



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **130016** (13) **C2**
(51) МПК (2025.01)
G01D 21/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

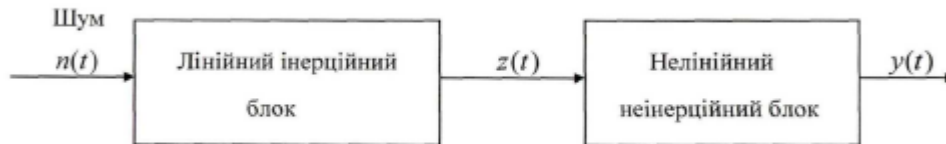
<p>(21) Номер заявки: а 2021 07706</p> <p>(22) Дата подання заявки: 28.12.2021</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 16.10.2025</p> <p>(41) Публікація відомостей про заяву: 28.06.2023, Бюл.№ 26</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 15.10.2025, Бюл.№ 42</p>	<p>(72) Винахідник(и): Полярус Олександр Васильович (UA), Поляков Євген Олександрович (UA), Чепусенко Євгеній Олександрович (UA), Ібрагімов Шах Гусаєвич (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002 (UA), Полярус Олександр Васильович, вул. Наталії Ужвій, 86, кв. 81, м. Харків, 61195 (UA), Поляков Євген Олександрович, вул. Тракторобудівників, 102-а, кв. 57, м. Харків, 61118 (UA), Чепусенко Євгеній Олександрович, просп. Науки, 68, кв. 13, м. Харків, 61103 (UA), Ібрагімов Шах Гусаєвич, вул. Салтівське шосе, 246, к. 136, м. Харків, 61171 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 125893 U, 25.05.2018 Коваль А. О. Вдосконалення методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску : дис. – Харків. 2016. Полярус О. В. и др. Спрощена модель лінійних інерційних вимірювальних систем. – 2021. Поляков Є. О., Полярус О. В. Оцінка джерел невизначеності та похибок при наближеному розв'язанні оберненої задачі вимірювань //Electrotechnic and Computer Systems. – 2012. – №. 7 (83). – С. 79-84. Полярус О. В. и др. Вимоги до точності вимірювання сигналів на виході датчиків для забезпечення якісного відновлення вхідного сигналу. – 2011. UA 95482 U, 25.12.2014 UA 75106 U, 26.11.2012</p>
--	---

UA 130016 C2

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ІМПУЛЬСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТИСКУ

(57) Реферат:

Винахід належить до вимірювання параметрів динамічних систем і може бути використаний в галузях точного машинобудування для підвищення точності вимірювальної інформації. Спосіб визначення імпульсної характеристики вимірювального каналу тиску включає операції з отримання сигналу з датчика тиску, фільтрації за допомогою фільтра низьких частот, виділенням флукуаційних складових, що підсилюються у підсилювачі, які потім подаються в блок визначення імпульсної характеристики, де визначають спектральну щільність потужності шуму. Експериментальний сигнал порівнюється в компараторі з теоретичним сигналом, що формується з послідовно з'єднаним лінійним інерційним та нелінійним неінерційним блоками. Технічним результатом винаходу розширення меж застосування способу визначення імпульсної характеристики вимірювального каналу тиску та підвищення точності вимірювальної інформації.



Фіг. 1

Винахід є загальним для різних варіантів побудови вимірювальних каналів. Він належить до вимірювання параметрів динамічних систем і можуть застосувати при експлуатації технічно складних об'єктів (ТСО), а також в галузях точного машинобудування для підвищення точності вимірювальної інформації.

5 До вимірювального каналу належить вимірювальний канал тиску (ВКТ), що складається з вимірювальної лінії (ВЛ) та датчика (датчиків) тиску. Вимірювальна лінія являє собою трубопровід, наповнений рідиною або газом. На окремих ТСО довжина ВЛ може досягати сотень метрів. У процесі експлуатації під дією зовнішніх та внутрішніх чинників статичні і динамічні характеристики ВКТ змінюються і можуть значно спотворювати вимірювальну інформацію про тиск технологічного процесу. Це створює необхідність застосування жорстких вимог щодо проведення технічного обслуговування ВКТ і, зокрема, ВЛ.

10 Вимірювальний канал тиску як технічна система в ідеальному випадку є лінійною інерційною системою, оскільки рідина (найчастіше, вода) не стискається і без спотворень передає тиск технологічного процесу від об'єкта вимірювання до датчиків тиску, функція перетворення яких близька до лінійної. При експлуатації в рідині може з'явитись турбулентність, вода може частково замерзати в локальних областях ВЛ, забруднюватись тощо. Як наслідок, функція перетворення вимірювального каналу тиску набуває нелінійних властивостей. Методи аналізу подібних систем є надзвичайно складними і описані в багатьох роботах. У [Тихонов В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов/ В. И. Тихонов. - М.: Радио и связь, 1986. - 296 с] накреслені підходи до розв'язання задач проходження сигналів по нелінійних інерційних системах і зазначається, що такі підходи є непривабливими для практики. В останні роки істотно збільшився обсяг публікацій за цією проблемою, наприклад, [1. Brouri A. Identification of Nonlinear Systems Structured by Hammerstein Wiener Model / A. Brouri, F. Giri, A. Mkhida, F. Z. Chaoui, A. Elkarkri, M. L. Chhibat // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. -2014.- Vol.8.- №5-Рр. 738-741.; 2. Павленко С. В. Регуляризация процедуры идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра/ С. В. Павленко, В. Д. Павленко // Труды X Международной конференции "Идентификация систем и задачи управления" (26-29 января).- М., 2015. - С. 230-237.], але в усіх зазначених наукових працях аналізують проблеми ідентифікації нелінійних інерційних систем без урахування особливостей ВКТ, що обумовлюються змінюванням у часі його динамічних характеристик та функції перетворення, в загальному випадку, нелінійної, при наявності на вході каналу нестационарних вхідних дій. У роботах Хашеміана Х. М., наприклад, [1. Хашемиан Х. М. Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности / Х. М. Хашемиан. - М.: Издательство Бином, 2008. - 336 с, 2. Хашемиан Х. М. Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях. - М.: Издательство Бином, 2012. - 354 с], навпаки, всебічно аналізується ВКТ, але не враховується мінливість його динамічних характеристик. Звідси виникає завдання створення методів аналізу нелінійних інерційних ВКТ, а також інших вимірювальних каналів з урахуванням особливостей їх експлуатації.

40 Найбільш важливим параметром лінійних інерційних ВКТ є постійна часу каналу. Для опису нелінійних систем цей параметр не використовується, оскільки традиційна теорія таких систем не передбачає поняття постійної часу. Існують, однак, моделі Вінера та Гаммерштейна [Adrian Wills, Thomas V. Schon, Lennart Ljung, Brett Ninness. Identification of Hammerstein-Wiener Models. - January 2013, Automatica, 49 (1), pp. 70-81], в яких модель нелінійної інерційної системи представляють як послідовне з'єднання віртуальних моделей лінійної інерційної і нелінійної неінерційної систем (модель Вінера) або нелінійної неінерційної і лінійної інерційної систем (модель Гаммерштейна). Один з блоків цих моделей є лінійним інерційним і тому може характеризуватися постійною часу. З іншого боку, цей блок є віртуальним і не може бути реалізованим на практиці як окремий елемент нелінійної інерційної системи, але з фізичної точки зору ясно, що всі реальні системи є інерційними і тому мають деяку постійну часу або смугу пропускання, що для систем, що описуються диференціальними рівняннями першого порядку, обернено пропорційна цій постійній часу. Далі вважають, що нелінійна система характеризується постійною часу віртуального лінійного інерційного блоку моделі Вінера або Гаммерштейна. На практиці ВКТ ТСО є унікальними системами і для визначення їх динамічних характеристик дуже важко (а в багатьох випадках неможливо) організувати подачу тестових сигналів на їх входи, а значить завдання визначення постійної часу навіть лінійної системи є проблематичним. Вихід цього параметру за встановлені межі значно спотворює вимірювальну інформацію про тиск в технологічному процесі і може негативно вплинути на безпеку експлуатації ТСО. Найбільш актуальним є все ж розробка способу оцінки імпульсної

характеристики та постійної часу нелінійного інерційного ВКТ, оскільки для її визначення у лінійному каналі вже існують способи.

В [Полярус О. В., Поляков Є. О., Бровко Я. С. Спосіб визначення вхідної дії нелінійного інерційного вимірювального каналу. Патент на корисну модель №125893; номер заявки у 2018 00122; 25.05.2018; Бюлетень №10/2018] визначення імпульсної характеристики та постійної часу вимірювального каналу ускладнюється, оскільки на лінійний інерційний блок моделі Гаммерштейна надходить вже спотворений сигнал з виходу нелінійного блока, який визначається з відносно великими похибками при розв'язанні оберненої задачі вимірювань при відомому вихідному сигналі лінійного блока і це може приводити до значних похибок при визначенні імпульсної характеристики лінійного блока. В таких ситуаціях бажано мати інформацію про вхідну дію, а не отримувати її. Однак, на практиці достовірної інформації про вхідну дію немає і тому бажано використовувати особливості вхідної дії. До таких особливостей належить наявність у вхідній дії гідродинамічних шумів тиску з широким спектром.

За найближчий аналог вибрано [Hashemian H. M. Maintenance of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants. - Springer, 2006. - 326 p.], в якому описано спосіб визначення постійної часу лінійної інерційної вимірювальної системи тиску. Оскільки тестовий сигнал створити на ТСО проблематично, у найближчому аналогу використовується шум технологічного процесу як вхідний сигнал ВКТ. Він обумовлений флуктуаціями тиску у вимірювальній лінії, які завжди існують. Шум технологічного процесу виділяється на виході лінійного датчика з широкою смугою пропускання (малою постійною часу) шляхом вилучення постійної компоненти з усього сигналу і підсилення змінної компоненти. Остання дискретизується і запам'ятовується для наступного аналізу. Аналіз може проводитись в режимі реального часу уже під час збору даних або автономно шляхом аналізу зібраних даних, що зберігаються в пам'яті комп'ютера. Опишемо теоретичну основу визначення постійної часу ВКТ.

В найближчому аналогу вимірювальний канал тиску вважається лінійним і для визначення імпульсної характеристики $h(t)$ системи, а значить і постійної часу ВКТ використовується метод аналізу шумів. Фізичною основою цього методу є зв'язок між імпульсною характеристикою та характеристиками випадкових процесів на вході та виході системи [Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов. - М.: Высшая школа, 1988.-448 с.]:

$$h(t) = \frac{2}{2\pi} \int_{-\sigma}^{\sigma} K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (1)$$

де $K(j\omega)$ - комплексна частотна характеристика системи (КЧХ) або частотний коефіцієнт передачі по напрузі, або власне число системного оператора, яким є інтеграл згортки. Власною функцією цього оператора є функція $e^{j\omega t}$. Вихідний сигнал лінійної системи

$$z(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\sigma}^{\sigma} K(j\omega) X(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2)$$

де $X(\omega)$ - спектральна щільність вхідного сигналу; для вихідного сигналу лінійного каналу вона визначається за формулою:

$$Z(j\omega) = K(j\omega) X(\omega). \quad (3)$$

В методі аналізу шумів на вхід системи подається білий шум. В експерименті це може бути сигнал, спектральна щільність якого є майже постійною в смузі пропускання системи, а при математичному моделюванні вхідний сигнал створюється за допомогою стандартних програм формування квазібілого шуму, які є, наприклад, в математичному пакеті Matlab. Отже, спектральна щільність вхідного сигналу $X(\omega)$ вважається рівною спектральній щільності білого шуму N_0 . Тоді з формули (3) випливає:

$$K_p(j\omega) = K^2(j\omega) = \frac{Z^2(\omega)}{N_0}, \quad (4)$$

де $K_p(j\omega)$ є частотною характеристикою датчика тиску по потужності або його частотним коефіцієнтом передачі по потужності, а N_0 - спектральна щільність білого шуму по потужності.

Підставляємо частотну характеристику по напрузі як корінь з (4) в (1) і отримуємо:

5

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi\sqrt{N_0}} \int_{-\infty}^{\infty} Z(j\omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{z(t)}{\sqrt{N_0}}, \quad (5)$$

10 Формули (4) і (5) характеризують динамічні властивості лінійної інерційної системи відповідно в частотній та часовій областях. З співвідношення (5) випливає, що для визначення імпульсної характеристики системи $h(t)$ необхідно виміряти вихідний сигнал $z(t)$ лінійного інерційного каналу та оцінити спектральну щільність потужності білого шуму N_0 . Отже, похибки визначення зазначеної характеристики пов'язані з точністю вимірювання $z(t)$ та, головним чином, з точністю розрахунку N_0 . В найближчому аналогу спектральна щільність потужності білого шуму N_0 визначається з формули (4) при відомій функції $K(j\omega)$ (це характеристика датчика тиску) та відомій спектральній щільності вихідного сигналу датчика тиску $Z(\omega)$, який вимірюється.

15 Оскільки білий шум має постійну спектральну щільність потужності у всьому діапазоні частот, то такий процес неможливо знайти на практиці, однак в деякому діапазоні частот Df функцію $X(f)$ можна вважати постійною і тоді у цьому діапазоні її розглядають як шум, що є близьким до білого. Таким чином, визначення N_0 у найближчому аналогу зводиться до визначення практично

20 постійної величини $X(f) = N_0$ у діапазоні частот Df та виконання математичної операції $\frac{Z_0^2}{Df^2}$. Піднесення в квадрат амплітуди вихідного сигналу Z_0 необхідно для отримання потужності вихідного сигналу, що приведена до одиничного опору. Амплітуда Z_0 на виході датчика тиску

має розмірність [В] і тому розмірність спектральної щільності потужності N_0 становить $\frac{B^2}{\Gamma \text{ц}^2}$

25 Основним фактором, що впливає на точність визначення імпульсної характеристики, а потім і постійної часу, є правильність оцінки спектральної щільності потужності N_0 білого шуму. В найближчому аналогу це здійснюється шляхом аналізу вимірюваної спектральної щільності $Z(f)$ вихідних сигналів в різних режимах роботи ТСО, в різний час, в різних інших умовах. Нестационарні шуми та випадкові процеси з викидами вилучаються з розгляду і аналізу. Вимірювання $Z(f)$ проводиться протягом великого часу (тижні, місяці) і після отримання задовільних залежностей відбувається розрахунок середнього значення спектральної щільності потужності N_0 . Далі розраховується середня імпульсна характеристика ВКТ $h(t)$, а на рівні 0,37 від максимального значення визначається постійна часу t_0 динамічної системи.

30 Недоліком найближчого аналогу є його обмеженість рамками лінійних інерційних систем. Інерційність означає, що система має пам'ять. Багато вимірювальних каналів різних технічних об'єктів і, насамперед, каналів тиску є нелінійними інерційними, для яких прості інженерні методи аналізу практично не розроблені. Особливо небезпечними є випадки, коли лінійна функція перетворення вимірювального каналу, наприклад, ВКТ, поступово перетворюється в нелінійну, а остання змінюється неконтрольовано. Звідси впливає можливість прийняття неправильних висновків при експлуатації та діагностиці стану технічного об'єкту, що може привести до небажаних наслідків. Для усунення таких сценаріїв необхідно користуватись

35 достовірними моделями вимірювальних каналів.

Для нелінійних інерційних систем спосіб, що використовується в найближчому аналогу, не може бути застосований. Дійсно, якщо ВКТ подати у вигляді моделі Вінера, то на вході системи може існувати процес, близький до білого шуму. Для лінійного інерційного блока цієї моделі

40 може бути застосований метод аналізу шумів, але далі вихідний сигнал лінійного інерційного блока підлягає нелінійному перетворенню, що не дає можливості визначити імпульсну характеристику вимірювального каналу за вище приведеною теорією. Якщо ВКТ представити у вигляді моделі Гаммерштейна, то її перший нелінійний неінерційний блок буде спотворювати білий шум і приведені формули не будуть описувати реальні процеси. Отже, використання

50 методу аналізу шумів в нелінійних інерційних системах стає неможливим.

В основу винаходу поставлена задача зробити спосіб визначення імпульсної характеристики вимірювального каналу тиску, що включає вимірювальну лінію та датчик тиску.

Поставлена задача вирішується тим, що спосіб визначення імпульсної характеристики вимірювального каналу тиску включає вимірювальну лінію та датчик тиску, за допомогою якого

вимірюють реалізацію випадкового сигналу, з якої віднімають постійну складову, що формують шляхом пропускання сигналу через фільтр нижніх частот, а шумові флуктуації, що залишилися, підсилюють у підсилювачі і такі операції виконують протягом тривалого часу для багатьох реалізацій випадкового сигналу, шуми накопичують, після цього спектроаналізатором визначають спектральну щільність потужності накопичених реалізацій, ділять в подільнику сигнал з виходу датчика тиску на корінь з спектральної щільності і визначають імпульсну характеристику вимірювального каналу тиску. З метою розширення меж застосування відомого способу аналізу шумів при визначенні імпульсної характеристики вимірювального каналу тиску в умовах нелінійного спотворення його функції перетворення порівнюють в компараторі вимірний сигнал з виходу датчика тиску з теоретичним сигналом, який формують послідовно з'єднаними віртуальним лінійним інерційним та віртуальним нелінійним неінерційним блоками. Вихідний сигнал лінійного інерційного блока представляють у вигляді суми добутків невідомих коефіцієнтів ряду на відомі ортогональні сигнали, що формують з допомогою генераторів ортогональних сигналів і далі піддають цей сигнал нелінійному перетворенню у підсилювачі з регульованою нелінійною функцією перетворення у вигляді поліноміальної залежності з наперед невідомими коефіцієнтами поліному. Знаходять в квадраторі квадрат різниці між вимірним і теоретичним сигналами, інтегрують його в інтеграторі і цим визначають відстань між цими сигналами у функціональному просторі з квадратичною метрикою, яку мінімізують алгоритмом глобального випадкового пошуку шляхом змінювання коефіцієнтів ряду та коефіцієнтів поліному і визначають. Коефіцієнти ряду використовують для оцінювання вихідного сигналу лінійного інерційного блока, який ділять в подільнику на корінь з спектральної щільності потужності шуму і отримують імпульсну характеристику вимірювального каналу тиску.

Суть винаходу.

В запропонованому винаході будемо враховувати нелінійність, використовуючи модель Вінера (фіг. 1), в якій перший блок є лінійним інерційним, а другий - нелінійним неінерційним. На вході першого блока діє вхідний сигнал $x(t)$ з спектральною щільністю по напрузі $X(w) = \sqrt{N_0} \gg \text{const}$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\tau}^{\tau} X(w) e^{jw\tau} dw = n(t) = \frac{\sqrt{N_0}}{2\pi} \int_{-\tau}^{\tau} e^{jw\tau} dw, \quad (6)$$

який, по суті, є білим шумом $n(t)$. Спектральна щільність сигналу $z(t)$ на виході лінійного блока

$$Z(w) = X(w)K(jw) = \sqrt{N_0}K(jw). \quad (7)$$

Сам сигнал $z(t)$ визначають через перетворення Фур'є

$$z(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\tau}^{\tau} Z(w) e^{jw\tau} dw = \frac{\sqrt{N_0}}{2\pi} \int_{-\tau}^{\tau} K(jw) e^{jw\tau} dw = \sqrt{N_0} h(t), \quad (8)$$

і він є вхідним сигналом нелінійного неінерційного блока, який вже включає імпульсну характеристику $h(t)$ лінійного блока. Вихідний сигнал цього блока є одночасно вихідним теоретичним сигналом всього каналу, експериментальний вид якого можна виміряти

$$y_T(t) = j(\sqrt{N_0} h(t)), \quad (9)$$

де $j(g)$ є невідомою нелінійною функцією перетворення ВКТ. Її можна представити поліноміальною функцією. Зокрема, для поліному другого степеня

$$y_T(t) = a_0 + a_1 \sqrt{N_0} h(t) + a_2 N_0 (h(t))^2, \quad (10)$$

В формулі (10) в правій частині невідомими є коефіцієнти поліному a_i , $i = 0,1,2$, а в загальному випадку ще N_0 та $h(t)$. Спектральна щільність потужності білого шуму N_0 та імпульсна характеристика $h(t)$ можуть бути частково відомими до проведення вимірювань,

однак найбільш прийнятним є визначення $h(t)$ за формулою (8) при відомому сигналі $z(t)$ з виходу лінійного інерційного блоку. Спектральна щільність потужності шуму N_0 може визначатись різними способами [Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер. с франц. - М.: Мир, 1983]. Найпростіший підхід складається у виділенні в смузі пропускання датчика тиску спектра досліджуваного процесу, а потім розділення середньої потужності або середнього квадрату стаціонарного випадкового процесу тиску на ширину смуги пропускання.

Далі розкладають вже відомий після вимірювання на виході ВКТ експериментальний сигнал $y(t)$ в ряд Карунена-Лоева

$$y(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \gamma_i \psi_i(t), \quad (11)$$

де ψ_i - вибрані дослідником ортогональні функції, γ_i - вже відомі коефіцієнти. Невідому реалізацію вхідної дії $z(t)$, що надходить на вхід віртуального нелінійного інерційного блоку, також розкладають в ряд Карунена-Лоева

$$z(t) = \sum_{k=0}^{m-1} \beta_k \psi_k(t), \quad (12)$$

де $\psi_k(t)$ - ті ж самі ортогональні відомі функції, але тепер β_k - невідомі випадкові коефіцієнти і для кожної реалізації вхідної дії $z(t)$ як випадкового процесу вони будуть в загальному випадку відрізнятись.

Кількість коефіцієнтів γ_i та β_k залежить від форми функцій $y(t)$ та $z(t)$ і для реалізації запропонованого способу їх кількість повинна бути однаковою, тобто $m = n$. Вона вибирається дослідником на основі вибраної точності представлення функції. Отже, маємо нелінійний блок моделі Вінера, вихідний сигнал якого $y(t)$ виміряний з деякою точністю, а вхідний - є відомим тільки з формальної точки зору, тобто описаний математичним співвідношенням (12) з невідомими коефіцієнтами β_k .

Для виконання умови $y(t) \approx y_T(t)$ в формулу (10) підставляють співвідношення (11) і (12)

$$\sum_{i=0}^{n-1} \gamma_i \psi_i(t) = a_0 + a_1 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i \psi_i(t) + a_2 \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i \psi_i(t)^2. \quad (13)$$

Співвідношення (13) приводять у розгорнутому вигляді

$$\begin{aligned} \gamma_0 + \gamma_1 \psi_1(t) + \gamma_2 \psi_2(t) + \dots + \gamma_{n-1} \psi_{n-1}(t) &= a_0 + a_1 \beta_0(t) + a_1 \beta_1 \psi_1(t) + \\ a_1 \beta_2 \psi_2(t) + \dots + a_1 \beta_{n-1} \psi_{n-1}(t) &+ a_2 \beta_0^2 + a_2 \beta_1^2 \psi_1^2(t) + a_2 \beta_2^2 \psi_2^2(t) + \dots \\ \dots + a_2 \beta_{n-1}^2 \psi_{n-1}^2(t) &+ \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{m-1} a_2 \beta_i \beta_k \psi_i(t) \psi_k(t). \end{aligned} \quad (14)$$

Для спрощення виразу (14) проводять його інтегрування на інтервалі спостереження $[0, T]$. В силу ортогональності функцій $\psi_i(t)$ та $\psi_k(t)$

$$\int_0^T \psi_i(t) \psi_k(t) dt \approx 0. \quad (i \neq k) \quad (15)$$

Знак " \approx " замість знаку "=" записаний тому, що верхня межа інтегралу в (15) становить T , а не " ∞ ". З урахуванням інтегрування вираз (14) трансформують до вигляду

$$\begin{aligned} & \int_0^T \gamma_0 dt + \gamma_1 \int_0^T \psi_1(t) dt + \gamma_2 \int_0^T \psi_2(t) dt + \dots + \gamma_{n-1} \int_0^T \psi_{n-1}(t) dt = \\ & = \int_0^T a_0 dt + \int_0^T a_1 \beta_0 dt + a_1 \beta_1 \int_0^T \psi_1(t) dt + a_2 \beta_2 \int_0^T \psi_2(t) dt + \dots \\ & + a_1 \beta_{n-1} \int_0^T \psi_{n-1}(t) dt + \int_0^T a_2 \beta_0 dt + a_2 \beta_1^2 \int_0^T \psi_1^2(t) dt + \\ & + a_1 \beta_2^2 \int_0^T \psi_2^2(t) dt + \dots + a_2 \beta_{n-1}^2 \int_0^T \psi_{n-1}^2(t) dt. \end{aligned} \quad (16)$$

Вводять позначення:

$$\begin{aligned} C_i &= \int_0^T \psi_i(t) dt, \\ d_i &= \int_0^T \psi_i^2(t) dt, \end{aligned} \quad (17)$$

Коефіцієнти C_i , d_i після інтегрування за формулами (17) є відомими. З урахуванням (17) співвідношення (16) записують у вигляді:

$$\begin{aligned} & \gamma_0 T + \gamma_1 C_1 + \gamma_2 C_2 + \dots + \gamma_{n-1} C_{n-1} = a_0 T + a_1 \beta_0 T + \\ & + a_1 \beta_1 C_1 + a_1 \beta_2 C_2 + \dots + a_1 \beta_{n-1} C_{n-1} + a_0 \beta_0 T + \\ & + a_2 \beta_1^2 d_1 + a_2 \beta_2^2 d_2 + \dots + a_2 \beta_{n-1}^2 d_{n-1}. \end{aligned} \quad (18)$$

В співвідношенні (18) невідомими є коефіцієнти

$$a_0, a_1, a_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}. \quad (19)$$

Тоді задача визначення коефіцієнтів (13) зводиться до мінімізації цільової функції n змінних (функціоналу), тобто відстані у функціональному просторі з квадратичною метрикою між вимірним $y(t)$ та теоретичним $y_T(t)$ сигналами або між лівою та правою частинами рівняння (18)

$$\begin{aligned} f(a_0, a_1, a_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}) &= \int_{-\infty}^{\infty} (y(t) - y_T(t))^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} [\gamma_0 T + \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i C_i - \\ & - (a_0 + a_0 \beta_0 + a_1 \beta_0) - a_1 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i C_i - a_2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i^2 d_i]^2 dt. \end{aligned} \quad (20)$$

З урахуванням (11) вираз (20) можна переписати наступним чином

$$\begin{aligned} f(a_0, a_1, a_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}) &= \\ & \int_{-\infty}^{\infty} [y(t) - (a_0 + a_0 \beta_0 + a_1 \beta_0) - a_1 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i C_i - a_2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i^2 d_i]^2 dt. \end{aligned} \quad (21)$$

Мінімізацію функціоналу (20) або, що теж саме, (21) проводять за допомогою алгоритму глобального випадкового пошуку екстремуму (генетичного алгоритму). В результаті визначають всі коефіцієнти (19), а значить, і вхідний сигнал $z(t)$ (8). Потім нормують його до одиниці і отримують нормовану імпульсну характеристику, а значить, і постійну часу ВКТ. При нормуванні зникає постійна величина N_0 . В запропонованому винаході немає потреби визначати спектральну щільність потужності вхідного сигналу (шуму) N_0 у випадках, коли спотворюється лінійність функції перетворення вимірювального каналу тиску, але спосіб потребує доведення наявності вхідного сигналу ВКТ у вигляді білого шуму, як і в найближчому аналогу.

Схема пристрою, що реалізує запропонований винахід, приведена на фіг. 2. Його робота ґрунтується на співвідношеннях (20) або (21). Вираз (20) передбачає визначення коефіцієнтів γ_i розкладання відомого сигналу в ряд Карунена-Лоева, які для роботи пристрою не потрібні, але можуть використовуватись як апіорні значення для коефіцієнтів β_i , що визначаються з виразів

(20), (21). Дійсно, додатна та від'ємна складові правої частини рівності (21) описують один і той же сигнал і тому можна очікувати, що коефіцієнти γ_i та β_i знаходяться в одному діапазоні значень.

На вхід вимірювальної лінії 1 (фіг. 2) подають тиск технологічного процесу об'єкта, який відправляють на датчик тиску 2, з виходу якого знімають сигнал, що пропорційний тиску. Цей сигнал проходить через фільтр нижніх частот 3 і надходить також на інвертор 4. Фільтр 3 виділяє низькочастотну складову, яку спрямовує на перший вхід першого суматора 5, на другий вхід якого подають сигнал з виходу інвертора 4 і в першому суматорі 5 від сигналу, що містить флуктуаційні складові, віднімається постійна (точніше, низькочастотна складова) і, як наслідок, на виході першого суматора 5 залишається тільки флуктуаційні складові, які підсилюють у підсилювачі 6. Отже, наближено вважають, що на виході підсилювача 6 формується білий шум. Його направляють на блок 7 визначення імпульсної характеристики $h(t)$ згідно з формулою (8), де також визначають спектральну щільність потужності шуму N_0 . На цей блок подають також необроблений сигнал з виходу датчика тиску 2 для реалізації в цьому блоці операції за формулою (8). Визначення N_0 проводять в період після очищення або ремонту вимірювальної лінії 1, коли є повна впевненість, що вимірювальний канал тиску є лінійною інерційною системою, оскільки датчики тиску при відсутності несправності, як правило, є лінійними [Хашемиан Х. М. Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности. -М: Издательство Бином, 2008. - 336 с.]. Внаслідок того, що малі гідродинамічні шуми накопичуються за великий період часу, то їх спектральну щільність потужності N_0 можна вважати однаковою на тривалому часі експлуатації технічного об'єкта [Хашемиан Х. М. Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях. М.: Издательство Бином, 2012.-354 с].

Для ВКТ першого порядку імпульсна характеристика:

$$h(t) = \frac{A}{t_0} e^{-\frac{t}{t_0}}, \quad (22)$$

де A - деякий безрозмірний коефіцієнт, що вибирається дослідником, а t_0 - постійна часу каналу, яка при відомій $h(t)$ визначається шляхом чисельного розв'язання рівняння (22) методом послідовних наближень, який описано, наприклад, в [Крылов И. А., Черноусько Ф. Л. Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления. - Журнал вычислительной математики и математической физики, 1972, том 12, № 1, с. 14-34]. При нормуванні імпульсної характеристики $h(t)$ значення A може бути довільним. Таким чином, складові схеми 1...7 (фіг. 1) описують склад і роботу найближчого аналогу.

Отже, в найближчому аналогу постійна часу ВКТ визначається з формули (22), причому вимірювальний канал обов'язково повинен бути лінійним. Цей канал, як правило, є таким після проведення технічного обслуговування або ремонту вимірювальної лінії. Отримана для такого лінійного каналу імпульсна характеристика та постійна часу є апріорними для випадків, коли ВЛ забруднюється або в лінії виникають локальні закупорки. З виходу блока 7 апріорну інформацію про імпульсну характеристику $h(t)$ подають на перший вхід блока 11 мінімізації функціоналу (21). На другий вхід цього блока надсилають вихідний сигнал датчика тиску 2 через другий суматор 8. На другий вхід другого суматора 8 також надсилають теоретичний сигнал $u_T(t)$, що формують згідно з правою частиною рівняння (13).

Порівняння реального вимірюваного сигналу $y(t)$ з теоретичним $u_T(t)$, який включає невідомі коефіцієнти $a_0, a_1, a_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}$, дає можливість за допомогою генетичного алгоритму в блоці 11 мінімізувати функціонал (21) і визначити зазначені коефіцієнти. Для цього різницевий сигнал з виходу другого суматора множать сам на себе в першому квадраторі 9 і подають на перший інтегратор 10, який виконує інтегрування в межах від нуля до часу спостереження сигналу. З виходу інтегратора 10 сигнал направляють на другий вхід блока мінімізації функціоналу 11. Оскільки невідомих коефіцієнтів багато, функціонал може мати локальні мінімуми, що породжують хибну інформацію про ці коефіцієнти $a_0, a_1, a_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}$. Щоб ймовірність подібної ситуації була низькою, на блок 11 можуть подавати відомості про інші коефіцієнти γ_i , що входять до ряду (11). Вони повинні визначатись для лінійного ВКТ i , як вже зазначено, будуть оцінювати апріорні значення для коефіцієнтів β_i .

Невідомий чисельно, але відомий алгебраїчно теоретичний сигнал $u_T(t)$ на виході ВКТ формують наступним чином. Для створення коефіцієнтів S_k, d_k згідно з формулами (17) n

генераторів ортогональних сигналів 16 формують ортогональні наперед відомі сигнали $\psi_k(t)$, $k=0, \dots, n-1$, згідно зі співвідношенням (12), де β_k - невідомі випадкові коефіцієнти, які для кожної реалізації вхідної дії $z(t)$ обчислюють за допомогою генетичного алгоритму блока мінімізації функціоналу 11. В кожному з n каналів вихідний сигнал $\psi_k(t)$ подають на другий інтегратор 17, з виходу якого знімають значення коефіцієнта C_k , а також на другий квадратор 18. Вихідний сигнал квадратора 18 направляють на третій інтегратор 19, на виході якого одержують значення коефіцієнта d_k . Вихідні сигнали других інтеграторів 17 кожного каналу подають на перші входи третіх перемножувачів 22, на другі входи яких з блока мінімізації функціоналу 11 направляють сигнали, амплітуда яких дорівнює значенню коефіцієнтів β_k . З виходів третіх перемножувачів 22

10 сигнали, що пропорційні добуткам $\beta_k C_k$ спрямовують на шостий суматор 20, вихідний сигнал якого $\sum_{k=0}^{n-1} \beta_k C_k$ подають на перший вхід другого перемножувача 21, до другого входу якого підключають сигнал, що пропорційний коефіцієнту a_1 з виходу блока мінімізації функціоналу 11.

Вихідний сигнал другого перемножувача 21, амплітуда якого становить $a_1 \sum_{k=0}^{n-1} \beta_k C_k$, відправляють на другий вхід третього суматора 12. На перший вхід цього суматора подають сигнал з

15 амплітудою $a_2 \sum_{k=0}^{n-1} \beta_k^2 C_k$, який формують наступним чином.

З виходів третіх інтеграторів 19 сигнали з амплітудою d_k направляють на перший вхід четвертих перемножувачів 23, на другий вхід яких з виходів блока 11 подають сигнал амплітудою β_k , що перемножують сам на себе в третіх квадраторах 24. Сигнали $\beta_k d_k$ в кожному каналі з виходів четвертих перемножувачів 23 подають на сьомий суматор 25 і з виходу останнього - на вхід п'ятого перемножувача 26, на другий вхід якого з виходу блока мінімізації функціоналу 11 направляють сигнал амплітудою a_2 . З виходу п'ятого перемножувача 26 сигнал подають на перший вхід третього суматора 12. На третій вхід цього суматора спрямовують сигнал з амплітудою $a_0 + a_0 \beta_0 + a_1 \beta_0$, до складу якого входять тільки коефіцієнти a_0, a_1, β_0 з

25 виходу блока 11. Сигнали a_0, a_1 подають на входи п'ятого суматора 15, вихідний сигнал якого $a_0 + a_1$ перемножують на β_0 в першому перемножувачі 14, а сигнал амплітудою $(a_0 + a_1)\beta_0$ подають на перший вхід четвертого суматора 13. До другого входу цього суматора підводять сигнал амплітудою a_0 з виходу блока 11. Вихідний сигнал четвертого суматора 13 подають на третій вхід третього суматора 12. З виходу останнього теоретичний сигнал $u_T(t)$ подають на другий вхід другого суматора 8, де цей сигнал порівнюється з експериментальним сигналом $u(t)$.

30 При виникненні у вимірювальному каналі тиску нелінійних спотворень функції перетворення визначення постійної часу каналу стає неможливим і не існує навіть такого поняття як постійна часу нелінійного інерційного каналу. В запропонованому способі визначаються коефіцієнти $a_0, a_1, a_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}$ і це дає можливість віртуально розділити канал на лінійний інерційний та нелінійний неінерційний блоки (модель Вінера). За допомогою визначених коефіцієнтів $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}$ можна відновити вихідний сигнал віртуального лінійного інерційного блока за формулою (12), тобто сигнал $z(t)$, а далі з використанням формули (8) визначити імпульсну характеристику $h(t)$ і також постійну часу t_0 вимірювального каналу тиску, точніше його лінійного блока. Визначені коефіцієнти a_0, a_1, a_2 характеризують також ступінь нелінійності ВКТ і можуть використовуватись для оцінки стану вимірювального каналу.

40 Білий шум моделювався в математичному пакеті Matlab і в ньому були відсутні нестационарність або викиди. Функція перетворення нелінійного блока описувалась квадратичною нелінійністю (10). На фіг. 3 приведено приклад реалізації шумового сигналу (модель білого шуму) на вході ВКТ або інакше на вході лінійного інерційного блока каналу для моделі Вінера при значенні постійної часу $t_0 = 0.1$ с, а на фіг. 4 - показано вигляд теоретичної імпульсної характеристики лінійного інерційного блока (22). При проходженні шумового сигналу через цей блок з зазначеною характеристикою відбувається фільтрація білого шуму і спотворений сигнал вже з іншою одиницею вимірювання показано на фіг. 5. Цей сигнал проходить через нелінійний неінерційний блок моделі Вінера з нелінійною функцією перетворення, що описується поліномом (10), і при цьому були вибрані наступні коефіцієнти

поліному: $a_0 = 1.0$, $a_1 = 2.3$, $a_2 = 1.0$. Коефіцієнт a_0 може дорівнювати нулю, а це означає, що при нульовій вхідній дії амплітуда сигналу на виході датчика тиску дорівнює нулю і це природно. При моделюванні вибрано більш загальний випадок $a_0=1.0$, тобто датчик тиску має початкову напругу на виході для деяких технологічних цілей. Нелінійні спотворення сигналу, як видно з

5 фіг. 6, є великими. Використання запропонованого способу дозволяє визначити відновлений в процесі розв'язання оберненої задачі вихідний сигнал лінійного інерційного блока (фіг. 7). Тонкою лінією показано теоретичний сигнал, а жирною лінією - цей же сигнал, але отриманий при застосуванні запропонованого способу. Як впливає з фіг. 7, внаслідок нелінійних спотворень реальний і відновлений сигнали не співпадають, хоча загальний характер їх поведінки зберігається. Окрім відновлення зазначеного сигналу запропонований спосіб дає

10 можливість отримати коефіцієнти нелінійної функції перетворення, які вже не співпадають з теоретичними, що вибрані при моделюванні. Як наслідок, не співпадає з теоретичною (суцільна лінія) і реальна функція перетворення (пунктирна лінія) на фіг. 8.

Отже, на вході лінійного інерційного блока існує білий шум (фіг. 3), а на виході - відновлений

15 сигнал (фіг. 7). Вони зв'язані між собою рівнянням згортки або через спектральні перетворення - рівнянням (8). Тому з використанням цих зв'язків отримують відновлену імпульсну характеристику ВКТ, яка показана на фіг. 9. Суцільною лінією показана імпульсна характеристика ВКТ, яка є тією ж самою, що і характеристика на фіг. 4, але вона для наочності зображена для часового інтервалу 1 с. Пунктирною лінією показана відновлена за допомогою

20 запропонованого способу імпульсна характеристика. Її пульсуючий характер обумовлений результатом глобального випадкового пошуку мінімуму функціоналу (21). Якщо провести усереднення цієї імпульсної характеристики, то вона на часових інтервалах більше 1 с буде близько наближатись до теоретичної, а на менших інтервалах спостерігаються відмінності, що неодмінно приведуть до похибок вимірювання постійної часу (фіг. 10). Залежність відносної

25 похибки $\delta\tau_0$ визначення постійної часу τ_0 вимірювального каналу від значення цієї постійної показана для різних коефіцієнтів формули (10): суцільна лінія - $a_2 = 0.1$, пунктирна лінія - $a_2 = 0.5$, штрих-пунктирна лінія - $a_2=1.0.3$ фіг. 10 впливає, що завжди можна вибрати допустимі

значення інерційності ВКТ, що визначаються постійною часу τ_0 , а також допустимі варіації нелінійної функції перетворення каналу, які визначаються коефіцієнтами a_i , $i = 0,1,2$, щоб

30 відносні похибки вимірювання постійної часу $\delta\tau_0$ не перевищували наперед заданої величини, наприклад, 10 %. Для постійної часу ВКТ це характеризує високу точність. Крім того, така інформація дозволяє розробити вимоги до експлуатації ВКТ на ТСО. Запропонований спосіб дає можливість оцінити нелінійність ВКТ і при перевищенні допустимого відхилення від лінійної функції перетворення ВКТ прийняти рішення щодо відмови від традиційного способу оцінки

35 імпульсної характеристики та постійної часу вимірювального каналу і переходу до застосування запропонованого способу. Якщо цього не зробити, то відносні похибки визначення постійної часу каналу внаслідок нелінійних спотворень сигналу будуть досягати сотень відсотків, що свідчить про недопустимість застосування традиційних методів визначення постійної часу ВКТ в умовах, які змінилися. На реальних ТСО це забезпечується частим обслуговуванням

40 вимірювальної лінії, наприклад, її контролем та очищенням, що збільшує економічні витрати. Отже, запропонований спосіб розширює межі застосування методу аналізу шумів в умовах виникнення нелінійності функції перетворення вимірювального каналу тиску.

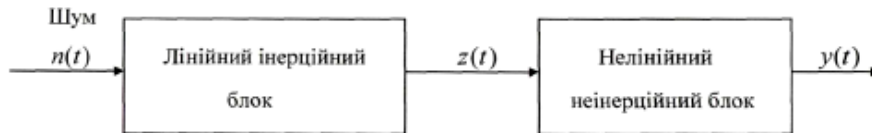
ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

45 Спосіб визначення імпульсної характеристики вимірювального каналу тиску, що включає вимірювальну лінію та датчик тиску, за допомогою датчика тиску вимірюють реалізацію випадкового сигналу, з якої віднімають постійну складову, що формують шляхом пропускання сигналу через фільтр нижніх частот, а шумові флуктуації, що залишилися, підсилюють у

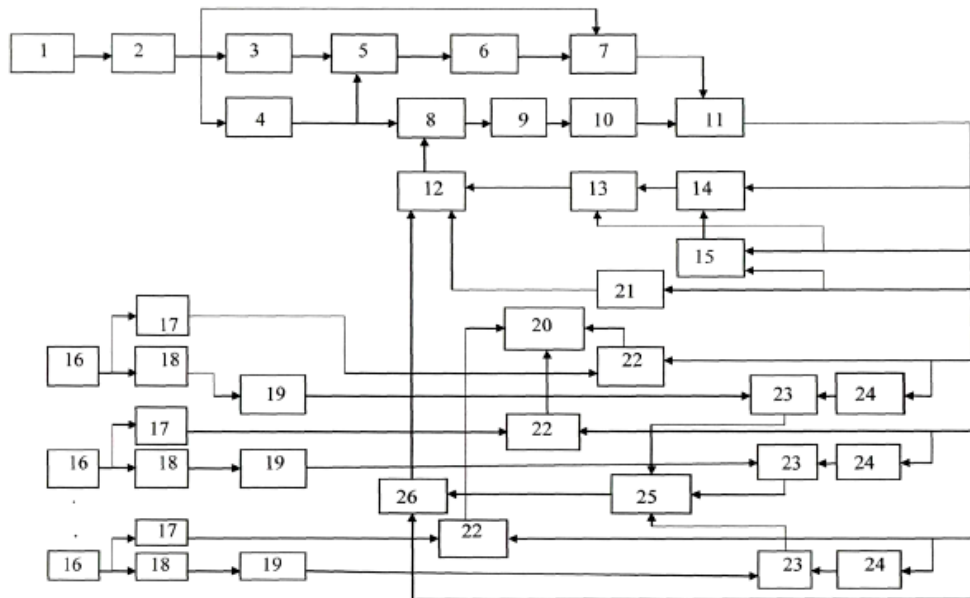
50 підсилювачі і такі операції виконують протягом тривалого часу для багатьох реалізацій випадкового сигналу, шуми накопичують і після цього спектроаналізатором визначають спектральну щільність потужності накопичених реалізацій, ділять в подільнику сигнал з виходу датчика тиску на корінь з спектральної щільності і визначають імпульсну характеристику вимірювального каналу тиску, який **відрізняється** тим, що при визначенні імпульсної

55 характеристики вимірювального каналу тиску в умовах нелінійного спотворення його функції перетворення порівнюють в компараторі виміряний сигнал з виходу датчика тиску з теоретичним сигналом, який формують послідовно з'єднаними віртуальним лінійним інерційним та віртуальним нелінійним неінерційним блоками, і при цьому вихідний сигнал лінійного інерційного блока представляють у вигляді суми добутків невідомих коефіцієнтів ряду на відомі

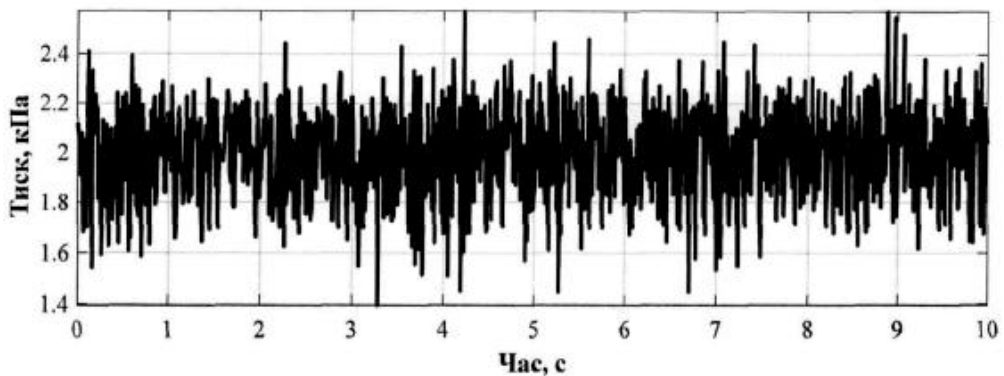
ортогональні сигнали, що формують за допомогою генераторів ортогональних сигналів, і далі піддають цей сигнал нелінійному перетворенню у підсилювачі з регульованою нелінійною функцією перетворення у вигляді поліноміальної залежності з наперед невідомими коефіцієнтами поліному, знаходять в квадраторі квадрат різниці між вимірним і теоретичним сигналами, інтегрують його в інтеграторі і цим визначають відстань між цими сигналами у функціональному просторі з квадратичною метрикою, яку мінімізують алгоритмом глобального випадкового пошуку шляхом змінювання коефіцієнтів ряду та коефіцієнтів поліному, і визначені при цьому коефіцієнти ряду використовують для оцінювання вихідного сигналу лінійного інерційного блока, який ділять в подільнику на корінь з спектральної щільності потужності шуму і отримують імпульсну характеристику вимірювального каналу тиску.



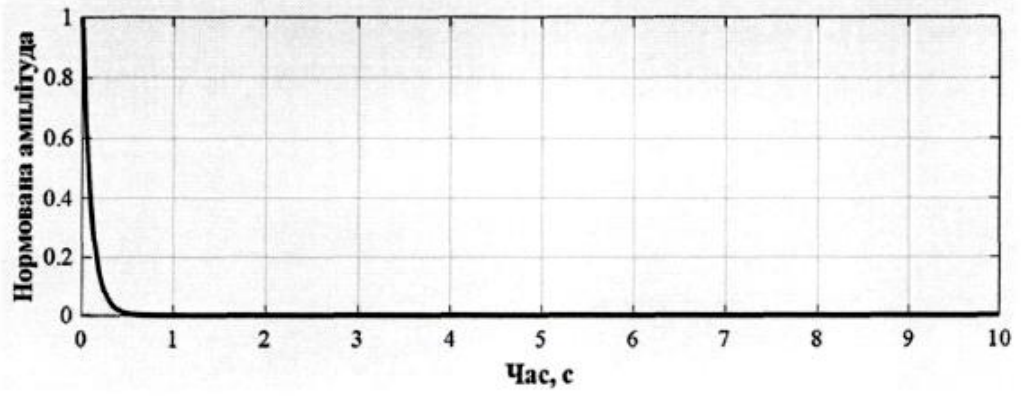
Фіг. 1



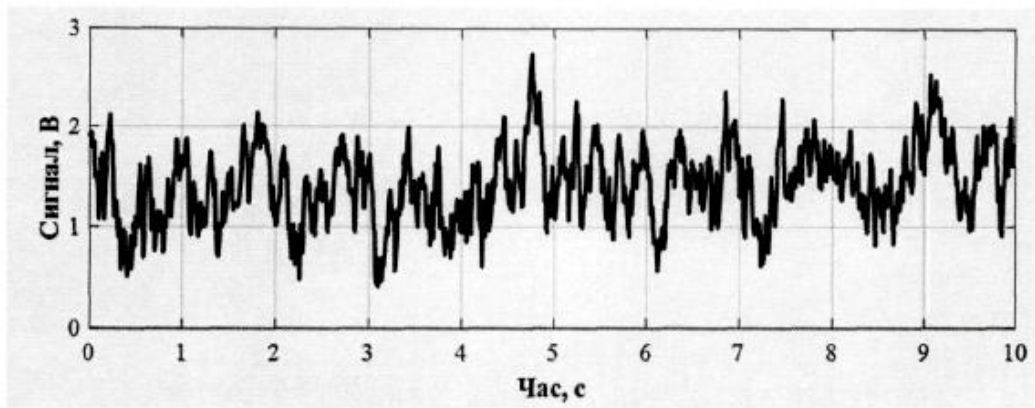
Фіг. 2



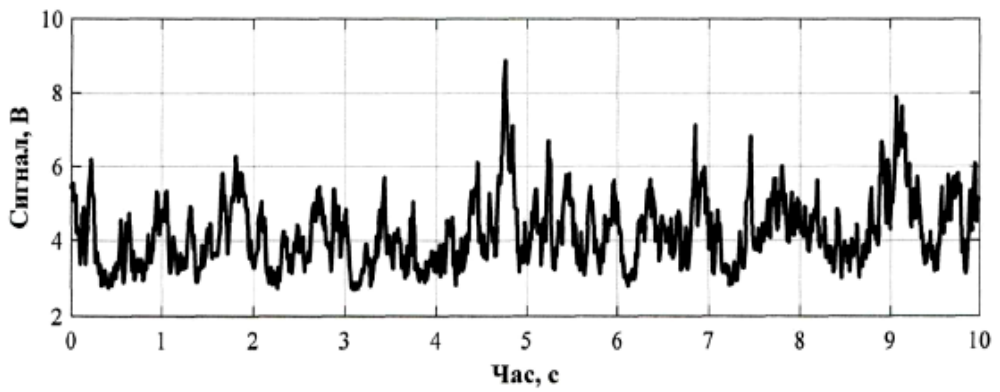
Фіг. 3



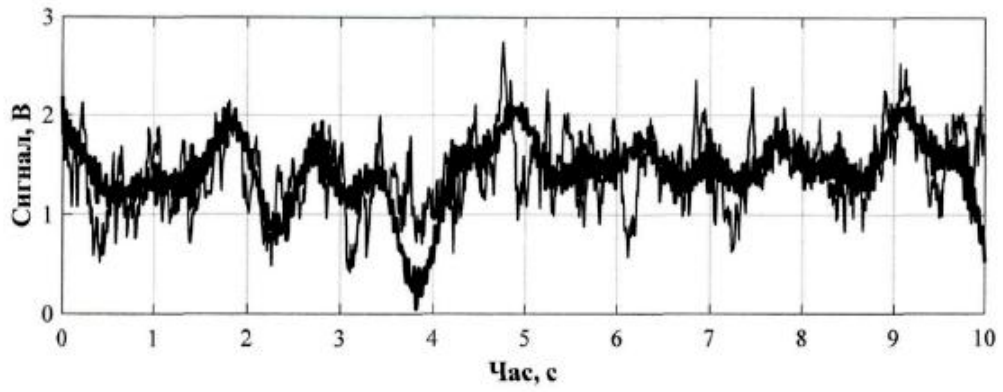
Фіг. 4



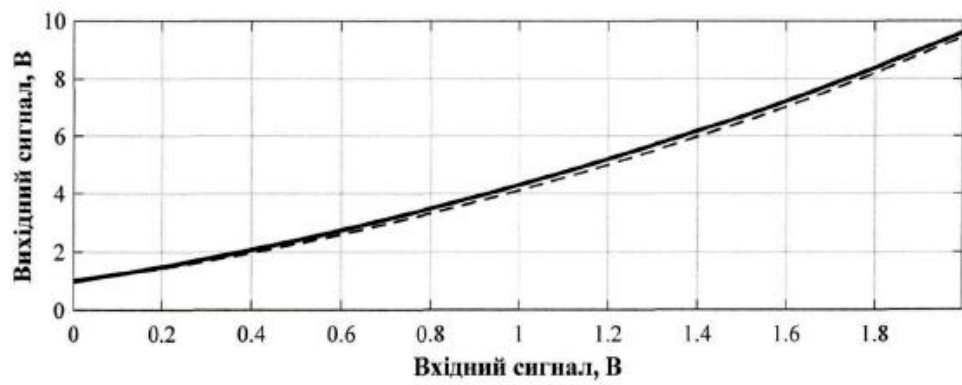
Фіг. 5



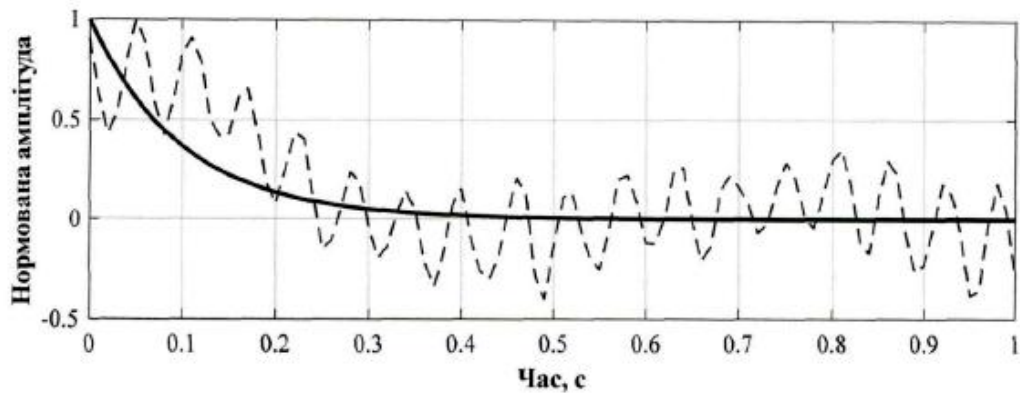
Фіг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9

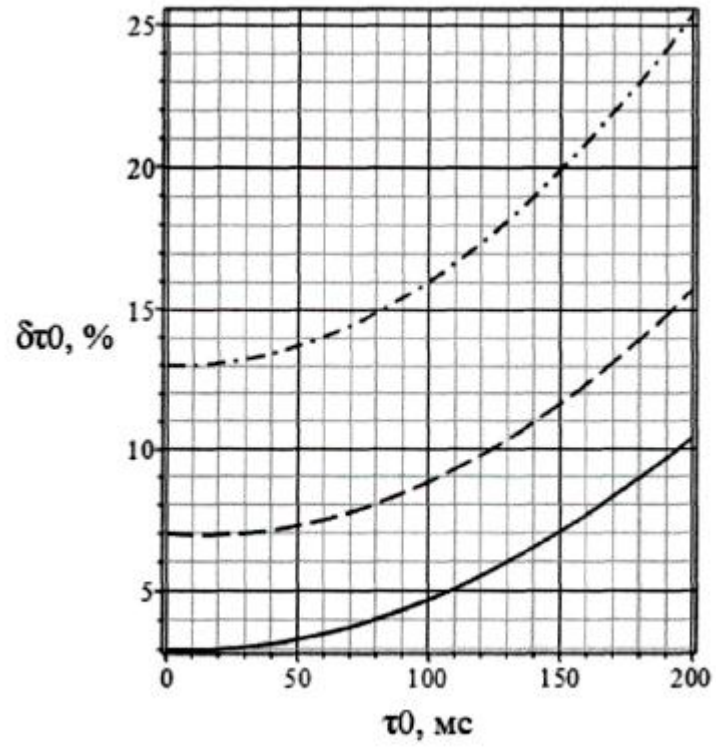


Fig. 10