

Корисна модель є загальною для різних варіантів побудови багатоканальних вимірювальних інформаційних систем (БВІС). Її відносять до вимірювання параметрів динамічних систем і можуть застосувати при експлуатації технічно складних об'єктів (ТСО), вимоги до безпеки яких є високими. Як правило, БВІС складається з однієї вимірювальної лінії (ВЛ) та декількох датчиків тиску, що підключені до ВЛ та створюють канали вимірювання. Датчики можуть функціонувати на різних фізичних принципах.

Вимірювальна лінія являє собою трубопровід, що 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 БВІС змінюються і можуть значно спотворювати вимірювальну інформацію про тиск технологічного процесу. Це створює необхідність застосування жорстких вимог щодо проведення її технічного обслуговування. Вимірювальний канал тиску, що складається з ВЛ та датчика тиску, в ідеальному випадку є лінійною інерційною системою, оскільки рідина (найчастіше, вода) не стискається і без спотворень передає тиск від контрольованого обладнання ТСО до датчиків тиску, функція перетворення яких близька до лінійної. При експлуатації у рідині може з'явитись турбулентність, вода може частково забруднюватись або замерзати в локальних областях ВЛ. Як наслідок, функція перетворення вимірювального каналу тиску перетворюється з лінійної на нелінійну. Методи аналізу подібних систем є надзвичайно складними і описані в багатьох роботах. У [Спосіб визначення вхідної дії нелінійного інерційного вимірювального каналу: патент України 126403, заявка. №u201702899; заявл. 27.03.2017; опубл. 25.06.2018; Бюл. № 12. 7 с.] нелінійність та інерційність системи враховується при розв'язанні оберненої задачі вимірювань.

Якість вимірювання датчиків тиску на ТСО періодично перевіряється на стендах шляхом їх демонтажу з вимірювальної системи. Часто цей процес є високовартісним і небезпечним для здоров'я обслуговуючого персоналу. Тому на деяких сучасних ТСО починають впроваджуватися бездемонтажні методи повірки та калібрування датчиків тиску. У [Hashemian X. M. Sensor Performance and Reliability. ISA, 2005. 250 p.] та [Hashemian X. M. Maintenance of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants. Springer, 2006. 326 p.] запропоновані методи бездемонтажного калібрування датчиків тиску шляхом переривання електроживлення та аналізу гідродинамічних шумів, розроблені методи діагностики закупорки та витоків у вимірювальній лінії. Метод аналізу шумів є справедливим для лінійних систем. Для розширення меж застосування способу аналізу шумів у [Спосіб визначення імпульсної характеристики вимірювального каналу тиску: пат. 151944 Україна. №u201202107687; заявл. 28.12.2021; опубл. 05.10.2022; Бюл. № 40. 12 с.] запропоновано новий спосіб визначення імпульсної характеристики вимірювального каналу тиску в умовах нелінійного спотворення його функції перетворення.

Отже, демонтажні методи визначення стану вимірювального каналу тиску дозволяють зменшити витрати часу та економити кошти на експлуатацію, особливо, коли кількість датчиків тиску, що підключені до вимірювальної лінії, збільшується. Декілька датчиків тиску, що вимірюють параметри одного і того ж процесу, потрібні для підвищення достовірності отриманих даних про тиск. Звідси підвищується актуальність бездемонтажного контролю всіх датчиків одночасно.

Найближчим аналогом є [Hashem M. Hashemian. Measurement of Dynamic Temperatures and Pressures in Nuclear Power Plants. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2011, 214 p.], у якому описано вимірювальну інформаційну систему, що містить вимірювальну лінію 1 з декількома надлишковими датчиками тиску 2 (фіг. 1). Оскільки тестовий сигнал важко створити на ТСО, у найближчому аналогу в якості вхідного сигналу вимірювального каналу використовується шум технологічного процесу, який обумовлений флуктуаціями тиску у вимірювальній лінії. Накопичення такого шуму здійснюється протягом тижня і більше, тобто вимагає великих часових витрат.

Недоліком найближчого аналога є значний час некогерентного накопичення малих гідродинамічних шумів у вимірювальній системі. Звідси виникає задача, що полягає у підвищенні оперативності технології вимірювання тиску при бездемонтажному контролі датчиків тиску.

Спільними ознаками з корисною моделлю, що запропонована, є те, що у способі бездемонтажного контролю датчиків тиску в багатоканальній вимірювальній інформаційній системі, що складається з вимірювальної лінії та декількох датчиків тиску, який полягає в тому, що за допомогою датчиків вимірюють одну реалізацію випадкового тиску на виході вимірювальної лінії, дискретизують у часі вихідні сигнали всіх датчиків тиску і отримують часові дискрети, після чого формують матрицю тисків $m \times n$.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення способу бездемонтажного контролю датчиків тиску в багатоканальній вимірювальній інформаційній системі, підвищення точності вимірювань та оперативності проведення бездемонтажного контролю датчиків.

Технічний результат, на який спрямована корисна модель, полягає у підвищенні оперативності бездемонтажного контролю датчиків тиску та, як наслідок, зниженні часу контролю приблизно на порядок.

Поставлена задача вирішується тим, що при здійсненні відомого способу бездемонтажного контролю

датчиків тиску в багатоканальній вимірювальній інформаційній системі, що складається з вимірювальної лінії та m датчиків тиску, який полягає в тому, що за допомогою датчиків вимірюють одну реалізацію випадкового тиску на виході вимірювальної лінії, дискретизують у часі вихідні сигнали всіх датчиків тиску і отримують часові дискрети, формують матрицю тисків розмірністю $m \times n$, згідно з корисною моделлю проводять декомпозицію сингулярних значень матриці тисків і всі розраховані сингулярні значення надсилають на перші входи компараторів, на інші входи яких подають відповідні сингулярні значення від матриці опорних усереднених тисків, яку формують на основі попереднього статистичного усереднення тисків у справних датчиках при нормальних умовах функціонування багатоканальної вимірювальної інформаційної системи, а з виходів компараторів відповідні різниці сингулярних значень відправляють на квадратори, де ці різниці підносять до квадрата і надсилають на суматор, а далі - на обчислювач квадратного кореня, вихідне значення якого порівнюють у пороговому пристрої з пороговим значенням евклідової відстані між множиною сингулярних значень матриці опорних усереднених тисків та аналогічною множиною для поточної матриці тисків, а при перевищенні порогового значення цієї відстані приймають рішення щодо порушення в роботі одного або декількох датчиків тиску.

На відміну від найближчого аналога, в корисній моделі відповідність метрологічних характеристик датчиків тиску заданим оцінюється не по накопиченню гідродинамічних шумів, а з використанням реальних сигналів тиску, амплітуда яких набагато перевищує амплітуду шумів. Оскільки процес накопичення шумів здійснюється протягом тижнів, то переваги корисної моделі по оперативності є очевидними внаслідок використання високоенергетичних сигналів. Як і в найближчому аналогу, в корисній моделі використовується вимірювальна інформація з декількох датчиків тиску, які можуть бути як ідентичними, так і не ідентичними, тобто, наприклад, такими, що ґрунтуються на різних фізичних принципах. На перший погляд, справність датчиків в багатоканальній системі легко визначити шляхом порівняння вихідних сигналів датчиків, які в ідеальному випадку повинні бути однаковими, оскільки знімаються з однієї вимірювальної лінії. Наприклад, два датчики, які показують один і той же тиск, можна вважати справними, а третій датчик, показання якого істотно відрізняються, - несправним. Однак, все може бути навпаки, хоча ймовірність такої ситуації менша. У корисній моделі використовується порівняння отриманих вихідних сигналів у кожному вимірювальному каналі наперед вибраному інтервалі з деякою усередненою залежністю значень сигналу від часу. Ця опорна залежність є характерною для кожного режиму роботи технічно складного об'єкта. Її отримують шляхом статистичного усереднення багатьох реалізацій випадкового процесу тиску при справному ТСО і справних датчиках, метрологічні характеристики яких відповідають заданим. Такі умови, як правило, створюються після калібрування датчиків тиску на стендах, яке обов'язково проводиться на ТСО згідно з нормативними документами.

Порівняння отриманої реалізації тиску з опорною недоцільно проводити по одному параметру тиску в кожному каналі, наприклад по амплітуді. Для цього потрібні більш загальні критерії. У корисній моделі використовуються узагальнений критерій, що являє собою відстань в евклідовому просторі між множиною сингулярних значень опорної залежності та множиною сингулярних значень поточних реалізацій в кожному вимірювальному каналі. Якщо ця відстань буде перевищувати порогову, то приймається рішення щодо відповідності датчиків заданим метрологічним характеристикам. Для цього проводиться попереднє дослідження для конкретного ТСО з конкретною ББІС. Визначена порогова відстань може бути неприйнятною для іншого подібного технічного об'єкта. Оцінювання порогової відстані здійснюється статистичними методами. Від вибору цієї відстані залежить ймовірність правильного прийняття рішення щодо справності датчиків.

Для отримання множини сингулярних значень матриці результатів вимірювання використовують метод SVD (Singular Value Decomposition), який описано в багатьох наукових працях, наприклад, у [Embree M. The Singular Value Decomposition. Matrix Methods for Computational Modeling and Data Analysis. Virginia Tech., Spring, 2019, Pp. 72-108]. Він легко обчислюється в математичному пакеті Матлаб з допомогою оператора `svd` [MATLAB `svd` - Singular value decomposition. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/double.svd.html> (дата звернення: 02.08.2024)]. Для отримання сингулярних значень використовують матрицю, рядками якої є номери вимірювальних каналів тиску, а стовпцями - номери часової дискрети. Цифрові датчики тиску всіх каналів безпосередньо заповнюють матрицю значеннями тиску наперед визначеному часовому інтервалі. Після аналогового датчика повинен встановлюватися аналогово-цифровий перетворювач.

Метод SVD застосовується для несиметричних матриць і є аналогом діагоналізації квадратних матриць. Матрицю експериментальних даних L можна подати у вигляді

$$L = U \Sigma V^T, (1)$$

де U та V - матриці, що містять, відповідно, ліві та праві сингулярні вектори.

Причому, $U^T U = I$ та $V^T V = I$, де I - одинична матриця. Якщо розмірність матриці експериментальних даних L становить, наприклад, 3×500 , то розмірність матриці U дорівнює 3×3 , а матриці V - 500×500 . Розмірність матриці Σ співпадає з розмірністю L . Якщо розмірність матриці L буде досягати дуже

великих значень, то існує метод зниження порядку цієї матриці без втрати вимірювальної інформації. У корисній моделі для реалізації мети досліджень розглядається тільки матриця Σ , яка містить сингулярні значення, що розміщені по діагоналі у спадному порядку. Більшість сингулярних значень дорівнює нулю і це використовується при зниженні розмірності матриці L .

Ілюстрацію роботи корисної моделі проведемо на прикладі експериментальних значень тиску, що отримані авторами в триканальній вимірювальній інформаційній системі. Кількість часових дискрет дорівнювала 500, що відповідало інтервалу часу 500 с, тобто інтервал дискретизації становив 1 с. Вид вимірних сигналів у трьох каналах приведено на фіг. 2. Матрицю розмірністю 3×500 піддають декомпозиції, у результаті чого визначають просторові і часові моди, а також сингулярні значення, які для приведенного експерименту (фіг. 2) описуються графіком (фіг. 3). З фіг. 3 випливає, що кількість мод для конкретних експериментальних даних дорівнює 1 і при цьому 100 % енергії зосереджено в першій моді (фіг. 4).

Далі вважаємо, що в першому датчику тиску відбуваються порушення в роботі і на деякому часовому інтервалі показання цього датчика відрізняється від реальних. Ці порушення вводять програмним чином, що приводить до двох аномальних ситуацій у розподілі експериментальних даних, які показані на фіг. 5 та фіг. 6. На фіг. 5 провал одиниць тиску в часовому діапазоні від 200 с до 300 с склав 20 МПа, а на фіг. 6 - 60 МПа. В останньому випадку це еквівалентно короточасному виходу з ладу першого датчика. Для експериментальних даних (фіг. 6) виділяються вже дві моди з сингулярними значеннями, що показані на фіг. 7 і розподілом енергії у першій моді меншій 100 % (фіг. 8). Аналогічні результати отримують при інших аномальних порушеннях у роботі БВІС. Отже, будь-які істотні змінювання показань датчика чи датчиків тиску порівняно з іншими датчиками неминуче приводять до перерозподілу сингулярних значень по модах і, в окремих випадках, до змінювання кількості мод. Фактично сингулярні значення матриці тисків містять у собі інформацію про стан датчиків тиску. Порівняння поточних сингулярних значень матриці тисків здійснюють з аналогічними значеннями, що властиві для такої ж матриці при нормальних умовах функціонування БВІС.

Отже, маємо дві множини сингулярних значень матриці Σ : для опорної матриці тиску, що описує усереднені залежності для нормальних умов, та поточної матриці тиску в аномальних умовах, наприклад, при порушеннях у роботі одного або декількох датчиків тиску. Для експериментальних даних, що розглядаються, при нормальних умовах функціонування кількість мод становить один, а при несправному першому датчику - дві. При неоднаковій кількості сингулярних значень вибирають максимальне з них, тобто для даного випадку дві. Для нормальних умов, коли існує тільки одна мода, друге сингулярне значення матриці Σ дорівнює нулю. Сингулярні значення для нормальних умов

позначимо σ_{L_i} , а для аномальних умов - σ_{B_i} . Тоді евклідова відстань (евклідова метрика) між зазначеними множинами визначається за відомим співвідношенням, що міститься у будь-якому навчальному посібнику з функціонального аналізу

$$d = \sqrt{\sum_{k=1}^K (\sigma_{L_i} - \sigma_{B_i})^2}, \quad (2)$$

де K - кількість мод, яка для експерименту, що розглядається, дорівнює дві.

При обчисленні за формулою (2) отримуємо одне число, тобто евклідову відстань. Для експериментальних даних, що зображені на фіг. 5 та на фіг. 6, за формулою (2) розраховані евклідові відстані між множинами сингулярних значень поточної матриці тисків і матриці опорних тисків (фіг. 2). Залежність цієї відстані від глибини провалу тиску на першому датчику (фіг. 5 та фіг. 6) показана на фіг. 9. Далі ця відстань порівнюється з пороговим значенням відстані і приймається рішення щодо справності датчика. Слід відзначити, що велика відстань d може бути обумовлена не тільки несправністю датчиків тиску, але і аномальним режимом роботи ТСО. Корисна модель обмежена тільки штатним режимом роботи технічно складного об'єкта. Великі значення відстані d , що перевищують поріг, сигналізують оператору ТСО або про аномальний режим роботи ТСО, або про несправність одного чи декількох датчиків. Розпізнавання аномального режиму роботи не є складним завданням при використанні декількох показників, що характеризують роботу ТСО. Перевірка справності датчиків є складним завданням, оскільки потребує їх демонтажу з БВІС і перевірка роботи на стенді. Операція демонтажу датчика тиску часто проводиться в умовах, які є небезпечними для здоров'я людини. Іноді датчик, що вважався несправним, виявляється все ж справним після перевірки на стенді. Корисна модель допомагає мінімізувати кількість непотрібних перевірок датчиків. Основна перевага корисної моделі - істотне підвищення оперативності (на декілька порядків) при бездемонтажному контролі датчиків тиску порівняно з існуючим методом аналізу шумів.

Пристрій, що реалізує запропонований спосіб, ґрунтується на співвідношеннях (1) та (2). Структурна схема пристрою приведена на фіг. 10. Тиск від вимірювальної лінії 1 передають на входи m однотипних або різнотипних датчиків тиску 2, з виходів яких електричні сигнали в цифровій формі, які пропорційні тиску, подають на блок декомпозиції сингулярних значень 3, у якому реалізують операцію

(1) з використанням матриці виміряних тисків. Кількість рядків матриці m дорівнює кількості датчиків тиску, а кількість стовпців n - кількості часових дискрет. Кожній дискреті часу відповідає значення тиску, що знімають з датчика. Отже, в блоці 3 реалізують операцію SVD для матриці розмірністю $m \times n$. На виходах блока 3 формується K сингулярних значень від усіх K мод. Число K наперед невідоме, але воно є відомим для матриці опорних усереднених залежностей тиску від часу в каналах. Для приведених експериментальних результатів в нормальних умовах $K=1$. Після виходу з ладу одного датчика кількість мод збільшилася до двох. При інших аномальних умовах число K може перевищувати 2. Для практичних потреб можна вибрати надлишкову кількість мод, наприклад, 5 або 10. Це не впливає на точність обчислення відстані d , оскільки в формулі (2) більшість складових буде дорівнювати нулю і розрахунки будуть здійснюватися тільки з урахуванням сингулярних значень перших мод. З K виходів блока 3 сингулярні значення в цифровому вигляді подають на перші входи K компараторів 4, на інші входи яких спрямовують відповідні сингулярні значення матриці опорних тисків для усереднених залежностей тиску від часу, які можуть бути однаковими для всіх каналів або відрізнятися в каналах, наприклад, внаслідок застосування різних типів датчиків тиску. З виходів компараторів 4 різниці сингулярних значень відповідних мод надсилають на квадратори 5, в яких обчислюють квадрати відповідних різниць сингулярних значень. Вихідні значення квадраторів 5 подають на K входів суматора 6, з вихідного значення якого беруть квадратний корінь в обчислювачі 7. З обчислювача квадратного кореня 7 відстань d між множинами сингулярних значень направляють на перший вхід порогового пристрою 8, на інший вхід якого подають значення порогової відстані $d_{\text{пор}}$, що визначається при статистичному аналізі. При $d \geq d_{\text{пор}}$ приймають рішення про порушення в роботі одного з датчиків. Який конкретно датчик має порушення в роботі, може визначити оператор по іншим критеріям, які не розглядаються в корисній моделі.

Отже, запропонований спосіб забезпечує збільшення на порядки оперативності бездемонтажного контролю датчиків тиску в багатоканальній інформаційно-вимірювальній системі. Використання декомпозиції сингулярних значень дозволяє також зменшити розмірність матриці експериментальних тисків, що дозволяє обробляти великі масиви даних.

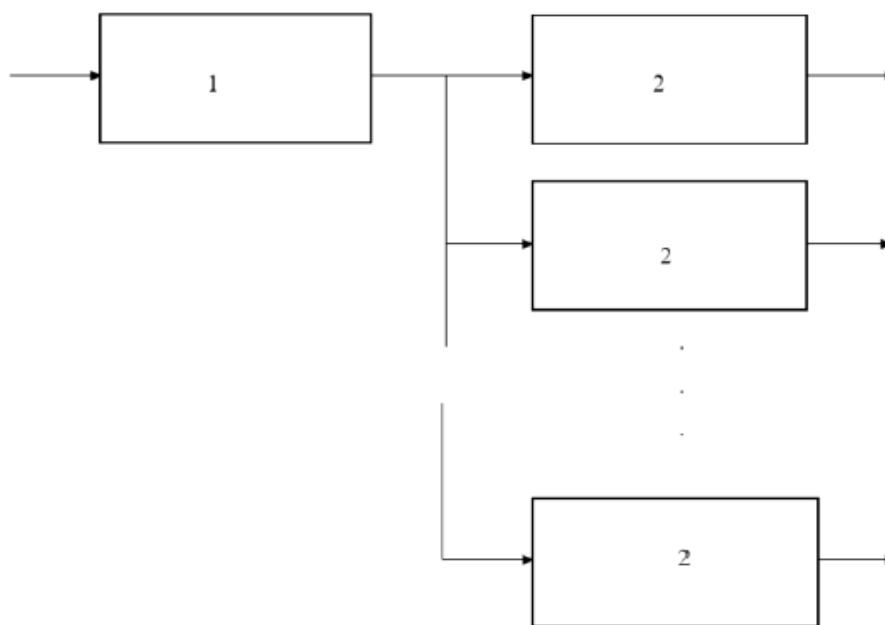
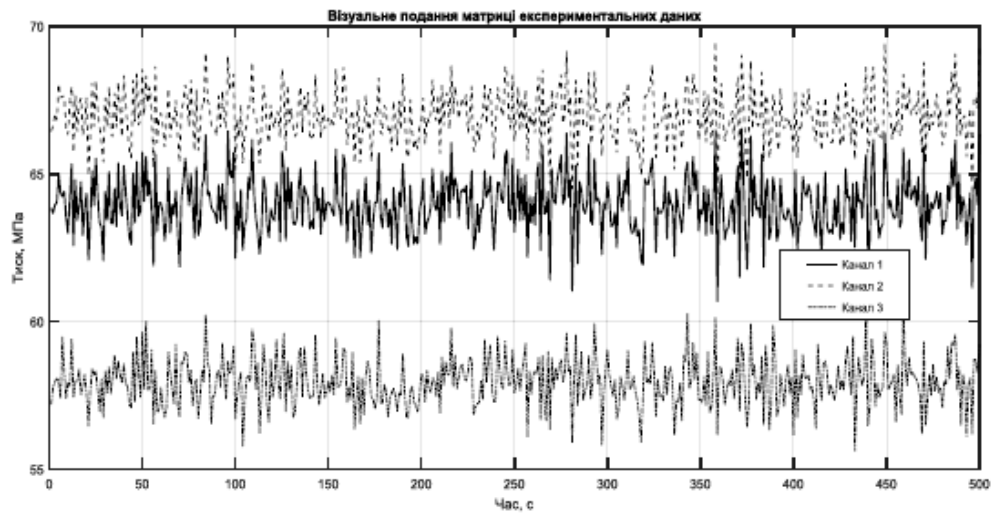
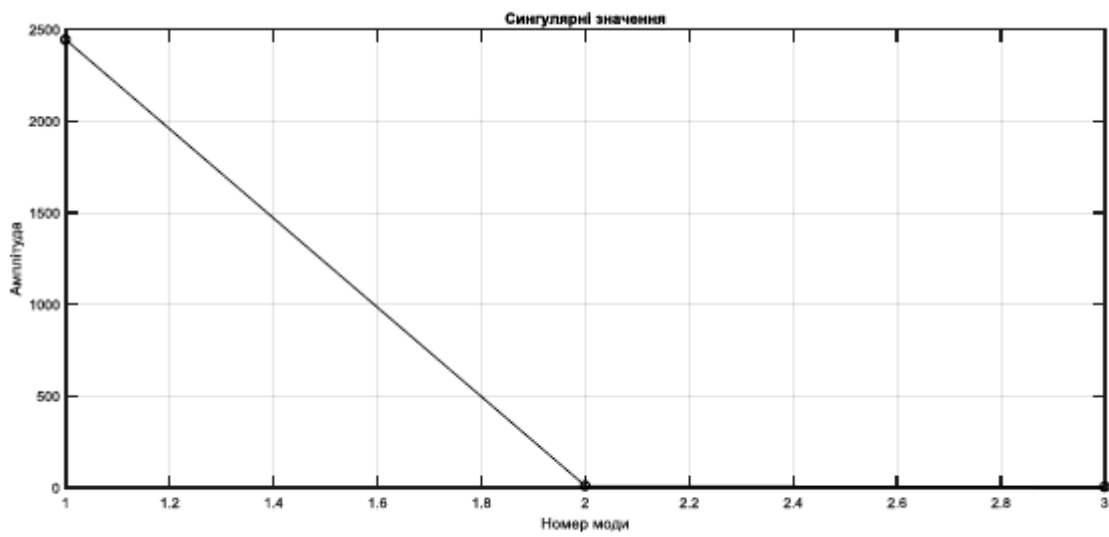


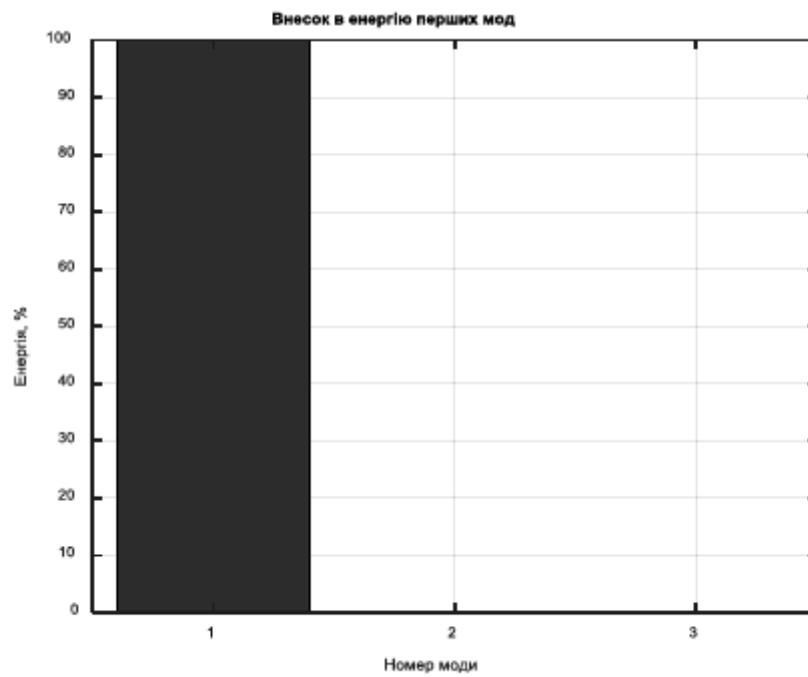
Fig. 1



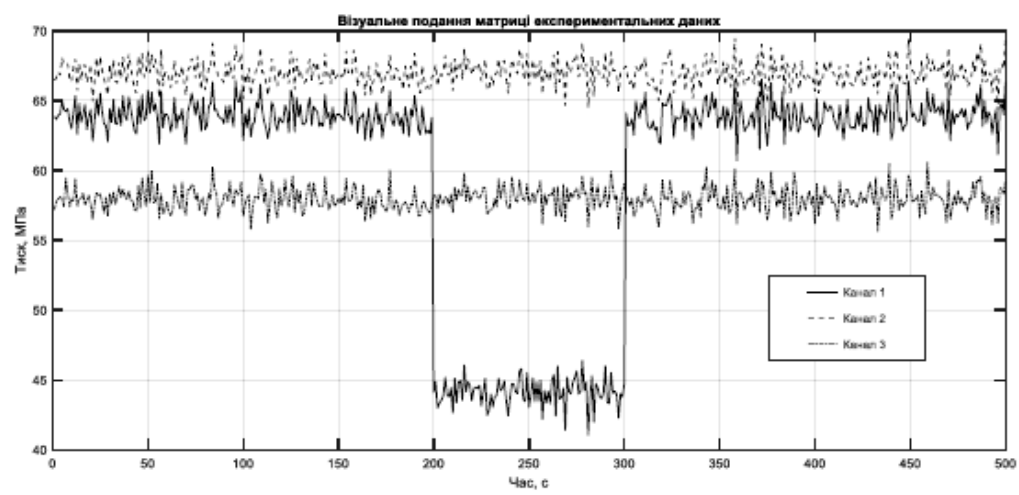
Фіг. 2



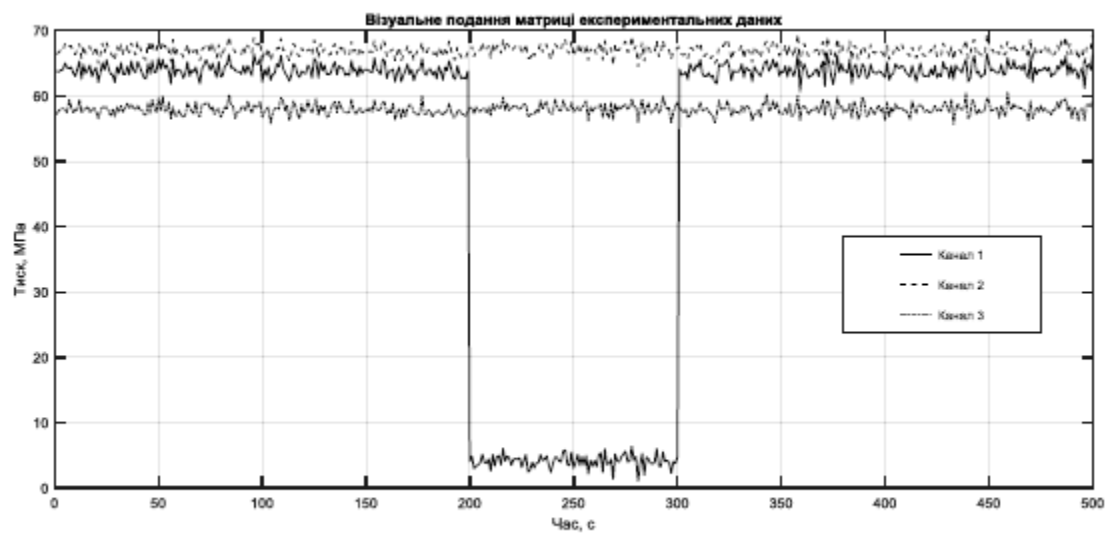
Фіг. 3



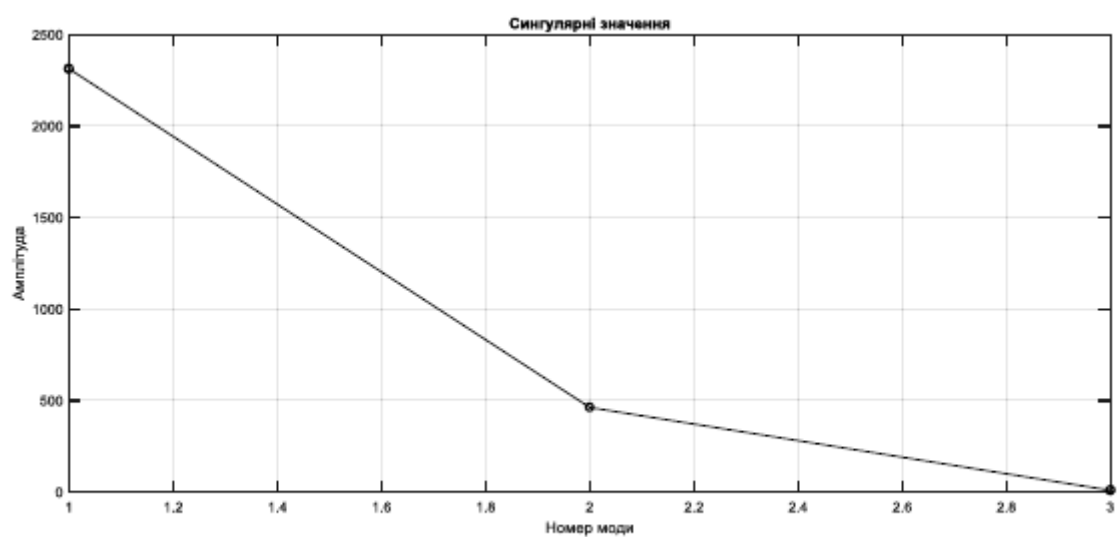
Фіг. 4



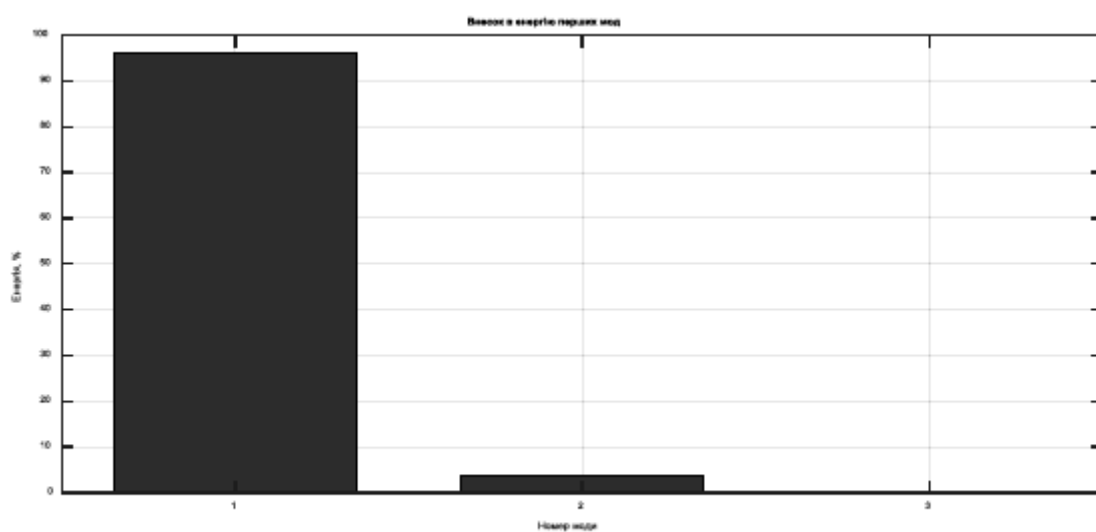
Фіг. 5



Фіг. 6



Фіг. 7



Фіг. 8

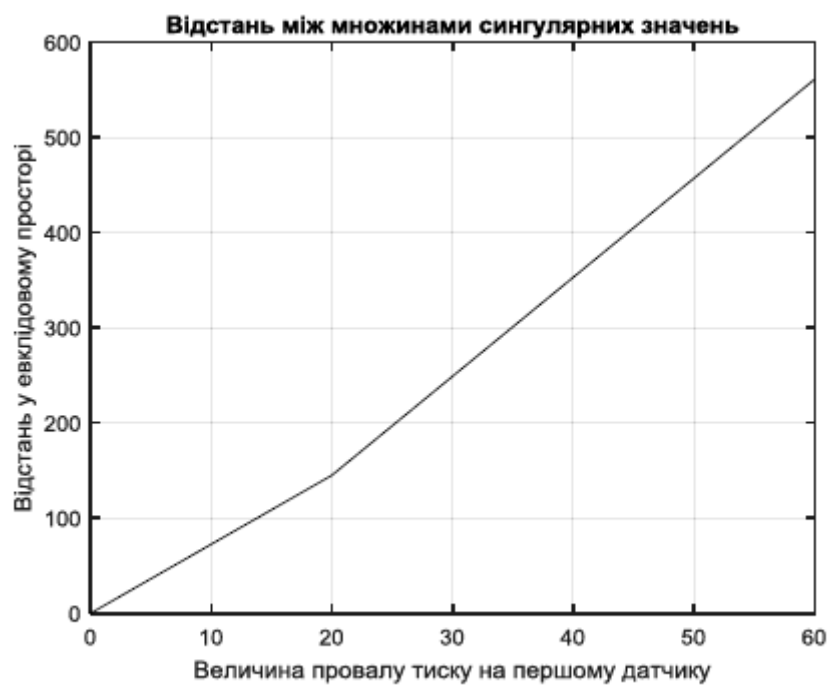


Fig. 9