



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **125893** (13) **U**
(51) МПК (2018.01)
G01D 21/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2018 00122</p> <p>(22) Дата подання заявки: 03.01.2018</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.05.2018</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.05.2018, Бюл.№ 10</p>	<p>(72) Винахідник(и): Полярус Олександр Васильович (UA), Поляков Євген Олександрович (UA), Бровко Яна Сергіївна (UA)</p> <p>(73) Власник(и): 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), Бровко Яна Сергіївна, вул. Маршала Батицького, 20, кв. 259, 260, м. Харків, 61038 (UA)</p>
--	--

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВХІДНОЇ ДІЇ НЕЛІНІЙНОГО ІНЕРЦІЙНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ

(57) Реферат:

Спосіб відновлення сигналу на вході нелінійного інерційного вимірювального каналу, що математично представляють як послідовне з'єднання нелінійного неінерційного та лінійного інерційного блоків, полягає в тому, що вимірюють вихідний сигнал каналу, подають його на перший суматор, на другий вхід якого направляють теоретичний сигнал, що утворюють шляхом складання n парціальних сигналів в другому суматорі, кожний з яких отримують як добуток сигналу генератора i -го ортогонального сигналу на імпульсну характеристику вимірювального каналу.

UA 125893 U

Корисна модель є загальною для різних варіантів побудови вимірювальних каналів. Її відносять до обернених задач вимірювання і можуть застосувати при експлуатації технічно складних об'єктів (ТСО), а також в галузях точного машинобудування для підвищення точності вимірювальної інформації.

5 Прикладом вимірювального каналу є 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 інших чинників статичні і динамічні характеристики ВКТ змінюються і можуть спотворювати вимірювальну інформацію про тиск технологічного процесу. Це накладає жорсткі вимоги щодо проведення технічного обслуговування ВКТ і зокрема ВЛ. Для отримання достовірної інформації про вимірюваний параметр використовують наукові основи функціонування ВКТ у різних режимах роботи ТСО.

10 Вимірювальний канал тиску як технічна система є в загальному випадку нелінійною інерційною системою. 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 вирішення задач проходження сигналів по нелінійним інерційним системам 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 - P. 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. [1. Хашемиан Х.М. Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях / Х.М. Хашемиан. - М.: Издательство Бином, 2012. - 354 с.; 2. Хашемиан Х.М. Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности / Х.М. Хашемиан. - М.: Издательство Бином, 2008. - 336 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.

35 За найближчий аналог вибрано [Патент 95482 Україна, МПК G01D 21/00. Спосіб відновлення сигналу на вході датчика в умовах завод / О.В. Полярус, Є.О. Поляков, А.О. Коваль; власники: Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т, О.В. Полярус, Є.О. Поляков, А.О. Коваль. - № 201407577; заявл. 07.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24. - 4 с.]. Даний метод не потребує повної інформації про імпульсну характеристику каналу (або датчика). Для відновлення вхідної дії каналу (в математичному вигляді) достатньо мати уяву про загальний вигляд його імпульсної характеристики, яка описується математичною функцією з деякими невідомими коефіцієнтами.

40 Недоліком найближчого аналога 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 нелійними 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 випливає можливість прийняття неправильних висновків при експлуатації та діагностиці стану технічного об'єкту, що може привести до небажаних наслідків. Для усунення таких сценаріїв необхідно користуватись достовірними моделями вимірювальних каналів.

45 Найбільш відомою моделлю, що може використовуватись при аналізі ДХ вимірювальних каналів тиску, є модель Гаммерштейна [Jozef Vörös. An iterative method for Hammerstein - Wiener systems parameter identification. - Journal of electrical engineering, 2004, Vol. 55, № 11-12. - P. 328...331] (фіг. 1), коли модель каналу представляють у вигляді послідовно з'єднаних моделей нелінійного неінерційного та лінійного інерційного блоків (фіг. 1).

50 Зазначений найближчий аналог є складовою запропонованого методу відновлення сигналу на вході ВКТ. Високі якісні показники цієї моделі неодноразово перевірені теоретично і експериментально для випадків, коли вхідний сигнал є відомим. Однак, в світі відсутні будь-які наукові роботи, в яких би були розроблені способи відновлення вхідного сигналу на вході

нелінійного інерційного каналу. Для прийняття рішення про стан ТСО необхідно мати інформацію про вхідний сигнал (вхідну дію), а не вихідний, оскільки характеристики останнього в загальному випадку відрізняються від характеристик вхідного сигналу. Задачею корисної моделі є підвищення точності відновлення вхідних дій у випадках, коли вимірювальний канал має нелінійну функцію перетворення.

Суть корисної моделі. Для вирішення поставленої задачі, згідно з корисною моделлю, достатньо мати повну інформацію про вихідний сигнал в математичному вигляді та нелінійну функцію перетворення каналу. На першому етапі в найближчому аналозі визначають сигнал на вході лінійного інерційного блока. Для цього за допомогою глобальних методів випадкового пошуку мінімізують функціонал (1), що являє собою інтеграл від квадрату різниці між вимірним (а значить, відомим) вихідним сигналом $y(t)$ лінійного інерційного блока та теоретичним вихідним сигналом цього блока, який описується сумою в (1)

$$J(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) = \int_{-\infty}^{\infty} [y(t) - \sum_{i=1}^n \gamma_i \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) \cdot \psi_i(\tau) d\tau - n(t)]^2 dt, \quad (1)$$

де $h(t-\tau)$ - імпульсна характеристика лінійного інерційного блока, $\psi_i(\tau)$ - ортогональний сигнал з номером i та нормованою амплітудою, що дорівнює одиниці, γ_i ($i=1,2,\dots,n$) - випадкові коефіцієнти, які для кожної реалізації випадкового сигналу будуть в загальному випадку різними. В формулу (1) входять також білі гауссівські шуми $n(t)$, які задаються при моделюванні або створюються при технічному впровадженні системи за схемою (1). В функціоналі, що розглядається, приведені розкладання в ряд Карунена - Лоева

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot \psi_i(t) = x(t), \quad (2)$$

де $x(t)$ - вихідний сигнал нелінійного неінерційного блока або вхідний сигнал лінійного інерційного блока, який визначається в процесі мінімізації функціоналу (1), що залежить від n змінних γ_i . Оскільки ортогональні сигнали $\psi_i(t)$ є відомими, то для визначення сигналу $x(t)$, як впливає з (2), достатньо розрахувати коефіцієнти γ_i . Вони визначаються при роботі алгоритму випадкового пошуку глобального мінімуму функціоналу (1). Найбільш поширеним алгоритмом такого пошуку є генетичний алгоритм, структура і робота якого описана в багатьох книжках, а програмно він реалізований, зокрема, в математичному пакеті Matlab. Отже, в результаті мінімізації функціоналу (1) отримують всі коефіцієнти γ_i , а, значить, і вхідний сигнал $x(t)$ лінійного інерційного блока [Полярус О.В., Поляков Є.О. Наближене розв'язання оберненої задачі вимірювань та його метрологічне забезпечення: монографія / О.В. Полярус, Є.О. Поляков. - Х.: Видавництво "Лідер", 2014. - 120 с.]. Цей сигнал, згідно з моделлю Гаммерштейна (фіг. 1), є вихідним сигналом нелінійного неінерційного блока. На фіг. 2 зображена існуюча схема реалізації процесу визначення вхідного сигналу $x(t)$ (фіг. 1), що описаний формулою (1), на якій позначені: 1 - імпульсна характеристика лінійного інерційного блока, 2 - генератори ортогональних сигналів, 3 - підсилювачі напруги, 4 - інвертор, 5 - квадратор, 6 - перший блок випадкового пошуку глобального мінімуму.

Для формування ортогональних сигналів $\psi_i(t)$ використовують генератори 2. Наприклад, якщо ортогональними сигналами є гармонічні сигнали, то як генератори можуть застосовуватися генератори синусоїдальних сигналів з частотами від декількох мГц до одиниць або десятків МГц. Взагалі, генератори можуть створювати сигнали різної форми, що описано наприклад в [Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов / В.П. Дьяконов. - М.: ДМК Пресс, 2009. - 384 с., ил.]. В заявленому способі використовуються гармонічні ортогональні сигнали різної частоти, які створюються n генераторами сигналів кратних частот. Ці сигнали подають на відповідні перемножувачі сигналу кожного генератора на імпульсну характеристику лінійного інерційного блока 1. Далі вихідний сигнал кожного перемножувача $u(t,\tau)$ направляють на підсилювач напруги 3. В кожному парціальному каналі підсилювач має свій коефіцієнт підсилення, який дорівнює γ_i , тобто коефіцієнта, на який помножують ортогональний сигнал при розкладанні в ряд Карунена - Лоева. Спочатку коефіцієнти підсилення є довільними, а потім починають підстроюватись в результаті роботи генетичного алгоритму при мінімізації функціоналу (1). Вихідні сигнали $U(t,\tau)$ в кожному з n парціальних каналів інтегрують в перших

інтеграторах на інтервалі спостереження сигналу, а потім вони $(Y(t))$ надходять на перший суматор, де сума всіх парціальних сигналів $y_{\text{розр}}(t)$ проходить через інвертор 4 на другий суматор, на інший вхід якого надходить вимірний сигнал $y(t)$. Різницю між цими сигналами $\Delta y(t)$ помножують саму на себе або, що є одним і тим же, зводять до квадрату в квадраторі 5,

5 $\Delta y^2(t)$ інтегрують в другому інтеграторі і подають $\int \Delta y^2(t) dt$ на перший блок пошуку глобального мінімуму 6. Цей блок в результаті оптимізації (1) формує задані значення коефіцієнтів ряду Карунена - Лоева $\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n$, тобто встановлює розраховані коефіцієнти підсилення в кожному підсилювачі парціального каналу. При перемноженні відповідного коефіцієнта підсилення $\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n$ на відповідний ортогональний сигнал $\psi_1(\tau), \psi_2(\tau) \dots \psi_n(\tau)$ і сумування цих добутоків

10 отримують вхідний сигнал лінійного інерційного блока.

Опишемо суть заявленого способу. Задачею запропонованого способу є визначення сигналу на вході нелінійного неінерційного блока при наявності відомого вихідного сигналу цього блока, який визначається способом, що описаний в найближчому аналогу. Це забезпечує підвищення точності вимірювань вимірювальним каналом. Математична модель нелінійного

15 неінерційного блока вважається відомою, оскільки її можна визначити в процесі статичних випробувань каналу, тобто в процесі ідентифікації, коли на вхід блока подають відому вхідну дію, наприклад тиск, а на виході вимірюють сигнал.

Невідому вхідну дію, наприклад тиск $p(t)$ представляють у математичному вигляді при відомій функції перетворення нелінійної ланки ВКТ, яку описують поліномом

20
$$x(t) = a_0 + a_1 p(t) + a_2 p^2(t) + \dots + a_{n-1} p^{n-1}(t). \quad (3)$$

В формулі (3) a_i ($i=0, \dots, n-1$) відомі коефіцієнти нелінійної функції перетворення вимірювального каналу, наприклад ВКТ. Отже, необхідно визначити вхідну дію, тобто тиск $p(t)$ в математичному вигляді. В принципі, можливе відтворення реального тиску і в фізичному вигляді, але для цього потрібно перетворити відновлений в процесі розв'язання оберненої

25 задачі сигнал в реальний тиск, що досягається в процесі застосуванні простої гідравлічної системи з попереднім перетворенням напруги в хід поршня. Для завдань прийняття рішень по вимірному сигналу достатньо визначити вхідний сигнал каналу у вигляді напруги, що змінюється, і яка легко представляється в математичному вигляді. З метою ілюстрації роботи

30 запропонованого способу обмежимося невеликою кількістю коефіцієнтів a_i (два) і тоді з (3) отримуємо

$$x(t) = a_0 + a_1 p(t) + a_2 p^2(t). \quad (4)$$

Розкладають вже відому функцію $x(t)$ в ряд Карунена-Лоева

$$x(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \gamma_i \psi_i(t), \quad (5)$$

де ψ_i - вибрані дослідником ортогональні функції, γ_i - відомі коефіцієнти, що були раніше

35 визначені першим блоком пошуку глобального екстремуму функціоналу (1).

Невідому реалізацію вхідної дії $p(t)$ також розкладають в ряд Карунена-Лоева

$$p(t) = \sum_{k=0}^{m-1} \beta_k \psi_k(t), \quad (6)$$

де $\psi_k(t)$ - ті ж самі ортогональні відомі функції, але тепер β_k - невідомі випадкові

40 коефіцієнти і для кожної реалізації вхідної дії $p(t)$ як випадкового процесу вони будуть в загальному випадку відрізнятись.

Кількість коефіцієнтів γ_i та β_k залежить від форми функцій $x(t)$ та $p(t)$ і повинна бути однаковою, тобто $m=n$. Вона вибирається дослідником на основі вибраної точності представлення функції.

В формулу (4) підставляють співвідношення (5) і (6)

$$\sum_{i=0}^{n-1} \gamma_i \psi_i(t) = a_0 + a_1 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i \psi_i(t) + a_2 \cdot \left(\sum_{i=0}^{n-1} \beta_i \psi_i(t) \right)^2, \quad (7)$$

Співвідношення (7) приводять у розгорнутому вигляді

$$\begin{aligned} \gamma_0 + \gamma_1 \psi_1(t) + \gamma_2 \psi_2(t) + \dots + \gamma_{n-1} \psi_{n-1}(t) &= a_0 + a_1 \beta_0(t) + a_1 \beta_1 \psi_1(t) + \\ &+ a_1 \beta_2 \psi_2(t) + \dots + a_1 \beta_{n-1} \psi_{n-1}(t) + a_2 \beta_0^2 + a_2 \beta_1^2 \psi_1^2(t) + a_2 \beta_2^2 \psi_2^2(t) + \dots \\ &\dots + a_2 \beta_{n-1}^2 + \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{m=0}^{m-1} a_2 \beta_i \beta_k \psi_i(t) \psi_k(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Для спрощення виразу (8) проводять інтегрування його на інтервалі спостереження $[0, T]$. В

5 силу ортогональності функції $\psi_i(t)$ та $\psi_k(t)$

$$\int_0^T \psi_i(t) \psi_k(t) dt \approx 0. \quad (i \neq k) \quad (9)$$

Знак " \approx " замість знаку " $=$ " записаний тому, що межа інтегралу в (9) становить T , а не " ∞ ". З урахуванням інтегрування вираз (8) трансформують до вигляду

$$\begin{aligned} \int_0^T \gamma_0 dt + \gamma_1 \int_0^T \psi_1(t) dt + \gamma_2 \int_0^T \psi_2(t) dt + \dots + \gamma_{n-1} \int_0^T \psi_{n-1}(t) dt &= \\ = \int_0^T a_0 dt + \int_0^T a_1 \beta_0 dt + a_1 \beta_1 \int_0^T \psi_1(t) dt + a_2 \beta_2 \int_0^T \psi_2(t) dt + \dots \\ + a_1 \beta_{n-1} \int_0^T \psi_{n-1} dt + \int_0^T a_2 \beta_0^2 dt + a_2 \beta_1^2 \int_0^T \psi_1^2(t) dt + \\ + a_2 \beta_2^2 \int_0^T \psi_2^2(t) dt + \dots + a_2 \beta_{n-1}^2 \int_0^T \psi_{n-1}^2(t) dt. \end{aligned} \quad (10).$$

10 Вводять позначення:

$$\begin{aligned} C_i &= \int_0^T \psi_i(t) dt, \\ d_i &= \int_0^T \psi_i^2(t) dt, \end{aligned} \quad (11)$$

Коефіцієнти C_i , d_i , після інтегрування по формулам (11) є відомими. З урахуванням (11) співвідношення (10) записують у вигляді

$$\begin{aligned} \gamma_0 T + \gamma_1 C_1 + \gamma_2 C_2 + \dots + \gamma_{n-1} C_{n-1} &= a_0 T + a_1 \beta_0 T + \\ + a_1 \beta_1 C_1 + a_1 \beta_2 C_2 + \dots + a_1 \beta_{n-1} C_{n-1} + a_0 \beta_0 T + \\ + a_2 \beta_1^2 d_1 + a_2 \beta_2^2 d_2 + \dots + a_2 \beta_{n-1}^2 d_{n-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

15

В співвідношенні (12) невідомими є наступні коефіцієнти:

$$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}. \quad (13)$$

Ліва частина рівності (12) є повністю відомою. Тоді задача визначення коефіцієнтів (13) зводиться до мінімізації цільової функції багатьох (в даному випадку n) змінних, тобто різниці між лівою та правою частин рівняння (12)

20

$$\begin{aligned} f(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}) &= \gamma_0 T + \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i C_i - \\ &- (a_0 + a_1 \beta_0) - a_1 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i C_i - a_2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i^2 C_i. \end{aligned} \quad (14)$$

Мінімізацію (14) проводять за допомогою алгоритму глобального випадкового пошуку екстремуму (генетичного алгоритму). В результаті визначають всі коефіцієнти (13), а, значить, і вхідний сигнал (6).

25

Описані формули демонструють математичні операції, які проводять при реалізації запропонованого способу. В реальному часі неможливо побудувати пристрою визначення вхідного сигналу вимірювального каналу, внаслідок того, що така операція повинна проходити в оберненому часі (вхідний сигнал уже приходив на вхід системи, пройшов вимірювальний канал, спотворився і по вихідному сигналу треба відновити реалізацію вхідного випадкового сигналу, якої більше ніколи не буде). Ось чому в запропонованому способі реалізують пристрій, який

30

фізично відтворює математичні операції, а в кінцевому результаті відтворить реалізацію вхідного сигналу, що вже раніше була на вході каналу. Час затримки між реальним вхідним сигналом та відтвореним дорівнює часу проходження сигналу по вимірювальному каналу, часу обробки при проведенні вимірювальних операцій, а найбільший внесок в цей час вносять операції з пошуку глобального екстремуму при роботі генетичного алгоритму. Сумарний час затримки найчастіше може досягати десятки секунд або декілька хвилин.

На фіг. 3 зображена схема роботи технічного пристрою, з допомогою якого визначають реалізацію вхідного сигналу, на якій позначені: 7 - підсилювачі напруги, 8 - пристрій для піднесення до ступеня, 9 - підсилювачі напруги, 10 - генератор постійної напруги, 11 - інвертор, 12 - блок випадкового пошуку глобального екстремуму.

Для визначення реалізації вхідного сигналу, що ґрунтується на операціях, описаних формулами (3)...(14) перемножують ортогональні сигнали ψ_i генераторів 2 на коефіцієнти γ_i ряду Карунена-Лоева, реалізуючи при цьому співвідношення (5). Зазначені коефіцієнти подають у вигляді напруги з відповідних підсилювачів 3 з коефіцієнтами підсилення γ_i . Вихідні сигнали перемножувачів $X_i(t)$ подають на третій суматор, на виході якого формується сигнал $x(t)$, який використовується в співвідношенні (7). Для формування інших членів формули (7) вихідні сигнали генераторів ортогональних сигналів $\psi_1(\tau)$, $\psi_2(\tau)$... $\psi_n(\tau)$ відправляють на відповідні підсилювачі 7 з коефіцієнтами підсилення β_k , ($k=0,1,2,\dots,n-1$). На першому етапі роботи пристрою коефіцієнти підсилення β_k можуть бути довільними. Вихідні сигнали всіх підсилювачів направляють на четвертий суматор, після якого формується сигнал (6), який після виконання всіх операцій, що описані в формулах (8)...(14), перетворюється у вхідний сигнал $p(t)$. Для цього

з виходу четвертого суматора сигнал $\sum_{k=0}^{m-1} \beta_k \psi_k(t)$ безпосередньо подають на підсилювач з

коефіцієнтом підсилення a_1 , а також на інші підсилювачі 9, але після зведення в різні степені: на підсилювач з коефіцієнтом підсилення a_2 цей сигнал зводять в квадрат, тобто множать сам на себе, на підсилювач з коефіцієнтом підсилення a_3 сигнал зводиться до третього степеню і т. д. (за допомогою пристрою для піднесення до ступеня 8), як показано на фіг. 3. Вихідні сигнали всіх зазначених підсилювачів подають на п'ятий суматор. На один з входів цього суматора

підводять також постійну напругу з генератора 10 величиною a_0 , яка описує постійну складову функції перетворення нелінійного блока. Вихідний сигнал п'ятого суматора $x_{\text{розр}}(t)$ подають через інвертор ($x_{\text{розр}}'(t)$) на перший вхід четвертого суматора, а на його другий вхід сигнал з виходу третього суматора. Вихідний сигнал п'ятого суматора $\Delta x(t)$ спрямовують на третій

інтегратор, де здійснюється його інтегрування на інтервалі спостереження $\left(\int \Delta x(t) dt\right)$ з метою позбавлення від добуток ортогональних сигналів з різними номерами і спрощення оптимізаційної задачі. Після третього інтегратора сигнал подають на другий блок випадкового пошуку глобального екстремуму багатомірної функції (14), де в результаті роботи генетичного алгоритму отримують коефіцієнти β_k , які спрямовують для встановлення коефіцієнтів підсилення величиною β_k у відповідних підсилювачах. Внаслідок цього згідно з формулою (6) на виході п'ятого суматора отримують шуканий вхідний сигнал $p(t)$.

Для перевірки достовірності отриманих результатів на вхід системи (фіг. 1) подають характерні вхідні дії: гармонічні сигнали (синусоїди, сума синусоїд, гармонічні сигнали з адитивним білим гауссівським шумом), а також реальні реалізації випадкових процесів, які взяті з експериментів (без значних аномальних відхилень, що притаманні технологічним процесам на реальних технічно складних об'єктах).

В результаті моделювання отримують сигнали $x(t)$ та $y(t)$ для наперед відомих коефіцієнтів a_0 , a_1 , a_2 .

Після застосування запропонованого способу здійснюють порівняння отриманої реалізації випадкового вхідного сигналу з заданою до моделювання. Задана реалізація вхідного сигналу є

аналогом тестового сигналу і на основі цього отримують похибки відновлення вхідного сигналу і оцінюють ефективність запропонованого способу.

Аналогічне моделювання можна провести для вимірвальних систем з кубічною нелінійністю та з нелінійностями інших порядків.

5 При моделюванні розраховувався коефіцієнт кореляції між заданим сигналом на вході нелінійної неінерційної ланки і відновленим сигналом на вході цієї ланки запропонованим методом. Об'єм вибірки становив 1000. Середнє значення отриманої вибірки коефіцієнтів кореляції склало близько 0,90 для простих сигналів, а для реальних експериментальних реалізацій тиску коефіцієнт кореляції був менше.

10 Спосіб дає можливість відновити частину втраченої вимірвальної інформації, тобто підвищити точність вимірювань і має порівняно з існуючим способом більшу точність щодо нелінійних вимірвальних каналів. Порівняння проводять з випадком, коли для визначення реалізації вхідного сигналу використовується найближчий аналог, тобто у вимірвальному каналі не враховується нелінійність його функції перетворення. Якщо ця функція має складний характер (описується поліномом високої степені), то виграш у відносній точності відновлення вхідного сигналу досягає десятків відсотків. Якщо нелінійність вимірвального каналу описується простою функцією, наприклад експоненціальною, то цей виграш коливається в межах від одиниць до десятка відсотків. Одночасно на ці показники впливає інерційність каналу, яка описувалась постійною часу каналу і становила від 0,05 с до 0,3 с. При цьому враховувалось, що при великій постійній часу звужується смуга пропускання каналу, що може приводити до усунення узгодження цієї смуги пропускання з шириною спектру сигналу. При таких умовах якісне відновлення вхідного сигналу стає неможливим.

Отже, в запропонованому способі на відміну від найближчого аналогу враховується нелінійність функції перетворення вимірвального каналу, що дає можливість відновити реалізацію вхідного сигналу більш точно, а це важливо для прийняття рішень на ТСО. Для моделювання використовувалась функція перетворення нелінійного блока ВКТ, що зображена на фіг. 4. По осі абсцис відкладений тиск, а по осі ординат також тиск, хоча можливий варіант для моделі Гаммерштейна - напруга.

Для прикладу, на фіг. 5-8 наведені приклади відновлення різного виду сигналів (при постійній часу каналу $\tau=0.3$ с) за схемою, що представлена на фіг. 2, 3. На фігурах пунктирною лінією представлена реалізація вхідної дії $p(t)$, а суцільною - відновлений сигнал $p_0(t)$ нелінійної неінерційної ланки: на фіг. 5 вхідним сигналом є гармонічний сигнал (синусоїдальний), на фіг. 6 - сума двох гармонічних сигналів різної частоти, на фіг. 7 - реалізація експериментального сигналу, а на фіг. 8 - сума двох гармонічних сигналів та білого гауссівського шуму. З візуального порівняння сигналів $p(t)$ та $p_0(t)$ впливає їх схожість, про що свідчать також високі значення (близько 0,9) розрахованих коефіцієнтів кореляції. Шуми, які впливають на вхідний сигнал, у відновленому вхідному сигналі відсутні, що означає наявність у запропонованого способу фільтруючих властивостей. Це покращує умови для прийняття рішення на основі аналізу відновленого вхідного сигналу.

40 Точність відновлення реалізації вхідного сигналу оцінюють по відносному максимальному відхиленню цього сигналу від заданого (тестового) в однаковий момент часу, тобто визначають максимальну відносну похибку відновлення. На фіг. 9 зображена залежність цієї похибки від тривалості сигналу у вигляді суми двох гармонічних сигналів при $\tau=0,3$ с. Тенденція зростання похибки відновлення вхідного сигналу зі збільшенням часу спостереження обмежує тривалість сигналу, що обробляється.

На фіг 10, 11 зображені залежності похибок відновлення вхідного сигналу від відношення сигнал/шум: фіг. 10 - білий гауссівський шум на вході вимірвального каналу, а фіг. 11 на виході. З цього випливає що відносна похибка відновлення вхідного сигналу не буде перевищувати 10 %, якщо відношення сигнал/шум перевищить 20 дБ (для типового випадку, що розглядається). Якщо шум існує тільки на виході каналу, то вистачить і 10 дБ для виконання цієї умови.

При малих постійних часу вимірвального каналу (приблизно $\tau \leq 0,1$ с) відновлений сигнал практично повністю повторює заданий (тестовий) сигнал, що обумовлено відсутністю інерційності каналу, тобто відсутністю лінійного інерційного блока моделі Гаммерштейна. У цьому випадку смуга пропускання каналу є значно більшою, ніж ширина спектру сигналів, що використовуються при моделюванні.

В процесі моделювання визначені наступні фактори, що повинні бути враховані на отримання максимально достовірних даних запропонованим способом:

1. Необхідність апіорної інформації про вихідний сигнал та нелінійну функцію перетворення каналу в математичному вигляді.

2. Узгодження смуги пропускання вимірювального каналу з шириною спектру вхідного сигналу на виході нелінійного неінерційного блока, яке забезпечує найточніше відновлення реалізації вхідного сигналу, хоча відновлення сигналу можливе навіть тоді, коли ширина спектру сигналу перевищує ширину смуги пропускання вимірювального каналу, але при цьому зростають відносні похибки відновлення.

3. Зі збільшенням тривалості сигналу (часу спостереження) точність відновлення зменшується. В типових випадках час спостереження не повинен перевищувати декількох хвилин. Якщо завдання практики потребують більшого часу, то відновлення треба здійснювати на окремих часових інтервалах, що не перевищують вказані значення (фіг. 9).

4. Точність відновлення вхідного сигналу зменшується також з ростом інерційності (постійної часу) вимірювального каналу.

5. На точність відновлення вхідного сигналу впливають параметри генетичного алгоритму, який здійснює стохастичний пошук глобального екстремуму функціоналу, але це питання описано в найближчому аналогу.

6. Збільшення потужності шумів на вході вимірювального каналу приводить до зростання похибок відновлення вхідного сигналу каналу, хоча в запропонованому способі здійснюється фільтрація шумів. Шуми аналого-цифрових перетворювачів мають менший вплив на процес відновлення сигналу, ніж зовнішні шуми природного і штучного походження.

7. Результати моделювання показують високу схожість (великі коефіцієнти кореляції) відновленого і реального вхідних сигналів навіть у випадках невеликої кількості апіорних даних про вид нелінійної функції перетворення каналів. Мінімальне значення цих коефіцієнтів становить близько 0,7. Для підвищення цього значення необхідно використовувати апіорну інформацію про вид сигналу та функції перетворення каналу. Вплив різних чинників на коефіцієнти кореляції тестового і відновленого сигналів приведений в таблиці. Дані приведені для часу спостереження сигналу 100 с (зі збільшенням тривалості спостереження - точність відновлення зменшується лише для складних сигналів).

Таблиця

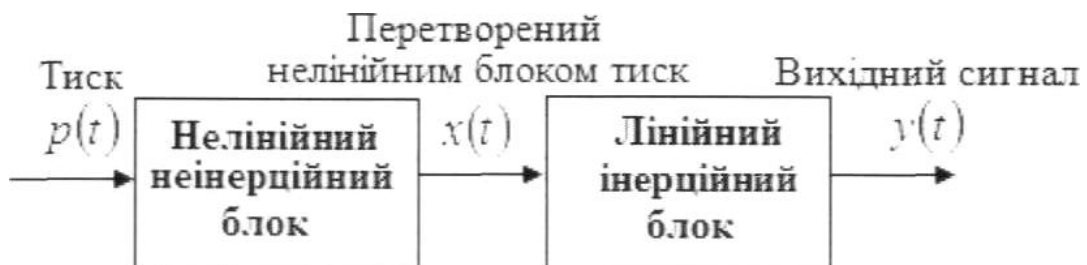
Середні значення коефіцієнтів кореляції вхідного та відновленого вхідного сигналів, що отримані запропонованим способом для різних умов експлуатації

1	2	3	4
№ з/п	Умови експлуатації	Постійна часу	Середнє значення коефіцієнта кореляції
1.	Відновлення простого сигналу з апіорною інформацією про коефіцієнти нелінійності	$\tau=0,01$	0,88
		$\tau=0,3$	0,82
2.	Відновлення простого сигналу без апіорної інформації про коефіцієнти нелінійності	$\tau=0,01$	0,69
		$\tau=0,3$	0,59
3.	Відновлення реальної реалізації сигналу з апіорною інформацією про коефіцієнти нелінійності	$\tau=0,01$	0,91
		$\tau=0,3$	0,67
4.	Відновлення реальної реалізації сигналу без апіорної інформації про коефіцієнти нелінійності	$\tau=0,01$	0,71
		$\tau=0,3$	0,47

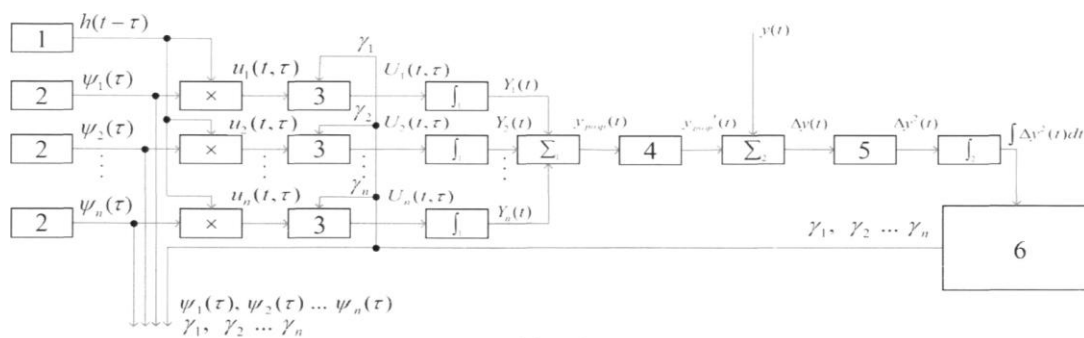
Отже, в заявленому способі визначається сигнал на вході вимірювального каналу, причому відносні похибки відновлення для зазначених умов не перевищують 10 %. На практиці рішення приймаються по вихідним сигналам каналу, а вони спотворюються при проходженні нелінійних та інерційних елементів каналу і відрізняються від вхідного сигналу. Оскільки запропонований спосіб забезпечує отримання реальної вимірювальної інформації, а не спотвореної, то виграш в точності може коливатись від декількох до десятків відсотків в залежності від типу нелінійності каналу та характеру інерційності.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

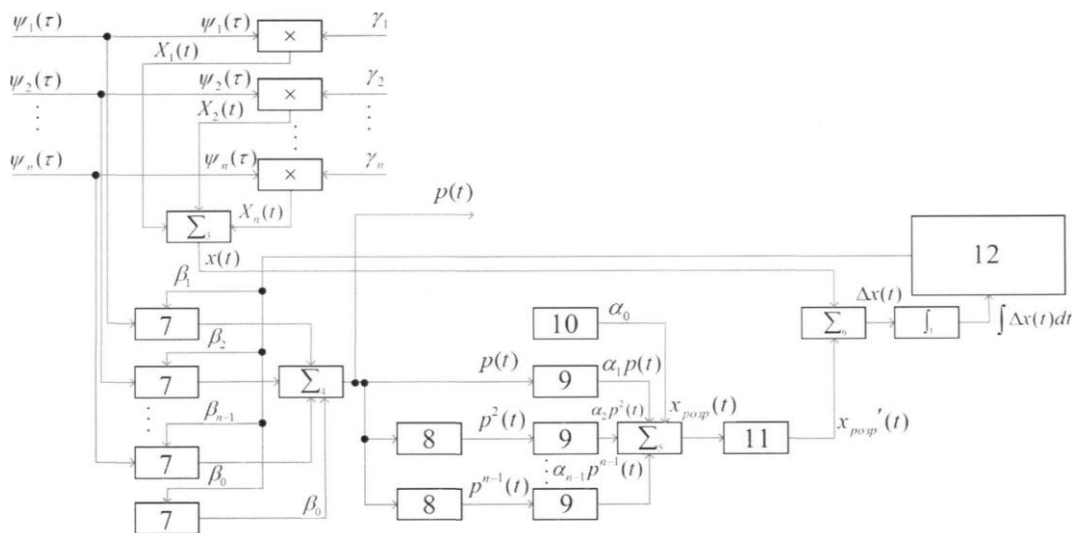
Спосіб відновлення сигналу на вході нелінійного інерційного вимірювального каналу, що математично представляють як послідовне з'єднання нелінійного неінерційного та лінійного інерційного блоків, який полягає в тому, що вимірюють вихідний сигнал каналу, подають його на перший суматор, на другий вхід якого направляють теоретичний сигнал, що утворюють шляхом складання n парціальних сигналів в другому суматорі, кожний з яких отримують як добуток сигналу генератора i -го ортогонального сигналу на імпульсну характеристику вимірювального каналу, підсилюють його в γ_i разів, інтегрують в першому інтеграторі на часовому інтервалі, що сумірний з інтервалом спостереження, після чого різницю між вихідним сигналом каналу та сумою парціальних сигналів помножують саму на себе та інтегрують в другому інтеграторі на цьому ж часовому інтервалі і подають на перший блок випадкового пошуку глобального екстремуму, після чого в цьому блоці визначають мінімум відстані у функціональному просторі між вихідним сигналом вимірювального каналу та теоретичним сигналом шляхом підбором коефіцієнтів γ_i і значення коефіцієнтів γ_i , при яких досягається зазначений мінімум, подають на підсилювачі для змінювання їх коефіцієнтів підсилення, який **відрізняється** тим, що з метою підвищення точності відновлення вхідного сигналу в нелінійному вимірювальному каналі сигнали з виходів кожного з n підсилювачів з коефіцієнтами підсилення γ_i подають на помножувач, на другий вхід якого направляють сигнал відповідного генератора j -го ортогонального сигналу, а вихідні сигнали кожного помножувача подають на третій суматор, з виходу якого сумарний сигнал, що описує вихідний сигнал нелінійного неінерційного блока, подають на вхід шостого суматора, на інший вхід якого спрямовують теоретичний сигнал нелінійного неінерційного блока, для чого з кожного j -го генератора ортогональних сигналів подають сигнал на відповідний підсилювач з коефіцієнтом підсилення β_j , вихідні сигнали підсилювачів відправляють на четвертий суматор, з виходу якого сигнал розділяють на m каналів, в нульовому каналі постійну напругу підключають до нульового входу п'ятого суматора, в першому каналі сигнал подають на підсилювач з коефіцієнтом підсилення a_1 і далі на перший вхід п'ятого суматора, в другому каналі сигнал помножують сам на себе і направляють на підсилювач з коефіцієнтом підсилення a_2 і потім на другий вхід п'ятого суматора, в третьому каналі сигнал помножують сам на себе три рази і подають його через підсилювач з коефіцієнтом підсилення a_3 на третій вхід цього суматора і т. д., а в $(n-1)$ -му каналі сигнал відповідно помножують сам на себе $n-1$ разів і через підсилювач з коефіцієнтом підсилення a_{m-1} надсилають сигнал на $n-1$ вхід п'ятого суматора, після чого вихідний сигнал цього суматора подають через інвертор на другий вхід шостого суматора, а з його виходу - на третій інтегратор, вихідний сигнал якого направляють на другий блок пошуку глобального екстремуму, який мінімізує різницю між відновленим сигналом на виході нелінійного інерційного блока та теоретичним сигналом шляхом змінювання коефіцієнтів підсилення β_j в кожному з $(n-1)$ каналів, причому після визначення глобального мінімуму цей блок визначає коефіцієнти β_j , які одночасно є коефіцієнтами розкладання ряду Карунена-Лоева вхідного сигналу вимірювального каналу, внаслідок чого сигнал на виході четвертого суматора є вхідним сигналом цього каналу.



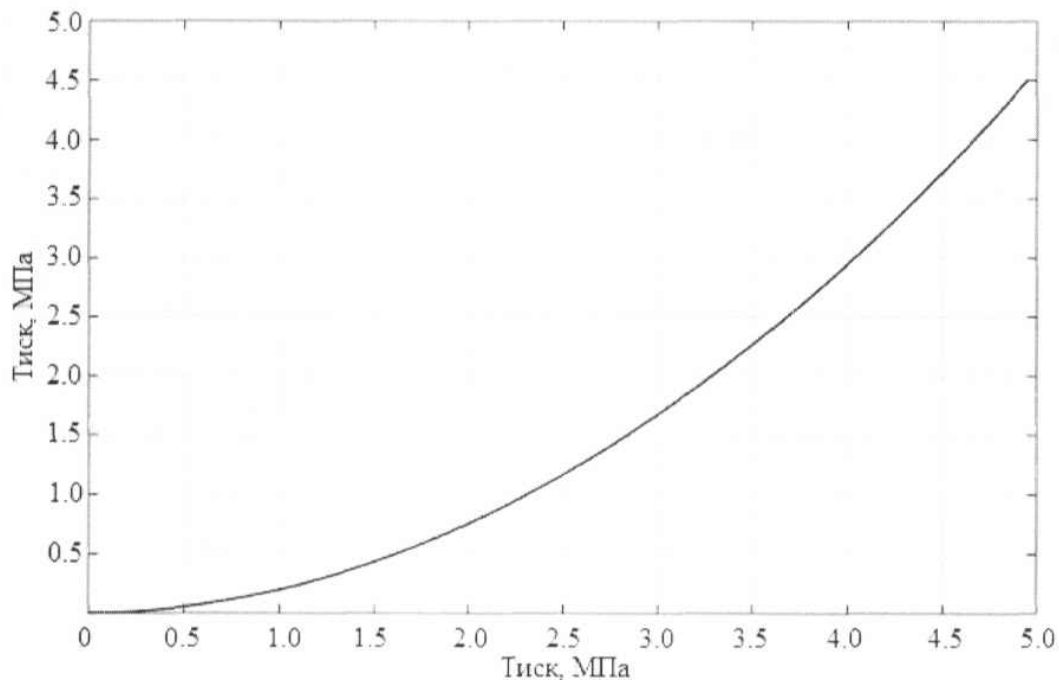
Фіг. 1



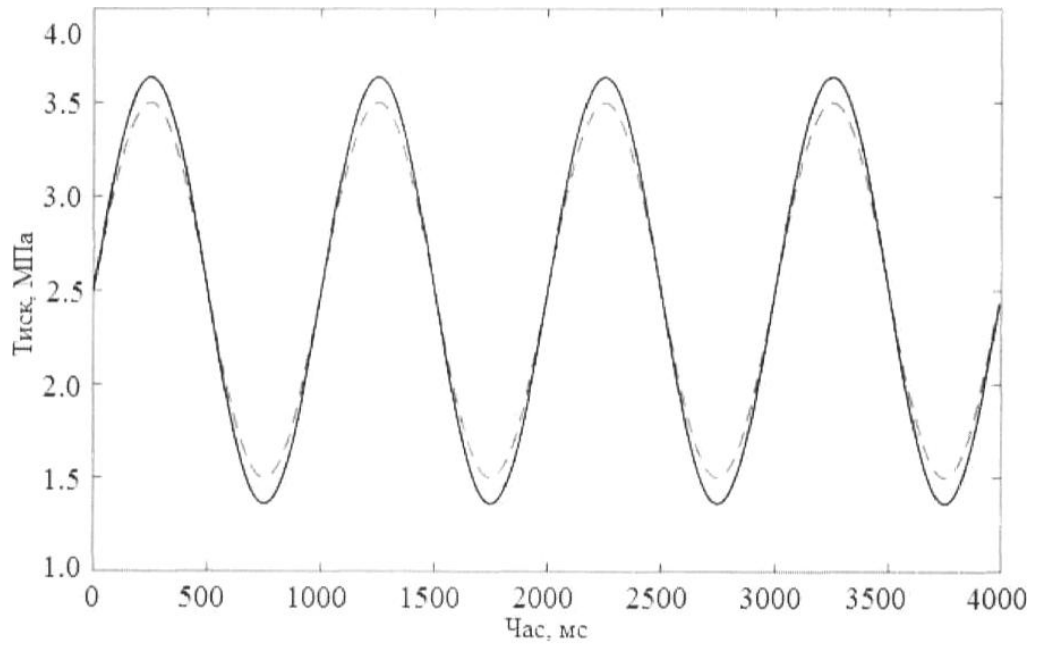
Фиг. 2



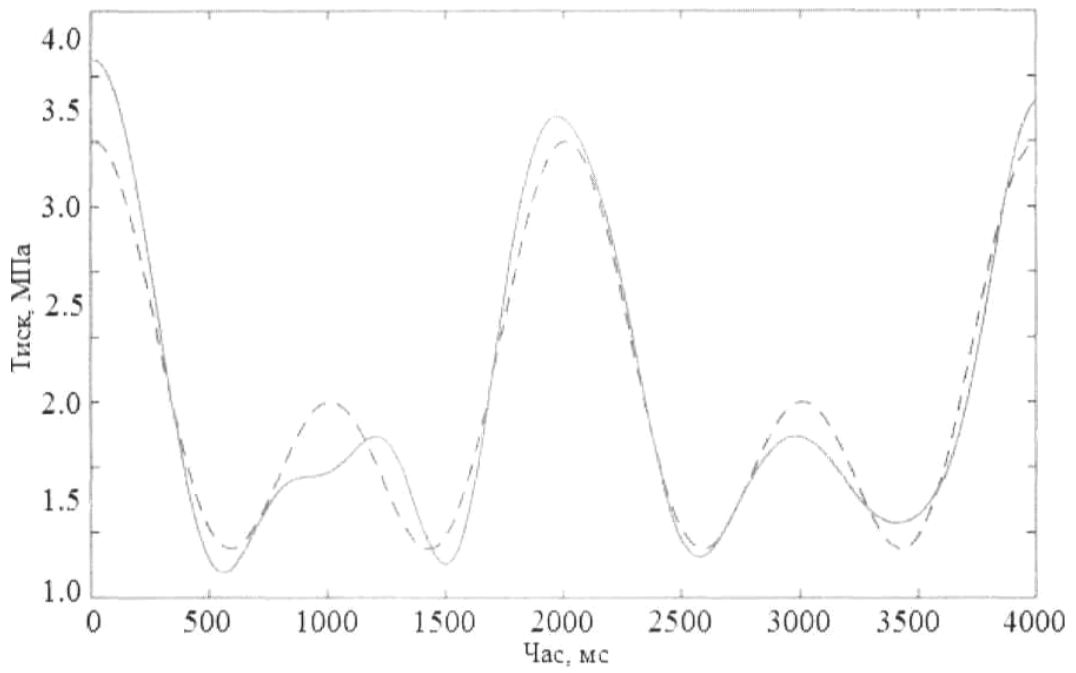
Фиг. 3



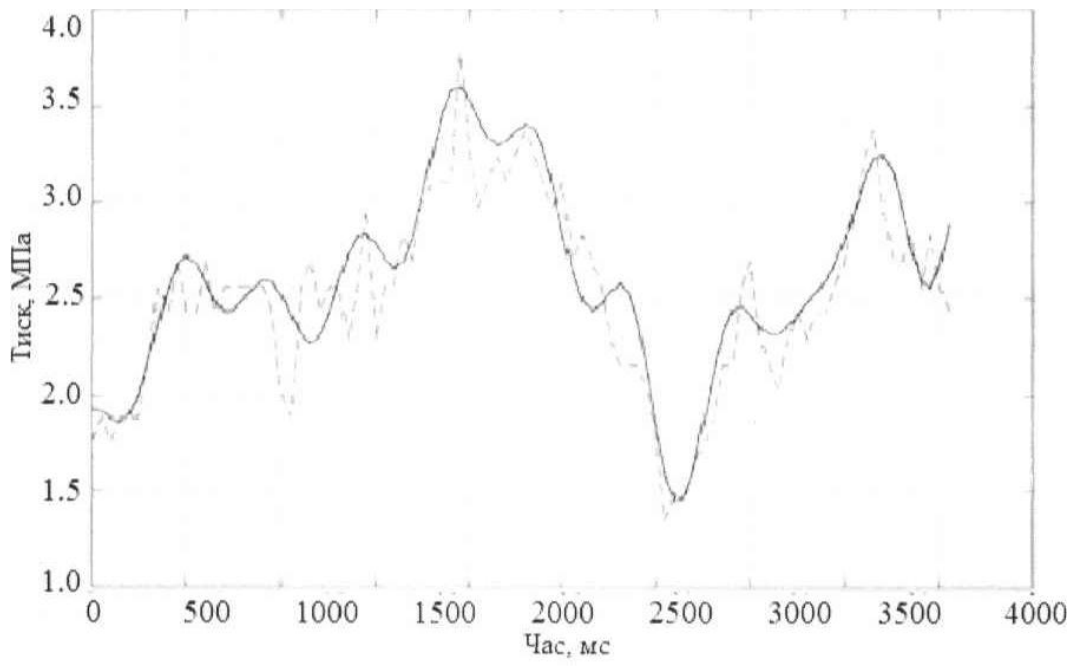
Фиг. 4



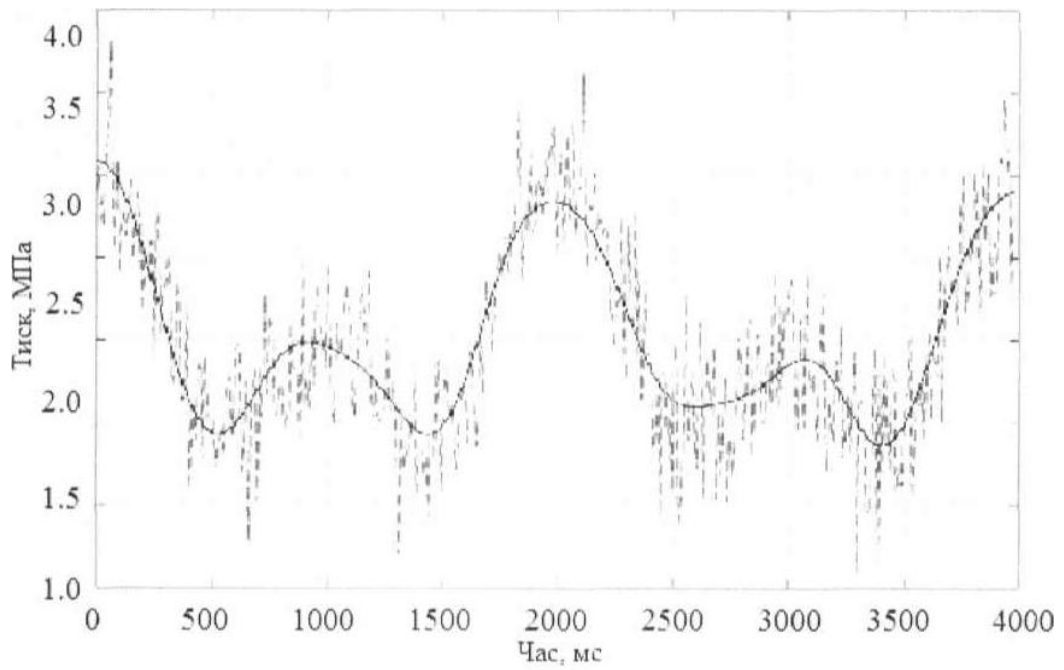
Фіг. 5



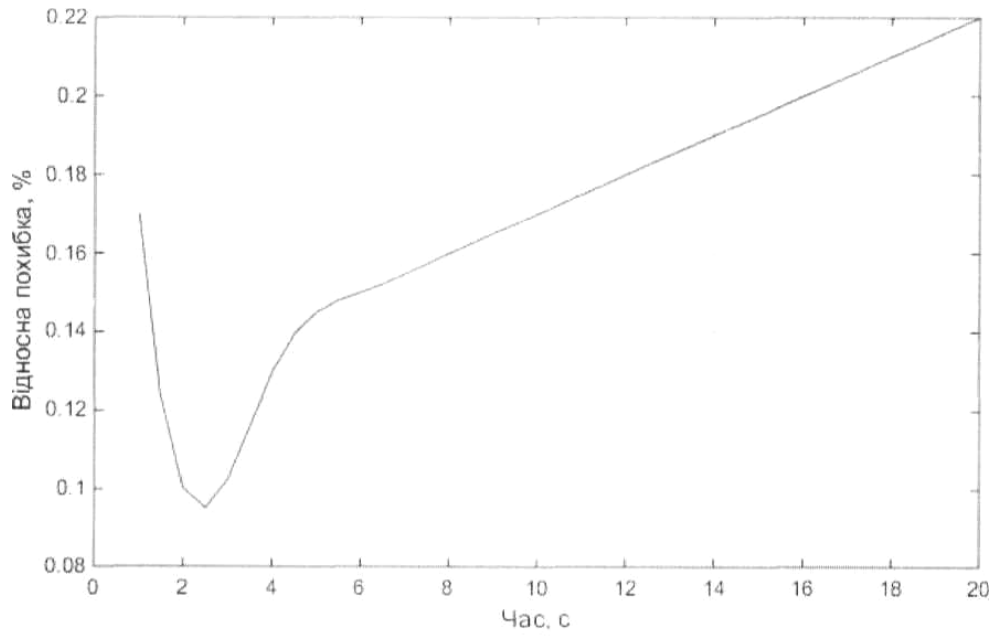
Фіг. 6



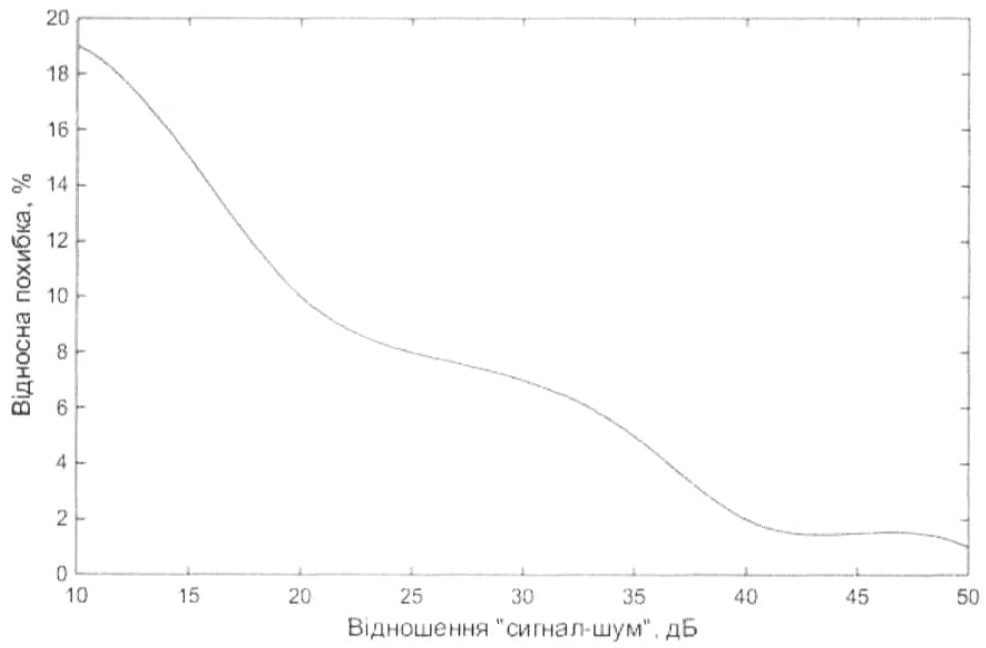
Фіг. 7



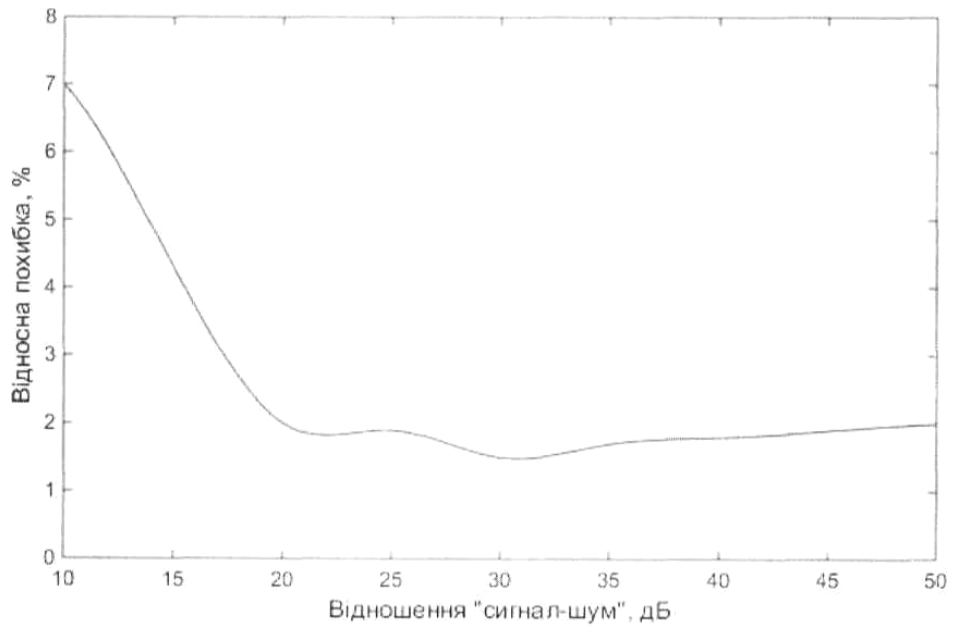
Фіг. 8



Фіг. 9



Фіг. 10



Фіг. 11

Комп'ютерна верстка О. Гергіль

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601