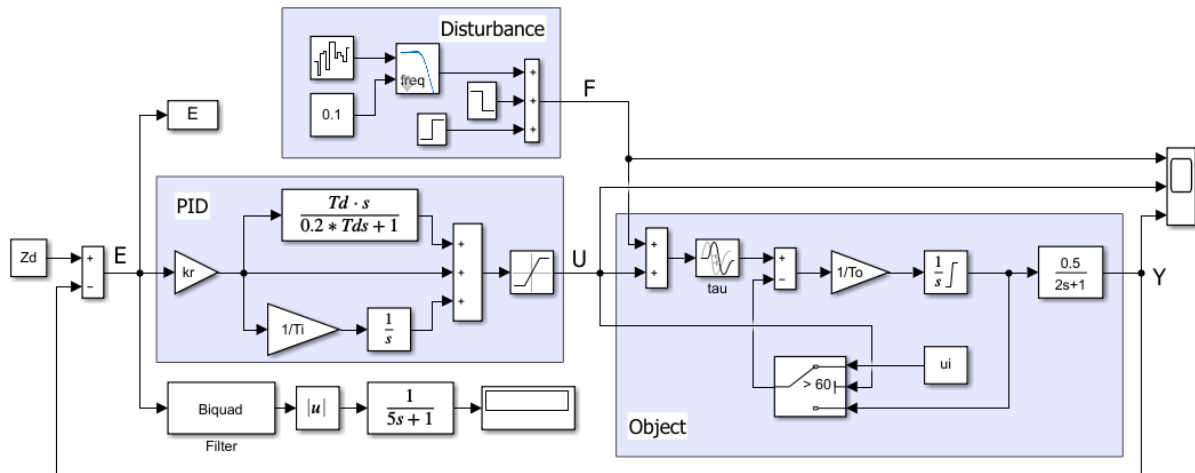
Наведені приклади роблять актуальною задачу ідентифікації змін властивостей об'єкта керування в замкнутому колі САР.

Мета і завдання дослідження:

за допомогою імітаційного моделювання знайти інформативні ознаки, які б свідчили про зміну властивостей об'єкта керування, не порушуючи при цьому функціонування САР.

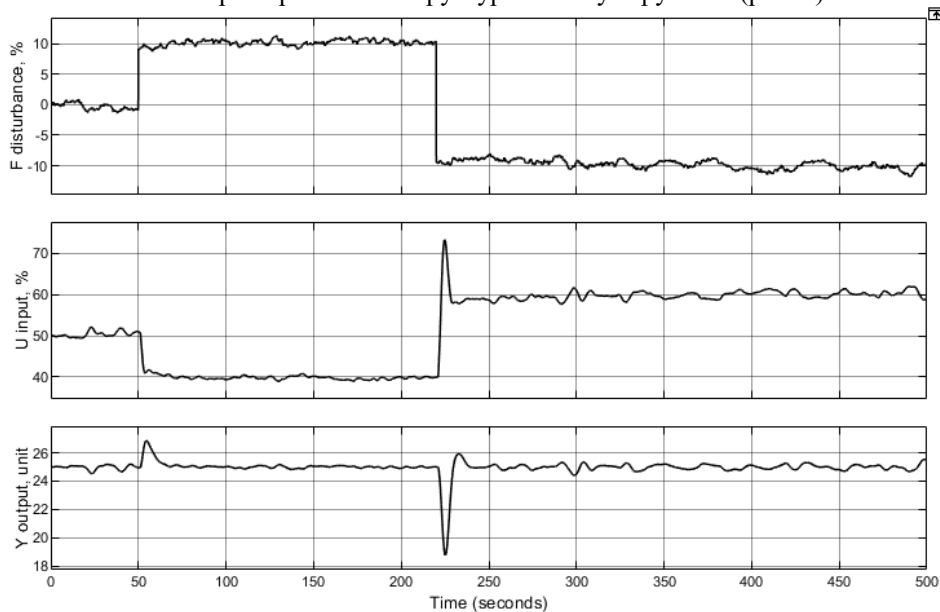
**Методи і матеріали досліджень**

Дослідження проводилося методом активного та пасивного експерименту при моделюванні тестової САР в середовищі Simulink [7]. Модель об'єкту керування в схемі САР (рис. 1) є поєднанням ланки запізнення, інтегруючої ланки, охопленої зворотнім зв'язком, який може перемикатися, та статичної інерційної ланки.

**Рис. 1** Схема моделювання тестової САР**Fig. 1** Test ACS simulation scheme

Перемикання зворотного зв'язку залежить від рівня керуючої дії $U(t)$, що формується ПІД-регулятором, який був налаштований за інженерними методиками [2]. Коли значення $U(t)$ менше порогового, об'єкт керування має властивість до самовирівнювання, а коли більше, то об'єкт набуває інтегруючих властивостей.

Фрагменти результатів моделювання тестової САР при дії зовнішнього неконтрольованого збурення $F(t)$ на об'єкт з параметрами $k_o=0,5$ unit/%; $\tau=1$ c; $T_o=2$ c очікувано показують різну динаміку, оскільки налаштування ПІД-регулятора не змінювались при перемиканні структури об'єкту керування (рис. 2).

**Рис. 2** Результати моделювання тестової САР при перемиканні структури об'єкту керування**Fig. 2** Simulation results of the test ACS when switching the structure of the control object

На практиці зміни в структурі об'єкта керування можуть відбуватися не від зміни керуючої дії $U(t)$, а поступово в результаті деградації обладнання. Тому були проведені експерименти при дії на тестову САР складової неконтрольованого збурення випадкового характеру для варіантів, коли об'єкт керування мав властивість до самовирівнювання та коли ні. Фрагменти їх результатів для об'єкта з параметрами $k_o=0,5$ unit/%; $\tau=1$ c; $T_o=2$ c наведені на рис. 3.

Складовою неконтрольованого збурення $F(T)$ випадкового характеру була сформовано генератором псевдобілого шуму, сигнал в виходу якого був відфільтрований фільтром низької частоти Баттерворта з частотою зрізу 0,1 рад/с (див. рис. 1). Додаткові експерименти та наступний аналіз АЧХ САР по каналу $F(t) - Y(t)$ підтвердили, що діапазон частот $F(T)$ обраний коректно, бо в ньому тестова САР здатна частково подавляти збурення.

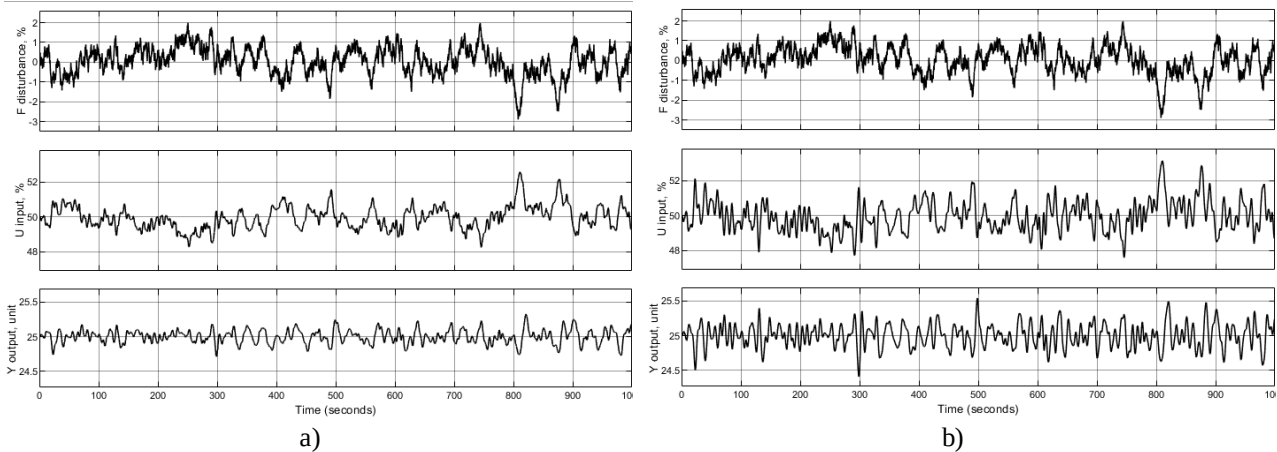


Рис. 3. Результати експериментів з тестовою САР при дії збурень випадкового характеру:

- a) об'єкт керування має властивість до самовирівнювання;
 b) об'єкт керування не має властивості до самовирівнювання
- Fig. 3. Experiment results with a test ACS under the influence of random disturbances:**
- a) the control object has the property of self-alignment;
 b) the control object does not have the property of self-alignment

Результати досліджень

Результати експериментів за графіками 2, 3 показали, що при зміні структури об'єкту керування змінюється частотний склад регульованої змінної $Y(t)$ в САР. Тому було прийнято рішення за допомогою програми Sptool пакету MatLab отримати графіки спектральної щільності потужності похибки регулювання $E(t)$ і проаналізувати їх. Фрагменти результатів для об'єкта з параметрами $k_0=0,5$ unit/%; $\tau=1$ c; $T_0=2$ c наведені на рис. 4.

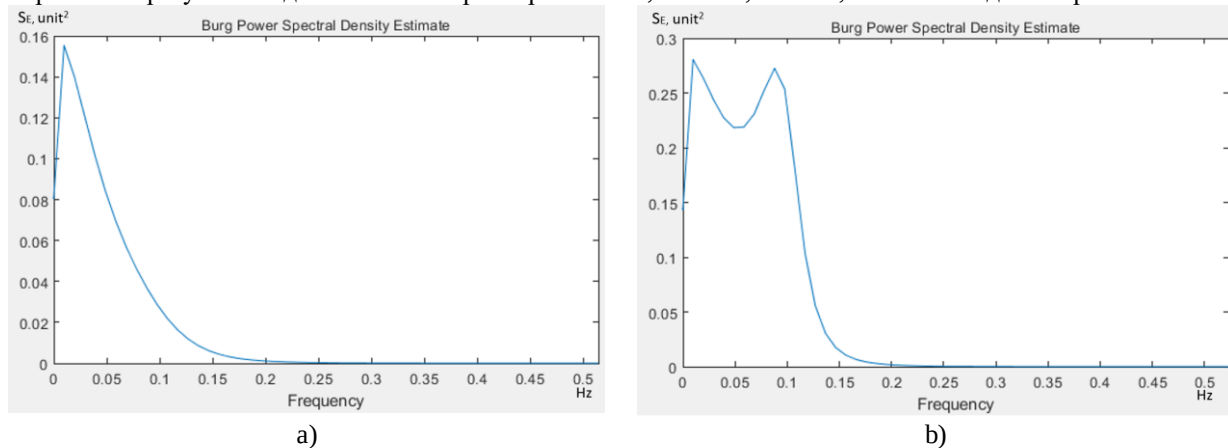


Рис. 4 Графіки спектральних щільностей потужності похибки регулювання $E(t)$ САР:

- a) об'єкт керування має властивість до самовирівнювання;
 b) об'єкт керування не має властивості до самовирівнювання
- Fig. 4 Graphs of power spectral densities of the ACS control error $E(t)$:**
- a) the control object has the property of self-alignment;
 b) the control object does not have the property of self-alignment

Аналіз графіків, представлений на рис. 4, показує, що при переході структури об'єкту керування від наявності властивості самовирівнювання і її до втрати в складі сигналу похибки регулювання $E(t)$ САР з'являється складова в діапазоні 0,075...0,15 Гц.

Для узагальнення отриманих результатів, були проведені додаткові експерименти з САР, в яких параметри об'єкту керування змінювались в діапазоні $0,25 < \tau/T_0 < 1$. Отримані дані були аналогічні рис. 4.

Щоб отримати чисельну оцінку, яка б дала змогу порівняти сигнал $E(t)$ до і після зміни структури об'єкту керування, було прийняте рішення використати для фільтрації цього сигналу смуговий фільтр, згенерований в програмі DSP System Toolbox пакету MatLab (рис. 5).

Модульований сигнал з виходу смугового фільтра був експоненційно усереднений на фільтрі низької частоти (див. рис. 1.), що дозволило сформувати чисельну оцінку складової $E(t)$. В табл. 1 представлені результати експериментів з тестовою САР для різних значень параметрів об'єкту керування і його різних структур.

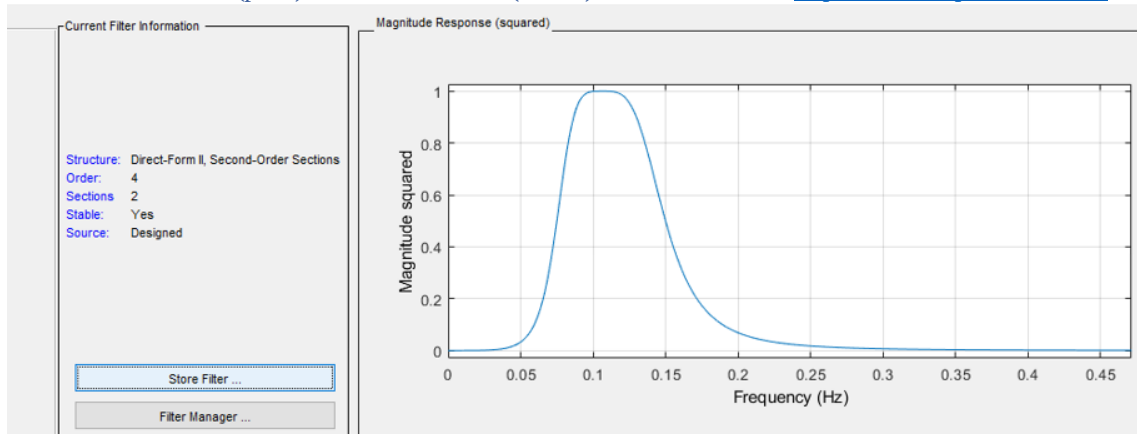


Рис. 5 АЧХ смугового фільтра
Fig. 5 Frequency response of a bandpass filter

Табл. 1 Значення чисельної оцінки похибки регулювання

Параметри об'єкту керування	Чисельна оцінка для структури ОК з самовирівнюванням	Чисельна оцінка для структури ОК без самовирівнювання
$\tau/T_0=0,25$	0,022	0,059
$\tau/T_0=0,5$	0,025	0,068
$\tau/T_0=1,0$	0,031	0,1918

Обговорення результатів

Наведені в табл. 1 результати вказують на те, що зміну структури об'єкту керування можна ідентифікувати в замкнутому контурі САР, оскільки значення чисельної оцінки похибки регулювання для різних структур об'єкту доволі суттєво відрізняються. На базі такої ідентифікації можна побудувати системи автоматичної діагностики та системи адаптації параметрів регулятора САР до зміни структури об'єкту.

Висновки

У результаті проведеного дослідження розв'язано важливу науково-практичну задачу ідентифікації структурних змін об'єкта керування безпосередньо під час нормального функціонування замкнутої САР. Доведено, що втрата об'єктом властивості самовирівнювання, що фактично означає перехід від інерційної до інтегруючої моделі, призводить до суттєвої зміни енергетичного спектра сигналу похибки регулювання. Це явище зумовлене тим, що за незмінних налаштувань регулятора частотні характеристики системи зміщуються, що безпосередньо відображається на реакції САР на зовнішні неконтрольовані збурення випадкового характеру.

Шляхом детального спектрального аналізу в середовищі MatLab було встановлено, що ключовою ідентифікаційною ознакою втрати самовирівнювання є поява додаткової високоенергетичної складової в похибці регулювання в діапазоні частот 0,075...0,15 Гц. Поява цього характерного піка на графіках спектральної щільності потужності є достовірним маркером структурної перебудови об'єкта, що дозволяє фіксувати зміни навіть за умови дії завад.

Для практичної реалізації моніторингу запропоновано ефективний алгоритм отримання чисельної оцінки стану системи, який базується на смуговій фільтрації сигналу похибки та його подальшому експоненційному усередненні. Експериментально підтверджено, що для об'єктів без самовирівнювання отримана чисельна оцінка зростає у 2,5–6 разів порівняно зі станом із самовирівнюванням. Найвища чутливість запропонованого методу спостерігається при значних запізненнях, зокрема при співвідношенні параметрів об'єкта на рівні одиниці, де показник збільшується майже вшестеро.

Розроблений підхід має значну практичну цінність, оскільки дозволяє впроваджувати системи технічної діагностики та адаптивного керування для складних агрегатів, таких як дробарки, резервуари змінного профілю або насосні станції, де зміна динаміки може свідчити про аварійні режими чи знос обладнання. Головною перевагою методу є його пасивний характер — відсутність необхідності вносити тестові збурення в систему гарантує стабільність та безпеку технологічного процесу під час ідентифікації.

Список використаних джерел

- [1]. Mario Lucertini, Ana Millàn Gasca, Fernando Nicolò (2004). Technological Concepts and Mathematical Models in the Evolution of Modern Engineering Systems: Controlling, Managing, Organizing. Springer Science & Business Media, ISBN 978-3-0348-7951-4.
- [2] Dale E. Seborg, Duncan A. Mellichamp, Thomas F. Edgar, Francis J. Doyle, III (2016)., Process Dynamics and Control. John Wiley & Sons, ISBN 978-1-119-28591-5.
- [3]. Svrcek, William Y. A real-time approach to process control / William Y. Svrcek, Donald P. Mahoney, Brent R. Young (2014). – Third edition. ISBN 978-1-119-99387-2



- [4] Nikolov S. Modeling and simulation of particle breakage in impact crusher. *International journal of mineral processing*. 2004. 74. p. 219 – 225
- [5] Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: Навч. посібник. — К.: НТУУ «КПІ», 2008.
- [6] Михайлов Є. І. Насоси та насосні станції: Підручник / Є. І. Михайлов, В. М. Світлий та ін. — К.: КНТ, 2007.
- [7] <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>

REFERENCES

- [1]. Mario Lucertini, Ana Millàn Gasca, Fernando Nicolò (2004). Technological Concepts and Mathematical Models in the Evolution of Modern Engineering Systems: Controlling, Managing, Organizing. Springer Science & Business Media, ISBN 978-3-0348-7951-4.
- [2] Dale E. Seborg, Duncan A. Mellichamp, Thomas F. Edgar, Francis J. Doyle, III (2016), Process Dynamics and Control. John Wiley & Sons, ISBN 978-1-119-28591-5.
- [3]. Svrcek, William Y. A real-time approach to process control / William Y. Svrcek, Donald P. Mahoney, Brent R. Young (2014). – Third edition. ISBN 978-1-119-99387-2
- [4]. Nikolov S. Modeling and simulation of particle breakage in impact crusher. *International journal of mineral processing*. 2004. 74. p. 219 – 225
- [5] Lukiniuk M. V. Avtomatyzatsiia tipovykh tekhnolohichnykh protsesiv: Navch. posibnyk. — K.: NTUU «KPI», 2008.
- [6] Mykhailov Ye. I. Nasosy ta nasosni stantsii: Pidruchnyk / Ye. I. Mykhailov, V. M. Svitlyi ta in. — K.: KNT, 2007.
- [7] <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>

Отримана в редакції 03.11.2025. Прийнята до друку 16.12.2025. Розміщено в інтернеті 31 травня 2026.

Received 03 November 2025. Approved 16 December 2025. Available in Internet 31 May 2026