

УДК 519.713:681.52

М.Б. ЄДИНОВИЧ, О.В. ПОЛИВОДА, Т.О. КУЗЬМИНА,  
І.О. РУДЕНКО, В.С. ШЕСТАКОВ  
Херсонський національний технічний університет

### **ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРАФОАНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ**

*У статті досліджено можливість застосування сучасних апаратних і програмних засобів для автоматизації традиційних способів ідентифікації, з можливістю отримувати значення параметрів об'єктів управління у реальному часі. Проаналізовано відомі графоаналітичні способи ідентифікації об'єктів управління та доведено недоцільність їх використання при ідентифікації у режимі реального часу через необхідність ручного введення експериментальних даних. Для визначення динамічних параметрів типових лінійних об'єктів систем автоматичного управління запропоновано використовувати швидкість зміни вихідного сигналу досліджуваного об'єкту. Доведено, що застосування програмних пакетів Mathcad, Matlab дозволяє безпосередньо вираховувати швидкість зміни вихідного сигналу об'єкта управління, що значно скорочує час обробки даних, а використання пакету Matlab, завдяки вбудованому OPC серверу, дозволяє обробляти у реальному часі дані процесу, що надходять з датчиків або контролерів по цифровій мережі. Наведено структурну схему системи для дослідження запропонованого способу визначення динамічних характеристик об'єкта управління та блок-схема алгоритму обчислення динамічних параметрів об'єкта управління. Наведено приклад ідентифікації об'єкта управління першого порядку з використанням швидкості зміни вихідного сигналу. Експериментально визначені значення регульованого параметру (температура) зафіксовані датчиком, підключеним до аналогового входу контролера Овен ПЛКБ3. Дані з контролера по мережі Modbus передавалися через універсальний OPC-сервер Master OPC на персональний комп'ютер. У якості OPC-клієнта було використано середовище Matlab, де проводилися розрахунки параметрів динаміки досліджуваного об'єкта. Доведено, що запропонований спосіб дозволяє значно підвищити ефективність відомих графоаналітичних методів ідентифікації. З'ясовано, що шуми, присутні у сигналах датчиків можуть суттєво вплинути на точність визначення параметрів об'єкта управління, тому для зменшення впливу цих шумів необхідно застосовувати фільтри нижніх частот.*

*Ключові слова:* ідентифікація, графоаналітичний метод, об'єкт управління, режим реального часу.

М.Б. ЕДИНОВИЧ, О.В. ПОЛИВОДА, Т.О. КУЗЬМИНА,  
И.О. РУДЕНКО, В.С. ШЕСТАКОВ  
Херсонский национальный технический университет

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

*В статье исследована возможность применения современных аппаратных и программных средств для автоматизации традиционных способов идентификации, с возможностью получать значения параметров объектов управления в реальном времени. Проанализированы известные графоаналитические способы идентификации*

объектов управления и доказана нецелесообразность их использования при идентификации в режиме реального времени из-за необходимости ручного ввода экспериментальных данных. Для определения динамических параметров типовых линейных объектов систем автоматического управления предложено использовать скорость изменения выходного сигнала исследуемого объекта. Доказано, что применение программных пакетов Mathcad, Matlab позволяет непосредственно вычислять скорость изменения выходного сигнала объекта управления, что значительно сокращает время обработки данных, а использование пакета Matlab, благодаря встроенному OPC серверу, позволяет обрабатывать в реальном времени данные процесса, поступающие с датчиков или контроллеров по цифровой сети. Приведена структурная схема системы для исследования предложенного способа определения динамических характеристик объекта управления и блок-схема алгоритма вычисления динамических параметров объекта управления. Приведен пример идентификации объекта управления первого порядка с использованием скорости изменения выходного сигнала. Экспериментально определенные значения регулируемого параметра (температура) зафиксированы датчиком, подключенным к аналоговому входу контроллера Овен ПЛКБ3. Данные с контроллера по сети Modbus передавались через универсальный OPC-сервер Master OPC на персональный компьютер. В качестве OPC-клиента была использована среда Matlab, где проводились расчеты параметров динамики исследуемого объекта. Доказано, что предложенный способ позволяет значительно повысить эффективность известных графоаналитических методов идентификации. Выяснено, что шумы, присутствующие в сигналах датчиков могут существенно повлиять на точность определения параметров объекта управления, поэтому для уменьшения влияния этих шумов необходимо применять фильтры нижних частот.

Ключевые слова: идентификация, графоаналитический метод, объект управления, режим реального времени.

M.B. YEDYNOVYCH, O.V. POLYVODA, T.O. KUZMINA,  
I.O. RUDENKO, V.S. SHESTAKOV  
Kherson National Technical University

## **DETERMINATION OF CONTROL OBJECTS DYNAMIC PARAMETERS IN REAL-TIME MODE USING GRAPHO-ANALYTICAL METHODS OF IDENTIFICATION**

*The article explores the possibility of using modern hardware and software to automate traditional methods of identification, with the ability to obtain the values of the parameters of control objects in real time. The known graph-analytical methods of identification of control objects are analyzed and the inexpediency of their use in real-time identification due to the need for manual input of experimental data is proved. To determine the dynamic parameters of typical linear objects of automatic control systems, it is proposed to use the rate of change of the output signal of the researched object. It is proved that the use of software packages Mathcad and Matlab allows to directly calculate the rate of change of the output signal of the control object, which significantly reduces data processing time, and the use of Matlab environment, thanks to the built-in OPC server, allows real-time mode analysis of process data obtaining from sensors or digital network controllers. The block diagram of the system for the research of the proposed method for determining the dynamic characteristics of the control object and the block diagram of the algorithm for calculating the dynamic parameters of the control object are proposed. An example of identification of a first-order control object using the rate of change of the output signal is given.*

*Experimentally determined values of the controlled parameter (temperature) were recorded by a sensor connected to the analog input of the Oven PLC63 controller. Data from the controller over the Modbus network was transmitted via a universal OPC – Master OPC server on a personal computer. The Matlab environment was used as the OPC client, where the dynamics parameters of the researched object were calculated. It is proved that the proposed method can significantly increase the efficiency of known graph-analytical methods of identification. It was found that the noise present in the sensor signals can significantly affect the accuracy of determining the parameters of the control object, so to reduce the influence of these noises, it is necessary to use low-pass filters.*

*Keywords: identification, graph-analytical method, control object, real-time mode.*

### Постановка проблеми

Розробці будь-якої системи автоматичного управління (САУ) передує вивчення об'єкта управління й визначення його математичної моделі. Математична модель об'єкта включає математичний опис залежностей між основними змінними (вихідні регульовані змінні, збурення управління і впливу) й обмеженнями, що на них накладаються. Існують різні (статичні й динамічні) види математичних моделей, однак на практиці найбільше широко використовують математичні моделі у вигляді передавальних функцій. Для визначення передавальних функцій об'єктів застосовують аналітичні й експериментальні методи ідентифікації [1–4]. Аналітичні методи використовують тоді, коли добре вивчені й можуть бути описані кількісно фізичні процеси, що відбуваються в об'єкті. Коли такої інформації немає, або неможливо одержати модель аналітично, застосовують експериментальні методи. Разом з тим, створення точної робочої моделі складного об'єкта управління без експериментальної перевірки й доведення практично неможливо. З урахуванням того, що процес розробки САУ завжди обмежений за часом, на практиці широко використовують різні експериментальні (активні й пасивні) методи ідентифікації об'єктів управління. При активному експерименті на об'єкт подають пробні впливи різного виду (східчасті, імпульсні, гармонічні, випадкові й ін.) і фіксується реакція об'єкта на ці впливи. При пасивному експерименті пробні впливи не подають, а здійснюється безперервна реєстрація вхідних і вихідних змінних у процесі нормальної експлуатації об'єкта. Слід відзначити, що в більшості випадків розроблювачі САУ віддають перевагу активним експериментальним методам ідентифікації. Для визначення математичних моделей лінійних об'єктів за допомогою активного експерименту найбільше поширення дістали методи аналізу часових (перехідних і імпульсних перехідних) характеристик і методи аналізу частотних характеристик. Найбільш простим з них є метод аналізу перехідних характеристик, отриманих при подачі на вхід об'єкта східчастого впливу величиною відносно нормального (усталеного) режиму роботи об'єкта. На основі отриманих даних будується перехідна характеристика об'єкта і графоаналітичним способом визначаються динамічні і статичні параметри. Аналогічним способом проводиться обробка імпульсних характеристик, отриманих експериментальним шляхом. Але попри такі переваги як простота і наочність ці способи трудомісткі і займають багато часу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Широкого поширення набули методи ідентифікації детермінованих об'єктів шляхом визначення аналітичного виразу перехідної характеристики  $h(t)$  [2] за експериментально отриманою реакцією об'єкта при східчастій зміні керуючого впливу на вході  $u(t) = c \cdot 1(t)$ , де  $1(t)$  – функція одиничного стрибка,  $c$  – інтенсивність сигналу. Для відшукування аналітичних виразів передавальних функцій на основі

експериментально отриманих перехідних характеристик в інженерних розрахунках застосовуються графічні методи.

Значення часу транспортного запізнювання  $\tau$  визначається як інтервал часу між моментом зміни вхідного сигналу й початком зміни вихідної величини. Далі для об'єкта, що має транспортне запізнювання, передавальна функція визначається як добуток двох передавальних функцій  $W_1(p) = e^{-pt}$ , що відповідає транспортному запізнюванню й  $W_2(p)$ , що відповідає перехідній функції  $Y_2(p) = Y_{\text{вх}}(t - \tau)$ , у якої за початок відліку приймається час  $t = \tau$ .

Статичний коефіцієнт передачі об'єкта визначається співвідношенням зміни значення вихідного сигналу, що встановився до величини вхідного впливу:

$$k = \frac{y(\infty) - y_0}{u_{\text{вх}} - u_0}, \quad (1)$$

де  $y(\infty)$  – усталене значення вихідної величини при подачі на вхід об'єкта східчастого вхідного сигналу з рівнем  $u_{\text{вх}}$ ;  $u_0$  і  $y_0$  – усталені значення вхідного й вихідного сигналів до початку проведення експерименту. Для інерційного об'єкта першого порядку стала часу об'єкта  $T$  визначається як відрізок часу, за який перехідна функція сягає 63% своєї усталеної величини. Це впливає з того, що при  $t = \tau$  значення перехідної функції приблизно дорівнює

$$h(t) \Big|_{t=\tau} = k \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = k \left( 1 - \frac{1}{e} \right) \approx 0,63k. \quad (2)$$

Для величини кута нахилу дотичної до перехідної кривої в нульовий момент часу справедливе співвідношення:

$$\left. \frac{dh(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}} \Big|_{t=0} = \frac{k}{T}. \quad (3)$$

Тобто стала часу може бути визначена як момент часу, у який дотична до перехідного процесу у початковій точці траєкторії перетне усталене значення вихідної величини (рис. 1).

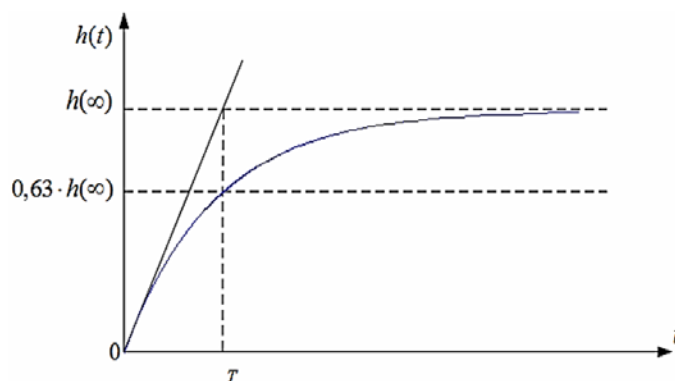


Рис. 1. Графічне визначення сталої часу інерційної ланки першого порядку.

Імпульсні перехідні характеристики  $w(t)$ , що представляють реакцію об'єкта при подачі на вхід імпульсу нескінченно малої тривалості й нескінченно великої

амплітуди, взаємно однозначно пов'язані з перехідними характеристиками  $w(t) = \frac{dh(t)}{dt} = L^{-1}\{W(p)\}$  також використовуються для ідентифікації об'єкта управління.

Процес ідентифікації аналогічний процесу ідентифікації по перехідній характеристиці і проводиться по відповідних математичних співвідношеннях для типових динамічних об'єктів [5].

На практиці точно реалізувати імпульсний вплив  $u(t) = c \cdot \delta(t)$  на вхід об'єкта, близький за властивостями до ідеального  $\delta$ -імпульсу неможливо, що пояснюється технічними причинами. Через відмінності при реалізації вхідного імпульсу експериментально знята імпульсна характеристика відрізняється від теоретичної. На рис. 2 представлено зіставлення експериментальної імпульсної перехідної характеристики 1 аперіодичного об'єкта першого порядку й теоретичної 2, побудованої за виразом

$$w(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (4)$$

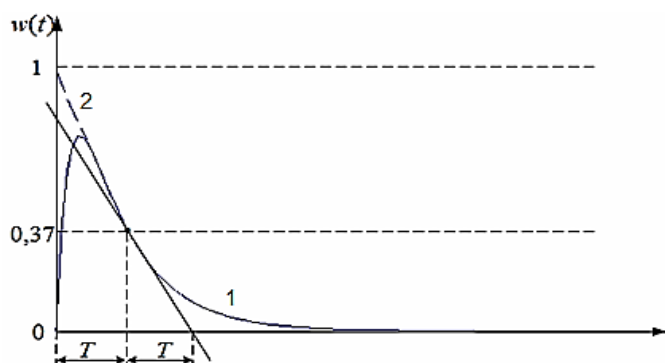


Рис. 2. Графічна ідентифікація за імпульсною ваговою функцією.

У роботі [3] пропонується автоматизований спосіб ідентифікації об'єктів управління за експериментальною імпульсною характеристикою. Оскільки імпульсні характеристики доволі важко використати безпосередньо в процесі синтезу автоматичних систем, автори пропонують апроксимувати експериментальну імпульсну характеристику передавальною функцією, яка, по-перше, адекватно відображала б динамічні властивості об'єкта з достатньою точністю, а по-друге, була б придатною для застосування обраного методу параметричного синтезу системи, що функціонує за відповідним алгоритмом.

Пропонований спосіб автоматизованого розв'язання задачі ідентифікації може бути реалізований, якщо її розглядати як класичну математичну задачу апроксимації експериментальних даних аналітичними виразами  $y = f(x)$ , умовно названий експериментально-математичною ідентифікацією об'єкта. У такій постановці задача ідентифікації відрізняється від математичної лише тим, що її розв'язок знаходять не у класі довільних функцій, а у класі функцій, що відповідають вибраним структурам математичних моделей об'єктів, оскільки це пов'язане з подальшим вибором алгоритму регулювання і методу параметричного синтезу системи.

Найширші можливості в плані автоматизації обробки результатів активного експерименту з дослідження динаміки об'єктів відкриваються при використанні пакета розширення *Curve Fitting Toolbox (Matlab)*, який дає змогу здійснити попереднє згладжування експериментальних даних і за допомогою різних методів наближення розв'язати нелінійну задачу підбору параметрів моделі об'єкта, апроксимуючи табличні залежності аналітичними виразами, оптимальними за критеріями *SSE*, *SSR*, *RMSE* [6].

Спочатку обирається вид апроксимуючої передавальної функції об'єкта (з числом невідомих коефіцієнтів  $\leq 6$ , що цілком достатньо для практики). Перехід у часову область здійснюється за допомогою рівняння імпульсної характеристики, що відповідає обраній математичній моделі об'єкта управління. Під час використання згаданих програм рівняння імпульсної характеристики  $w(t)$  задається як апроксимуюча функція, коефіцієнти якої необхідно підібрати так, щоб забезпечувалася достатня точність апроксимації. Знаходження математичної моделі об'єкта зводиться до відомої математичної задачі апроксимації табличних даних аналітичними виразами з максимально можливою точністю. Час  $t$  у рівнянні імпульсної характеристики розглядається як аргумент  $x$  апроксимуючої функції, тобто  $f(x) \equiv w(t)$ .

Отже, відомі графоаналітичні способи ідентифікації об'єктів управління потребують ручного введення експериментальних даних, що робить неможливим проводити ідентифікацію у режимі реального часу. Спосіб ідентифікації об'єктів управління за експериментальною імпульсною характеристикою теж передбачає ручне введення інформації.

### Мета дослідження

Метою дослідження є аналіз можливості застосування сучасних апаратних і програмних засобів для автоматизації традиційних способів ідентифікації, з можливістю отримувати значення параметрів об'єктів управління у реальному часі.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Як відомо, перехідна характеристика об'єкта управління відображає насамперед його динамічні властивості, тобто швидкість реакції на вхідний вплив. Іншими словами це швидкість зміни вихідного сигналу. Цю швидкість можна визначити як тангенс кута нахилу дотичної до перехідної характеристики (3), рис. 1. Відомі графоаналітичні способи визначення динамічних параметрів об'єкта управління дозволяють визначити значення сталої часу  $T$  шляхом графічної обробки перехідної характеристики. Натомість застосування програмних пакетів Mathcad, Matlab дозволяє безпосередньо вираховувати швидкість зміни вихідного сигналу об'єкта управління і пов'язане з ним значення сталої часу  $T$ , що значно скорочує час обробки даних. Пакет Matlab завдяки вбудованому OPC серверу дозволяє обробляти у реальному часі дані процесу, що надходять з датчиків або контролерів по цифровій мережі.

Імпульсна перехідна функція  $g(t)$  є похідною у часі перехідної функції  $h(t)$ , тобто швидкістю зміни вихідного сигналу [1]. На рис. 3 зображено перехідну характеристику та відповідну їй імпульсну функцію аперіодичної ланки першого порядку. Сталу часу  $T$  визначають як  $h(t) = 0,63$  від усталеного значення перехідної функції, що є більш точним аніж застосування методу дотичної. Цьому рівню відповідає значення  $g(t) = 0,44$ , тобто відносна швидкість зміни  $V_T/V_{\max}$  вихідної змінної складає 0,44 від максимального значення. Аналогічно можна визначити значення запізнення у системі. Рівень швидкості  $V_\tau/V_{\max}$  вихідного сигналу для визначення запізнення  $\tau$  визначають технічними умовами. Зазвичай значення  $V_\tau/V_{\max}$  лежить у діапазоні 0,1 – 0,2. Таким чином знаючи швидкість вихідної сигналу об'єкта можна легко визначати динамічні параметри типових лінійних об'єктів систем автоматичного управління. Визначення швидкості вихідного сигналу реалізується простим алгоритмом на основі даних отриманих від цифрових засобів управління САУ. Приклад реалізації запропонованого способу показано на рис. 4. Алгоритм розрахунку динамічних параметрів наведено на рис. 5.

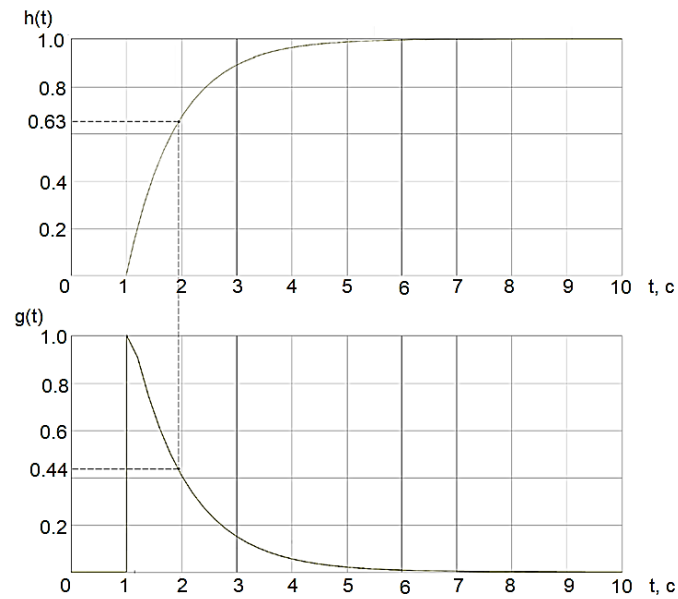


Рис. 3. Визначення сталої часу для об'єкта 1-го порядку по перехідній та імпульсній характеристикам.

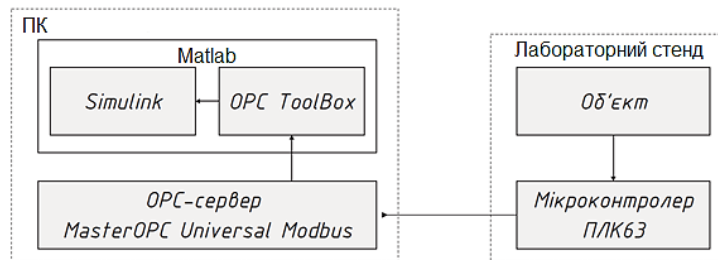


Рис. 4. Структурна схема системи для дослідження способу визначення динамічних характеристик об'єкта управління.

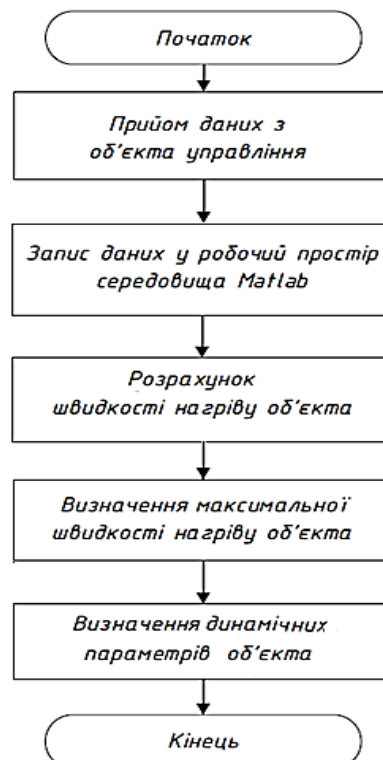


Рис. 5. Алгоритм обчислення динамічних параметрів ОУ.

Значення регульованого параметру (температура) фіксуються датчиком, підключеним до аналогового входу контролера Овен ПЛК63. Дані з контролера по мережі Modbus передаються через універсальний OPC-сервер Master OPC на персональному комп'ютері. У ролі OPC-клієнта було використано середовище Matlab, де проводилися розрахунки параметрів динаміки досліджуваного об'єкта.

Результати експерименту наведені на рис. 6.

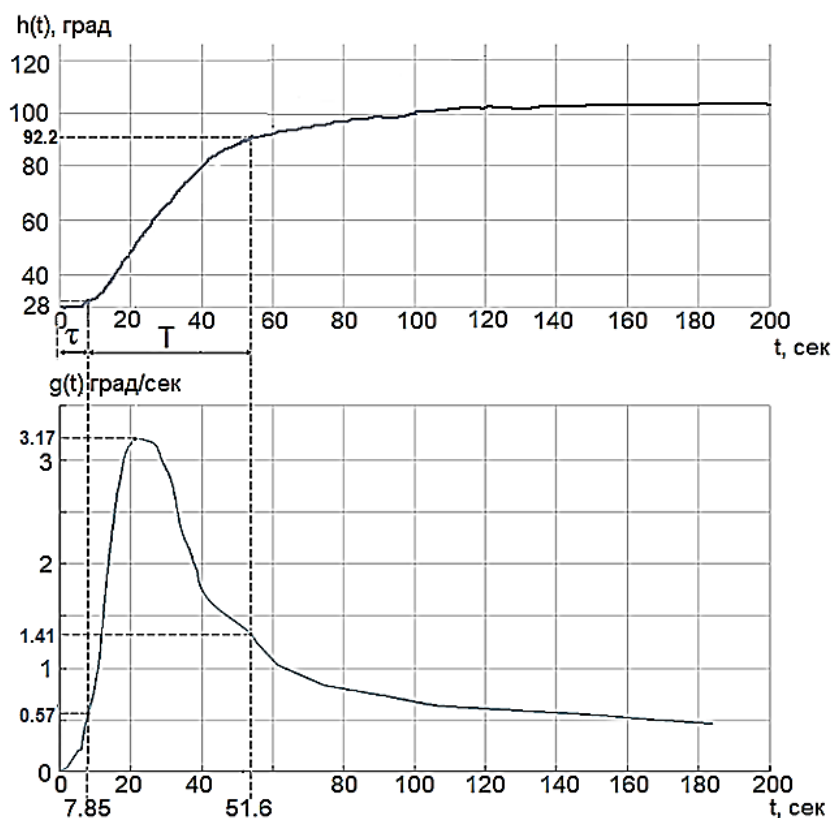


Рис. 6. Визначення сталої часу ОУ через швидкість зміни вихідного сигналу.

Для визначення сталої часу  $T$  і запізнення  $\tau$  розраховується і запам'ятовується значення максимальної швидкості  $V_{\max}$  вихідного сигналу (температури). Також розраховуються значення  $V_T/V_{\max}$ . Значення сталої часу  $T$  і запізнення  $\tau$  визначаються у моменти часу, коли  $V_T/V_{\max} = 0,44$  і  $V_\tau/V_{\max} = 0,18$ .

Усталене значення температури у ході експерименту склало  $103^\circ\text{C}$ , початкове значення температури –  $28^\circ\text{C}$ . Відношення  $V_\tau/V_{\max} = 0,57/3,17 = 0,18$ . Запізнення у цей момент  $\tau = 7,85$  с. Відношення  $V_T/V_{\max} = 1,41/3,17 = 0,44$ , що відповідає часу  $51,6$  с і з врахуванням запізнення маємо значення сталої часу  $T = 51,6 - 7,85 = 43,75$  с.

Температура, що відповідає часу  $51,6$  с дорівнює  $92,2^\circ\text{C}$ . Усталене значення температури –  $104^\circ\text{C}$  із врахуванням початкової температури у лабораторії –  $28^\circ\text{C}$  будемо мати нагрів ОУ  $64,2^\circ\text{C}$ . Відношення  $t_{\text{уст}}/t_T = 64,2/104 = 0,623$  має близьке значення до очікуваного  $0,63$ .

Вхідним сигналом в системі вважатимемо потужність нагрівача, що дорівнює  $10$  Вт. Тоді коефіцієнт передачі дорівнюватиме  $k = 103/10 = 10,3$   $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

Передавальна функція у такому випадку матиме вигляд:



$$W(p) = \frac{10,3}{43,75p + 1} e^{-7,85t}.$$

На графіках (рис. 6) присутні шуми, що може негативно вплинути на точність визначення параметрів об'єкта управління. Тому для підвищення точності запропонованого способу необхідно застосовувати фільтри нижніх частот.

### Висновки

Проведені дослідження підтвердили доцільність використання швидкості зміни вихідного сигналу досліджуваного об'єкту для визначення сталих часу і запізнення. Запропонований спосіб дозволяє значно підвищити ефективність відомих графоаналітичних методів ідентифікації. У ході досліджень з'ясувалося, що шуми, присутні у сигналах датчиків можуть суттєво вплинути на точність визначення параметрів об'єкта управління. Для зменшення впливу цих шумів необхідно застосовувати фільтри нижніх частот.

### Список використаної літератури

1. Дубовой В. М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування. Вінниця: ВНТУ, 2012. 308 с.
2. Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления. Самара: Самарский государственный технический университет, 2009. 136 с.
3. Ковела І., Вітер О., Яцук Ю. Автоматизована ідентифікація об'єктів регулювання за їх експериментальними імпульсними характеристиками. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2013. № 751. С. 59–67.
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. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.
6. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1104 с.

### References

1. Dubovoi, V. M. (2012). *Identifikatsiia ta modeliuvannia tekhnolohichnykh obiektiv i system keruvannia*. Vinnytsia: VNTU.
2. Diligenskaya, A. N. (2009). *Identifikatsiya ob'ektov upravleniya*. Samara: Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet.
3. Kovela, I., Viter, O., & Yatsuk, Yu. (2013). Avtomatyzovana identyfikatsiia obiektiv rehuliuвання za yikh eksperymentalnymy impulsnymy kharakterystykamy. *Visnyk Natsionalnoho universytetu 'Lvivska politekhnika'*. **751**, 59–67.
4. Strizhnev, A. G., Markov, A. V., & Rusakovich, A. N. (2012). Identifikatsiya ob'ekta upravleniya po perehodnoy harakteristike zamknutoy sistemyi. *Dokladyi BGUIR*. **5(67)**, 65–72.
5. Grop, D. (1979). *Metodyi identifikatsii sistem*. M.: Mir.
6. Anufriev, I. E., Smirnov, A. B., & Smirnova, E. N. (2005). *MATLAB 7*. SPb.: BHV-Peterburg.

Єдинович Михайло Борисович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматики, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету, e-mail: edenkuz@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6113-1923.

Поливода Оксана Валеріївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматики, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету, e-mail: pov81@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6323-3739.

Кузьміна Тетяна Олегівна – д.т.н., професор, професор кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації Херсонського національного технічного університету, e-mail: edenkuz@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6113-1923.

Руденко Ігор Олександрович – магістр кафедри автоматики, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету, e-mail: 3343020@kntu.net.ua, ORCID: 0000-0003-3577-245X.

Шестаков Віталій Сергійович – магістр кафедри автоматики, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету, e-mail: shestakov.v.wezom@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1622-057X.