

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ

О. Boyko¹, <https://orcid.org/0000-0002-9714-2843>

V. Tkachov¹, <https://orcid.org/0000-0002-2079-4923>

D. Slavinskyi¹ <https://orcid.org/0000-0002-7540-2077>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

AUTOMATED SYSTEM FOR INVESTIGATING CONTINUOUS TECHNOLOGICAL OBJECTS IN THE TRAINING PROCESS

Мета. Розробка та впровадження автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об'єктів для навчального процесу, яка забезпечує моделювання аперіодичних ланок першого, другого та третього порядку з та без запізнення, а також створює умови для практичного вивчення динаміки технологічних процесів.

Методика дослідження. Для досягнення поставленої мети було застосовано комплекс методів дослідження, серед яких: структурний аналіз та синтез, математичне моделювання, алгоритмічні методи розрахунку параметрів, програмна реалізація аперіодичних ланок, імітаційне моделювання у середовищі SCADA, експериментальні дослідження реакцій технологічних об'єктів на різні типи тестових впливів.

Результати дослідження. Реалізовано програмне забезпечення, що дозволяє обирати один із 30 варіантів об'єктів керування та досліджувати їхню реакцію на різні типи впливів. Забезпечено можливість налаштування дійсного значення та керуючого впливу. Передбачено функцію збереження результатів досліджень у форматі CSV, що спрощує подальший аналіз. Система підтвердила здатність моделювати аперіодичні ланки першого, другого та третього порядку, що відповідає навчальним завданням.

Наукова новизна. Встановлені залежності між параметрами безперервних технологічних об'єктів та їх автоматизованим моделюванням, що дозволило запропонувати структуру системи дослідження, орієнтованої на навчальний процес. Подальшого розвитку набули методи автоматичного визначення коефіцієнта посилення об'єкта керування. Створений програмний код для реалізації аперіодичних ланок різних порядків із моделюванням запізнення розширює можливості дослідження та підвищує точність відтворення динаміки технологічних процесів. Запропоновані підходи формують основу для удосконалення навчальних та дослідницьких систем, спрямованих на підготовку фахівців у галузі автоматизації та керування.

Практичне значення. Система може бути використана у навчальних закладах для підготовки фахівців з автоматизації та керування технологічними процесами. Забезпечує інтерактивне дослідження та аналіз реакцій технологічних об'єктів, що підвищує якість навчання. Можливість збереження результатів у форматі CSV дозволяє інтегрувати їх у подальші дослідження та лабораторні роботи. Подальший розвиток системи передбачає підтримку дослідження несиметричних технологічних об'єктів.

Ключові слова: автоматизована система, безперервні технологічні об'єкти, аперіодичні ланки, SCADA zenon, навчальний процес, моделювання, коефіцієнт посилення, CSV.

Вступ. Зазвичай дослідження безперервних технологічних об'єктів проводиться здобувачами вищої освіти в університетських лабораторіях та на промислових підприємствах у рамках виробничої практики або на підставі даних отриманих викладачами у процесі виконання науково-дослідницьких робіт. На сьогодні цей процес ускладнено у наслідок багатьох факторів. Головними з них є дистанційне навчання та закритий характер ведення бізнесу підприємствами [1, 2].

Враховуючи неможливість отримання доступу до реальних технологічних процесів та створення достатньої кількості віртуальних лабораторних стендів для проведення навчального процесу виникає питання яким чином надати здобувачу можливість отримати досвід дослідження безперервних технологічних об'єктів для створення автоматичних та автоматизованих систем керування [3, 4].

Використання існуючих пакетів математичного моделювання таких як MATLAB дозволяє вирішити цю задачу, однак при моделюванні не відчувається один з головних факторів – динаміка зміни параметрів об'єкта керування у реальному часі. Окрім того більшість з них не дозволяють створювати дослідницьке програмне забезпечення на мовах програмування стандарту MEK 61131-3 [5].

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється інтеграції систем моделювання та промислових стандартів програмування. Наприклад, використання IEC 61131-3 у поєднанні з SCADA-системами, такими як zenon, дозволяє створювати навчальні та дослідницькі середовища, що наближені до реальних умов виробництва [6]. Дослідження Pereira, Lima та Martins [7] демонструє можливість трансляції програм керування, написаних відповідно до стандарту IEC 61131-3, у середовище MATLAB/Simulink, що забезпечує сумісність між академічними моделями та промисловими системами.

Крім того, сучасні роботи у сфері цифрових двійників та віртуальних лабораторій підкреслюють важливість створення інтерактивних платформ для навчання, які дозволяють студентам отримати практичний досвід без доступу до реальних технологічних процесів [8, 9]. Це особливо актуально в умовах дистанційного навчання та обмеженого доступу до промислових підприємств.

Таким чином, розробка автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об'єктів для навчального процесу відповідає сучасним тенденціям у галузі інженерної освіти та автоматизації.

Основна частина. На кафедрі кіберфізичних та інформаційних-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» авторами розроблено структуру автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об'єктів для навчального процесу (рис. 1).

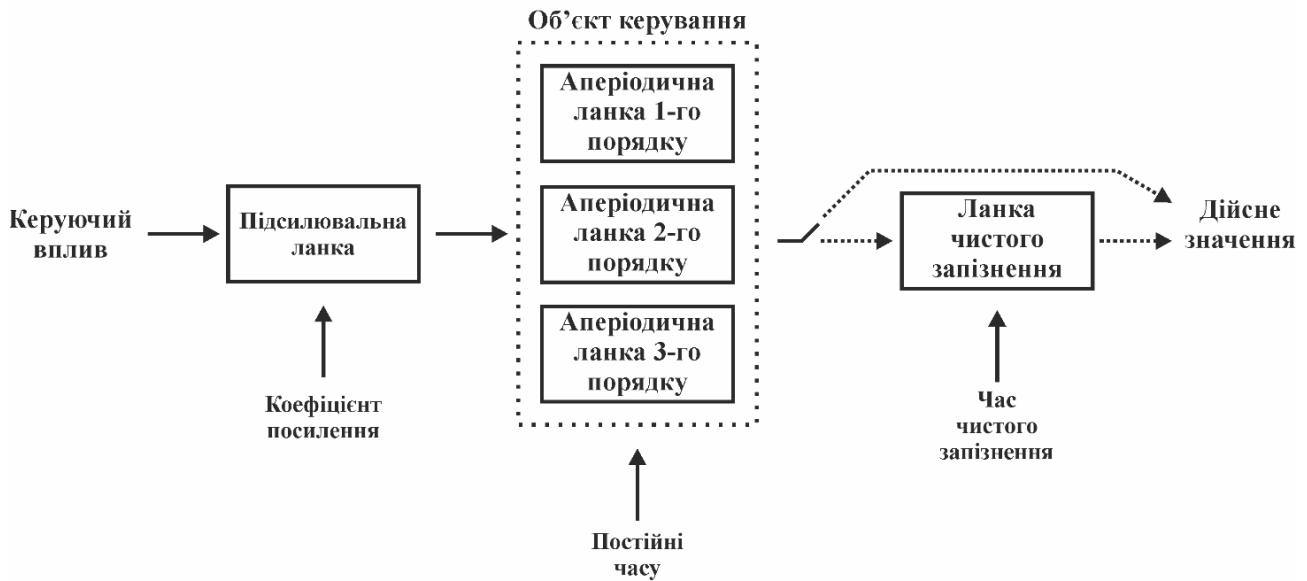


Рис. 1. Структура автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об'єктів для навчального процесу

Відповідно до структури розроблене промислове програмне забезпечення у SCADA системі zenon Supervisor 7.10. Воно складається з людино-машинного інтерфейсу та програмних моделей об'єктів керування, які функціонують на програмному програмованому логічному контролері zenon Logic (рис. 2).

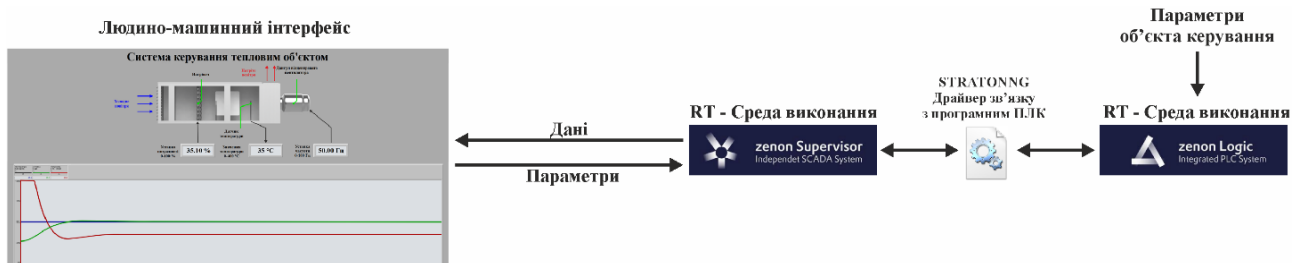


Рис. 2. Структура програмного забезпечення автоматизованої системи дослідження безперервними об'єктами у навчальному процесі

Вихідний текст функціонального блоку на мові Structured Text, що відповідає технологічному об'єкту який описується аперіодичною ланкою першого порядку наведено нижче [3]:

```

VAR_INPUT
    bi_Reset : BOOL ;
    bi_Input : LREAL ;
    bi_Gain : LREAL ;
    bi_TimeConstant1 : LREAL ;
    bi_AmplitudeOffset : LREAL ;
    bi_TimeDelay : LREAL ;
    bi_Cycle : LREAL ;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    bo_Output : LREAL ;
END_VAR
VAR

```

```

l_State0 : LREAL := LREAL#0 ;
l_DelayIndex : DINT := 0 ;
l_DelayState : ARRAY [0 .. 9999] OF LREAL ;
l_DelayIndexMaximum : DINT := 0 ;
l_Num0 : LREAL ;
l_Den0 : LREAL ;
END_VAR

IF bi_Reset = TRUE THEN
  l_State0 := LREAL#0.0;
  bo_Output := LREAL#0.0;

  l_DelayIndexMaximum := ANY_TO_DINT(bi_TimeDelay * LREAL#10.0) - 1;
  FOR l_DelayIndex := 0 TO l_DelayIndexMaximum DO
    l_DelayState[l_DelayIndex] := 0.0;
  END_FOR;
ELSE
  l_Num0 := bi_Gain * (1 - exp(-bi_Cycle / bi_TimeConstant1));
  l_Den0 := exp(-bi_Cycle / bi_TimeConstant1);

  l_DelayState[l_DelayIndexMaximum + 1] := l_Num0 * l_State0;
  l_State0 := bi_Input - (-l_Den0 * l_State0);

  bo_Output := l_DelayState[0] + bi_AmplitudeOffset;
  l_DelayIndexMaximum := ANY_TO_DINT(bi_TimeDelay * LREAL#10.0) - 1;
  FOR l_DelayIndex := 0 TO l_DelayIndexMaximum DO
    l_DelayState[l_DelayIndex] := l_DelayState[l_DelayIndex + 1];
  END_FOR;
END_IF;

```

Вхідний параметр `bi_Reset` відповідає за скидання об'єкта керування до початкових умов, керуючий вплив подається на `bi_Input`, `bi_Gain` відповідає за коефіцієнт посилення, `bi_TimeConstant1` постійну часу, `bi_AmplitudeOffset` статичний зсув дійсного значення, `bi_TimeDelay` час чистого запізнення, `bi_Cycle` час циклу. У загальному випадку час циклу програмного програмованого логічного контролеру zenon Logic складає 100 мс. Вихідне значення отримується через параметр `bo_Output`. Усі параметри мають довгий речовий тип LREAL.

У процесі використання програмного забезпечення здобувач обирає варіант завдання за яким визначається структура технологічного об'єкта (аперіодична ланка першого, другого, третього порядку), постійні часи, коефіцієнт посилення, наявність ланки чистого запізнення та час запізнення. Як показав досвід авторів використання даного підходу протягом 10 років для більш глибокого занурення у процес дослідження здобувач повинен мати можливість самостійно обирати параметри виконавчого пристрою та датчика який відповідає за вимір дійсного значення, що у свою чергу потребує автоматичного розрахунку коефіцієнта посилення об'єкта керування.

Відповідно до цього запропоновано розраховувати коефіцієнт посилення якщо відношення максимального дійсного значення до бажаного $c = Y_{\max}/S$ більше коефіцієнта запасу як:

$$K = k \cdot S / U_{\max},$$

де K – коефіцієнт посилення; K – коефіцієнт запасу; S – бажане значення, U_{\max} – максимальне значення керуючого впливу.

У випадку коли $c < k$ або $c > 1$:

$$K = ((c - 1)/2 + 1) \cdot S / U_{\max}.$$

У інших випадках:

$$K = Y_{\max} / U_{\max},$$

де Y_{\max} – максимальне дійсне значення.

Запропонований підхід забезпечує за будь яких параметрів виконавчого пристрою та датчика дійсного значення автоматичне визначення коефіцієнта посилення, що у свою чергу розширює можливості здобувача в обранні апаратного забезпечення системи керування.

Таким чином при обранні здобувачем варіанта завдання виконується встановлення потрібної структури об'єкта керування та його параметрів, що вимагає одночасного оновлення у програмному забезпеченні великої кількості змінних. З урахуванням необхідності зберігання значень цих змінних для усіх варіантів завдань та забезпечення простого інтерфейсу їх корегування цей процес виконується за рахунок використання стандартного інструменту SCADA систем – рецептів.

Для спрощення взаємодії та сприйняття програмного забезпечення автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об'єктів авторами було поділено людино-машинний інтерфейс програмного забезпечення на декілька екранів. На екрані “Налаштування системи дослідження технологічного об'єкту” (рис. 3) здобувач обирає варіант завдання задає мінімальні та максимальні параметри керуючого впливу і дійного значення та бажане значення.



Рис. 3. Екран відображення налаштування автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об'єктів

На екрані “Дослідження технологічного процесу об’єкту” (рис. 4) здобувач обирає налаштування відображення графіків дійсного значення та керуючого впливу. Запускає або вимикає запис даних до текстового файлу в якому вони зберігаються у форматі Comma-Separated Values та подальші можуть бути проаналізовані за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel або MATLAB.

Після виконання усіх налаштувань здобувач обирає тип керуючого впливу (рис. 4): ступеневий, П-образний, лінійний, гармонійний або псевдовипадковий.

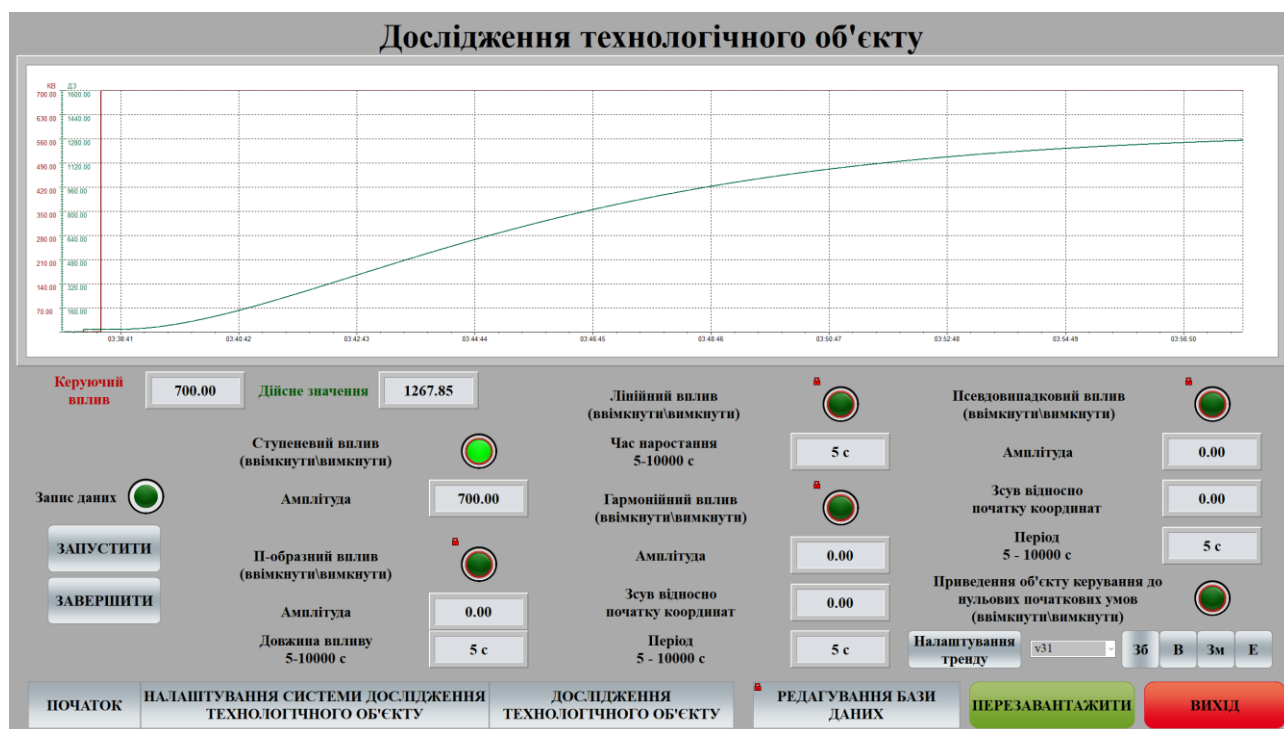


Рис. 4. Екран відображення процесу дослідження безперервного технологічного об’єкта

Як було зазначено вище отримані результати здобувач завантажує до математичного пакету MATLAB де виконується видалення статичної складової, аналізується структура об’єкта керування та за допомогою “System Identification Toolbox” або “Parameter Estimation” визначаються її параметри. За отриманою структурою та параметрами створюється модель у графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink математичного пакету MATLAB, результати моделювання якої порівнюються з перевірочними даними відповідно до метрики NRMSE та критерію Фішера.

Таким чином здобувач за допомогою автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об’єктів проходить усі етапи отримання даних так як би він знаходився на реальному виробництві або у лабораторії університету.

Висновки.

1. Запропонована та обґрунтована структура автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об’єктів для навчального процесу, яка забезпечує підтримку об’єктів керування, що описуються аперіодичними ланками першого, другого та третього порядку без запізнення.

2. Відповідно до запропонованої структури розроблено метод автоматичного розрахунку коефіцієнта посилення об'єкта керування на підставі діапазони керуючого впливу, датчика який вимірює дійсне значення та бажаного значення уставки.

3. Розроблено програмний код який забезпечує реалізацію аперіодичних ланок першого, другого, третього порядку з та без запізнення.

4. Використовуючи SCADA систему zenon Supervisor 7.10 відповідно до запропонованої структури розроблене програмне забезпечення автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об'єктів для навчального процесу.

5. Програмне забезпечення дозволяє обирати один з 30 варіантів об'єктів керування, налаштовувати дійсне значення та керуючий вплив. Досліджувати технологічні об'єкти за допомогою ступеневого, імпульсного, П-образного, гармонійного та псевдовипадкового впливу. Записувати результати дослідження до текстового файлу у форматі Comma-Separated Values.

6. Подальшим напрямком розвитку автоматизованої системи дослідження безперервних технологічних об'єктів для навчального процесу є реалізація підтримки дослідження несиметричних технологічних об'єктів.

Перелік посилань

1. Шарова, Т., & Шаров, С. (2024). Дистанційне навчання в Україні: ризики та шляхи їх вирішення. *Молодь і ринок*, 4(224). <https://doi.org/10.24919/2308-4634.2024.299893>.
2. Козар, Ю. Ю. (2024). *Дистанційне навчання у вищих навчальних закладах України: виклики та можливості в часи кризи*. Полтавський державний медичний університет. <https://repository.pdmu.edu.ua/items/8c3b28ea-94ff-4710-8c81-424f37563c7c>.
3. Vilches, M., Vargas, H., de la Torre, L., & Heradio, R. (2025). Scalable hybrid laboratories: Application in industrial automation. *Results in Engineering*, 26, 105342. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105342>.
4. Kovalenko, M. (2019). Industrial practice in engineering education: Problems and solutions. *Journal of Technical Education*, 12(3), 45–52.
5. International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61131-3: Programmable controllers – Part 3: Programming languages*. Geneva: IEC.
6. *IEC 61131-3 and zenon Logic*. (2025). COPA-DATA. <https://www.copadata.com/en/zenon-capabilities/data-management/iec-61131-3>
7. Pereira, A., Lima, C., & Martins, J. F. (2012). The use of IEC 61131-3 to enhance PLC control and Matlab/Simulink process simulations. *Proceedings of CTS/UNINOVA, Lisbon*. <https://www.researchgate.net/publication/241188530>
8. Smith, J., & Brown, L. (2021). Digital twins in engineering education: A pathway to interactive learning. *International Journal of Engineering Pedagogy*, 11(2), 33–47.
9. Zhang, Y., & Chen, H. (2022). Virtual laboratories for process control education: Design and implementation. *Computers & Education*, 180, 104–118.

ABSTRACT

The purpose. Development and implementation of an automated system for the study of continuous technological objects within the educational process, which provides modeling of aperiodic links of the first, second, and third order with and without delay, as well as creates conditions for practical exploration of technological process dynamics.

Research methodology. To achieve the set goal, a set of research methods was applied, including structural analysis and synthesis, mathematical modeling, algorithmic methods for calculating parameters, software implementation of aperiodic links, simulation modeling in the SCADA environment, and experimental studies of the reactions of technological objects to various types of test effects.

Research results. Software has been implemented that allows the selection of one of 30 variants of control objects and the study of their response to different types of input signals. The system provides the ability to adjust the actual value and control input. A function for saving research results in CSV format has been implemented, which simplifies further analysis. The system has confirmed its capability to model aperiodic links of the first, second, and third order, meeting educational requirements.

Scientific novelty. Established relationships between the parameters of continuous technological objects and their automated modeling have made it possible to propose the structure of a research system oriented towards the educational process. The methods of automatic determination of the gain coefficient of the control object have been further developed. The created software code for the implementation of aperiodic links of various orders with delay modeling expands the possibilities of research and increases the accuracy of reproducing the dynamics of technological processes. The proposed approaches form the basis for improving educational and research systems aimed at training specialists in the field of automation and control.

Practical value. The system can be used in educational institutions for training specialists in automation and process control. It provides interactive investigation and analysis of technological object responses, thereby improving the quality of education. The ability to save results in CSV format allows integration into further research and laboratory work. Future development of the system involves supporting the study of asymmetric technological objects.

Keywords: *automated system, continuous technological objects, aperiodic links, SCADA zenon, educational process, modeling, gain coefficient, CSV.*

дата першого надходження статті до видання	10.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	12.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025