

## ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 539.32+681.58

### ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ЗМІН В МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЯХ ЗА ВІДНОСНОЮ ПРИВЕДЕНОЮ ЧАСТОТОЮ ГАРМОНІК СЕНСОРА-СТРУНИ

Стрілецький Ю.Й.<sup>\*1</sup>, Ровінський В.А.<sup>2</sup>, Євчук О.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<sup>2</sup>Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна

Запропоновано методи формування та цифрового опрацювання широкосмугових діагностичних сигналів за відносною приведеною частотою гармонік для виявлення змін структури металу, який забезпечує інваріантність до флуктуації температури за рахунок використання відношення частот, що дозволяє підвищити стабільність інформаційно-вимірального каналу системи діагностування.

Ключові слова: система діагностування, зміна структури металу, аналіз широкосмугових сигналів.

Предложен метод формирования и цифровой обработки широкополосных диагностических сигналов на основе относительной приведенной частоты гармоник для обнаружения изменений структуры металла, который обеспечивает инвариантность к флуктуации температуры за счет использования соотношения частот, что позволяет повысить стабильность информационно-измерительного канала диагностической системы.

Ключевые слова: система диагностирования, изменение структуры металла, анализ широкополосных сигналов.

A method of generation and digital processing of wideband diagnostic signals using relative normalized harmonic frequency for detection of changes in the metal structure is proposed. This approach provides invariance to temperature fluctuations by using the signal frequency ratio. As a result, measuring channel stability of diagnostic system can be increased.

Keywords: diagnostics system, metal structure changing, broadband signal analysis.

Традиційно реалізація різноманітних інженерних конструкцій як у промисловій, так і у побутовій сферах ґрунтується на використанні металів, які забезпечують відповідну міцність, жорсткість, надійність тощо протягом всього терміну експлуатації. Однак, внаслідок різноманітних причин, найчастіше надлишкового чи циклічного навантаження, метал змінює свою структуру, що може призвести до руйнування.

В такій ситуації розробка нових та вдосконалення наявних методів формування та опрацювання сигналів у інформаційно-вимірвальних каналах систем діагностування локальних змін структури металу, зокрема в

експлуатаційних умовах, є актуальною проблемою в області забезпечення вимог надійності та експлуатаційної безпеки згаданих конструкцій.

#### 1. Постановка задачі

Реалізація автоматичних комп'ютерних інформаційно-вимірвальних систем неруйнівного контролю найчастіше ґрунтується на непрямих методах вимірювання механічних параметрів [1]. Широко використовуються методи дослідження цих параметрів, за їх впливом на коливні процеси в досліджуваній деталі.

Однією із реалізацій сенсора, що використовуються для формування і опрацювання діагностичних сигналів, є натягнуті струни [2-3]. Струна утворює із досліджуваною деталлю коливальну систему. Механічні властивості складових цієї системи впливають на коливання струнного сенсора. Одним з актуальних завдань є вдосконалення наявних та розробка нових методів цифрового опрацювання діагностичних сигналів, які дозволять забезпечити ефективне оцінювання зміни структури металевих елементів конструкцій за коливаннями струнного сенсора. Вихідними даними при опрацюванні сигналів за відносною приведеною частотою гармонік є: відносна зміна частоти вищих мод в залежності від пружних властивостей коливальної системи, складовою частиною якої є струнний сенсор.

## 2. Огляд літератури

В роботах [4, 5] розглянуто різні види структурних змін, що спостерігаються в металах внаслідок їх деформації. Основну небезпеку становлять зміни, що призводять до посилення втрати енергії деформації в деталі. Існує декілька способів контролю пружно-пластичних властивостей матеріалів [6]. За допомогою цих способів реалізується різні методи оцінювання властивостей металу, що ґрунтуються на опрацюванні діагностичних сигналів, які формуються шляхом механічного впливу на відповідну конструкцію чи окремі взірці [7].

До спільних недоліків згаданих методів слід віднести необхідність використання взірців для налаштування чутливості первинних перетворювачів інформаційно-вимірвальних каналів систем діагностування змін в структурі металу.

## 3. Метод формування широкосмугових діагностичних сигналів

Практична реалізація методів виявлення структурних змін найчастіше послуговується способами формування незатухаючих коливань. Струна є пружним елементом, параметри поперечних коливань якого залежать від сили натягу, пружності матеріалу струни і маси коливальної частини струни.

Для збудження коливань в системі струна закріплюється між двома точками деталі. Процес поширення поперечних хвиль в струні описується хвильовим рівнянням виду [8]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = b^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1)$$

З розв'язку цього рівняння, доповненого граничними та початковими умовами для струни, отримано залежність, яка описує власні частоти поперечних коливань ідеально пружної струни фіксованого розміру із малою амплітудою коливань, які кратні її довжині:

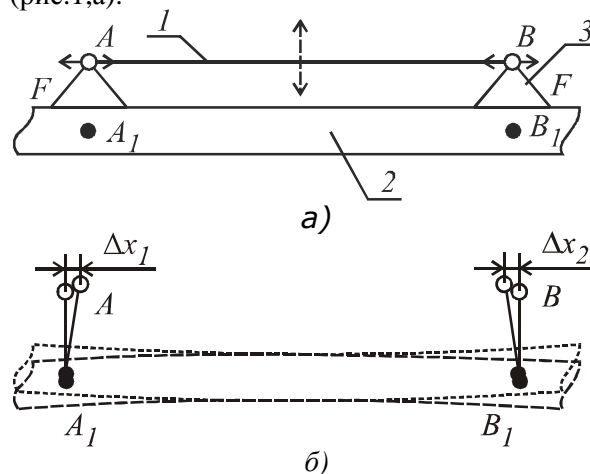
$$\omega_n = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \cdot k_n, \quad (2)$$

де  $\sigma$  – механічне напруження в струні;  $\rho$  – погонна густина струни;  $k_n = 2\pi \cdot n/\lambda$  – хвильове число;  $\lambda$  – довжина хвилі, рівна половині довжини  $L$  натягнутої струни. Номер моди  $n$  визначає частоту її коливання згідно (2). Коливання струни в загальному випадку є сумою коливань різних мод. Частоти коливань реальних струн на вищих модах не відповідають (2). Їх можна знайти за формулою:

$$\omega_n^2 \approx \frac{\sigma}{\rho} \cdot k_n^2 + \alpha \cdot k_n^4, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – додатня константа, наявність якої спричинена власною жорсткістю струни.

Для передачі коливань до металевій основі 2 струна 1 натягується між опорами 3, які жорстко закріплені на поверхні цієї основи (рис.1,а).

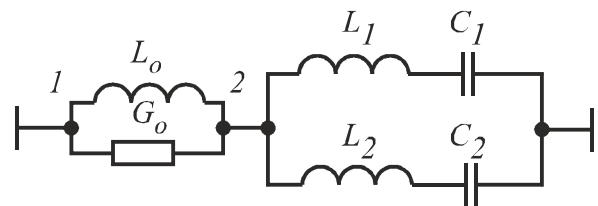


**Рисунок 1 – Деформація металевій основі при коливанні натягнутої струни: а) схема дослідної установки; б) вид згинаючих деформацій, що виникають в основі.**

Поперечні коливання струни супроводжуються зміною сили  $F$  у повздовжньому напрямку (рис.1,б). Впродовж коливного циклу струна, відхиляючись від свого початкового положення, деформує основу. В початкове положення струна повертається під дією сили протидії основи. Релаксаційні процеси в металі основи

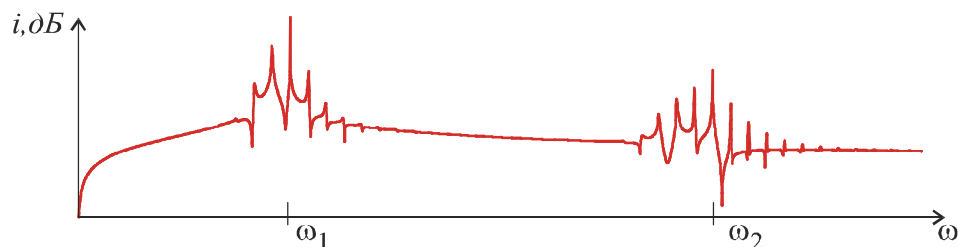
впливають на швидкість зміни протидіючої сили. Тому результуючі коливання струни, натягнутої на пружно-пластичній основі, залежать від її механічних властивостей. Коливання основи спричиняють частотну модуляцію мод струни, а її пластичні властивості по-різному впливають на моди з різними номерами.

Колівальну систему, яка складається з натягнутої на пружно-пластичній основі струни, було змодельовано за допомогою схеми (рис.2), побудованої за принципами електромеханічних аналогій [8, 9]. Властивості двох мод струни моделюють паралельно включені ланки  $L_1, C_1$  і  $L_2, C_2$ . Властивості пружно-пластичної основи моделюють паралельно включені  $L_0, G_0$  [10, 11].



**Рисунок 2– Схема механікоелектричної моделі колівальної системи**

З використанням розробленої моделі було досліджено спектральні властивості струму, який стікає на загальну лінію. Струм електричної моделі еквівалентний силі, яка прикладається до основи. Спектральну щільність струму, знайдену в результаті числового експерименту, наведено на рис. 3.



**Рисунок 3 – Спектральна щільність сигналу, пропорційного амплітуді коливань струни, натягнутої на пластично-пружній основі**

Із наведеного графіку видно, що спектр коливань для кожної з мод має симетричний відносно і вигляд. Це характерно для частотно-модульованих сигналів. Ширина смуги, зайнята модою, залежить від  $L_0$ , тобто від пружних властивостей основи. Зменшення  $L_0$ , що еквівалентно зростанню жорсткості основи, призводить до звуження смуги навколо центральних спектральних складових на частотах  $\omega_1$  і  $\omega_2$ . Зменшення ж провідності  $G_0$ , що еквівалентно зменшенню пластичності матеріалу, призводить до зміни  $\omega_1$  і  $\omega_2$ , відповідно. Приймавши частоту коливання першої моди за опорну, можна знайти оцінку відхилення частот коливань вищих мод за допомогою коефіцієнта згідно формули:

$$q = \frac{n \cdot \omega_{оп}}{\omega_n}, \quad (4)$$

де  $n$  – номер моди,  $\omega_{оп}$  – частота коливань 1-шої моди,  $\omega_n$  – частота коливань  $n$ -ї моди. Для ідеальної натягнутої струни, кінці якої зафіксовані, даний коефіцієнт буде рівним 1. У реальної струни, жорсткість якої визначається

не тільки силою її натягу, а й власною жорсткістю матеріалу, з якої виготовлено струну, що враховано в (3), коефіцієнт  $q$  буде меншим за 1. Зміни в структурі металу, які призводять до перерозподілу енергії деформування пружно-пластичної основи, мають різний вплив на натяг струни. За наявності значних втрат енергії деформації, пов'язаних із пластичними властивостями металу основи, на якій натягнуто струну, коефіцієнт  $q$  буде більшим за 1.

Для дослідження впливу пружно-пластичних властивостей основи на моди струни було розроблено і виготовлено дослідну установку, яка складається із механічного блоку, електронного блоку підтримання коливань і блоку визначення коефіцієнтів відхилення частот коливань вищих мод.

Загальна функціональна схема пристрою для визначення відхилення частот коливань вищих мод сенсора-струни наведено на рис. 4.

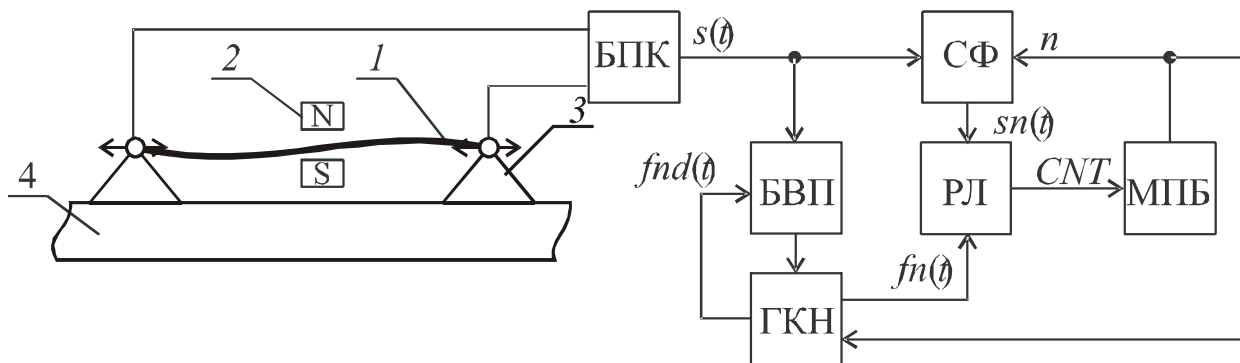
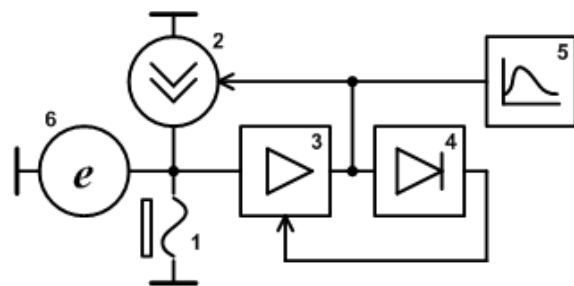


Рисунок 4 - Структурна схеми пристрою для визначення коефіцієнтів відхилення частот коливань вищих мод

Сенсор (струна) 1 натягнута між опорами 3, які жорстко закріплені на основі 4. Частина струни знаходиться в магнітному полі, яке створює постійний магніт 2. Коливання струни підтримує блок підтримки коливань БПК. При поперечних коливаннях струни в складі коливальної системи, утвореної струною, опорами і основою, формується сигнал  $s(t)$ . Цей сигнал поступає на вхід блоку визначення помилки (БВП), який формує керуючий сигнал генератора керованої напруги (ГКН). ГКН налаштований на десяту гармоніку першої моди. Сигнал  $fnd(t)$ , отриманий діленням частоти ГКН вдесятеро, рівний головній частоті першої моди коливання сенсора-струни. Мікропроцесорний блок (МПБ) вибирає гармоніку для дослідження і виставляє відповідні сигнали на вході ГКН і смугового фільтра (СФ). При цьому СФ із вхідного сигналу виділяє сигнал моди  $sn(t)$ , а генератор формує сигнал гармоніки  $fn(t)$  із відповідним номером. Реверсивний лічильник здійснює підрахунок різниці кількості імпульсів цих двох сигналів, а МПБ за різницею  $CNT$  шукає коефіцієнт відношення частот.

Збудження струнного сенсора забезпечується джерелом широкопasmового сигналу, яке фактично формує його початкове переміщення. Електричний імпеданс струни залежить від її власних частот. Залучивши струнний сенсор в коло зворотного зв'язку підсилювача струму, отримано автоколивальну систему, сигнал якої формується переміщенням струни в магнітному полі на власних частотах коливальної системи. Структурну схему блоку підтримання коливання наведено на рис.5.



1- струна із в магнітному полі, 2- джерело струму, 3- підсилювач напруги із керованим коефіцієнтом підсилення, 4- випрямляч системи автопідсилення, 5- аналізатор спектру, 6- джерело широкопasmового збуджуючого сигналу

Рисунок 5 - Еквівалентна схема заміщення розподілених параметрів коливальної системи із натягнутою струною із зосередженими параметрами/

Джерело широкопasmового збуджуючого сигналу 6 забезпечує струм в сенсорі 1, який призводить до його переміщення. Коливання струни в магнітному полі призводить до появи ЕРС на її кінцях. Отримана ЕРС підсилюється підсилювачем 3 і після перетворення в струм джерелом струму 2 повертається в струну, підтримуючи її коливання. Амплітуда підсиленої ЕРС на виході 3 оцінюється системою автопідсилення 4 і при досягненні заданого рівня коефіцієнт підсилення підсилювача 3 зменшується.

4. Метод опрацювання діагностичних сигналів для виявлення змін структури металевих конструкцій

Частоти мод формуються складними процесами, які протікають протягом деякого часу, фактично вони є частотно-модульованими. Тому для оцінки відхилення частоти моди від кратної до основної частоти струни необхідно

налаштовуватися на центральну частоту моди і шукати відхилення частоти вищих мод від частоти вищих гармонік першої моди. Для цього спочатку на центральну частоту першої моди налаштовується генератор керований напругою (ГКН). Після налаштування ГКН шукається відхилення його помноженої на номер досліджуваної моди частоти від частоти моди з цим номером.

Основою підсистеми автоналаштування частоти ГКН є блок формування сигналу помилки. Сигнал із виходу пристрою для підтримання коливань поступає на смуговий фільтр, який виділяє смугу частот із основною гармонікою першої моди сенсора. Цей сигнал використовується для пошуку відхилення частоти ГКН від центральної частоти першої моди.

Сигнал помилки, який використовуються для керування ГКН, визначається шляхом дискретизації вхідного сигналу двома допоміжними імпульсними послідовностями генерованих ГКН. Після дискретизації спектр вхідного сигналу набуває періодичності. Якщо вхідний сигнал  $s(t)$  є вузькосмуговим із частотою  $\omega_0$ , то його спектр стане дискретним. Частота однієї із імпульсних послідовностей  $\omega_{д1}$ , яка синхронізує дискретизацію, повинна бути завідомо нижчою за центральну частоту вхідного сигналу, а частота іншої  $\omega_{д2}$  - вищою.

Тоді  $\Delta\omega_1 = \omega_0 - \omega_{д1}$ , а  $\Delta\omega_2 = \omega_{д2} - \omega_0$ . Таким чином, після дискретизації спектри вхідного сигналу  $S_{д1}$  і  $S_{д2}$  перемістяться до нульової частоти, див.рис.б. Спектр  $S_{д2}$  буде дзеркальним, але при симетричності спектру вхідного сигналу це значення не має.

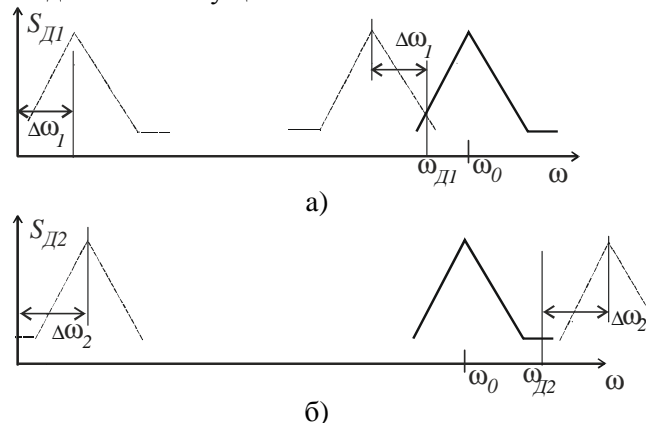


Рисунок 6 - Зміни спектральної щільності вхідного сигналу після дискретизації з різною частотою

Спектральні складові  $S_{д1}$  і  $S_{д2}$  знаходяться на відстані  $\Delta\omega_1$  і  $\Delta\omega_2$  від нуля. За умови  $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$  частота  $\omega_0$  буде між  $\omega_{д1}$  і  $\omega_{д2}$ . Похибкою налаштованості ГКН є  $\Delta\omega = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_2$ . Для пошуку аналогової різниці  $\Delta si$  використано фільтр низької частоти із АЧХ, наближеною до виду спадаючої лінії, див. рис.7,а. При відніманні цих двох оцінок і симетричній формі спектральної щільності вхідного сигналу, отримуємо сигнал похибки налаштування частот дискретизації, які формуються ГКН відносно  $\omega_0$ , див.рис.7,б.

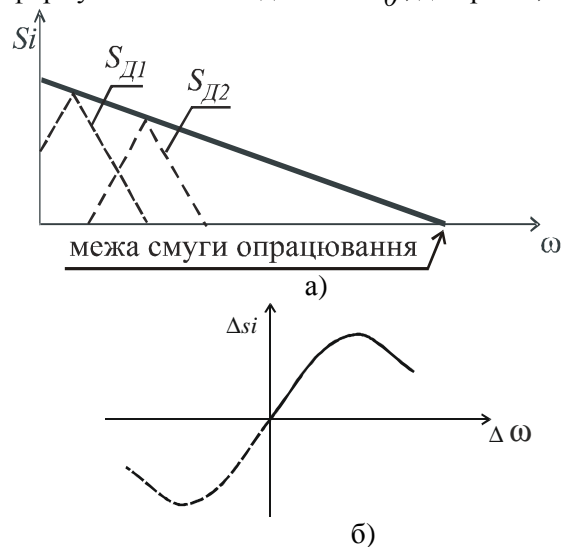


Рисунок 7 - Частотна характеристика блоку інтегральної оцінки – а) і вихідна залежність блоку формування сигналу помилки – б)

Структурну схему підсистеми автоналаштування частоти ГКН на основну гармоніку першої моди сенсора (струни) подано на рис.8.

Для отримання сигналів дискретизації  $f_{д1}$  і  $f_{д2}$  із частотою вищою і нижчою за частоту  $f_{нд}(t)$  ГКН використано модулятор МД із амплітудною модуляцією. Несучим сигналом є  $f_{нд}(t)$ , а модулюючим -  $\Delta(t)$ . Модулюючий сигнал  $\Delta(t)$  формується генератором дельта частоти  $\Gamma\Delta$ . Модульований сигнал  $sm(t)$  буде містити тільки дві частотні складові, які симетричні відносно несучої частоти.

Виділення верхньої і нижньої частоти дискретизації здійснюється фільтруванням, відповідно ВЧ і НЧ. При використанні цифрових фільтрів їх частоти зрізу можна

змінювати тактовою частотою  $fn(t)$ , кратною до частоти ГКН. В такому випадку формуються дві допоміжні імпульсні послідовності, точно зміщені від частоти ГКН на фіксовану величину.

Керування частотою ГКН здійснюється сигналом, пропорційним різниці частот дискретизованих коливань. В залежності від знаку  $\Delta si(t)$  частота  $fn(t)$  буде збільшуватися чи зменшуватися. При досягненні значення, при

якому  $fn(t)$  після ділення на  $n$  співпаде із центральною частотою вхідного сигналу,  $\Delta si(t)$  наблизиться до 0. Сигнал на виході управляючого блоку  $\#/\sim$  буде підтримувати на виході таку напругу, при якій буде формуватися нульове значення  $\Delta si(t)$ .

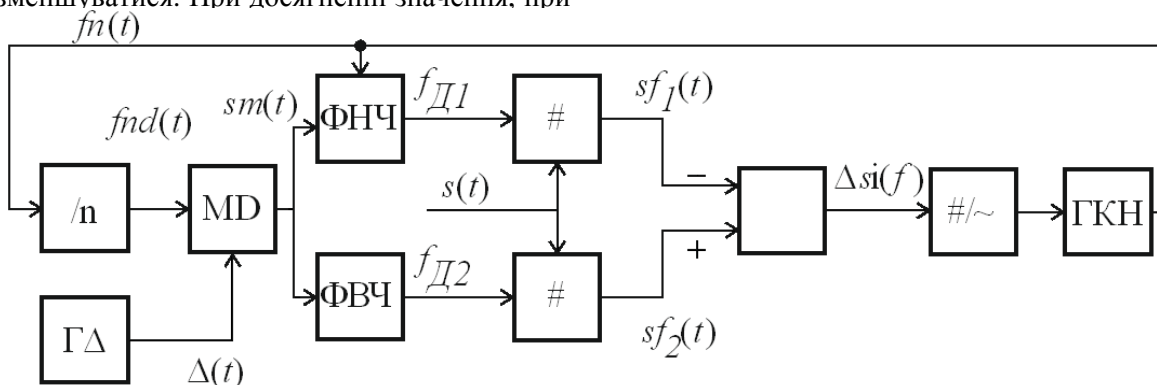


Рисунок 8 - Структурна схема підсистеми автоналаштування ГКН на центральну частоту діагностичного сигналу

Завдяки інтегральному оцінюванню спектру дискретизованих сигналів підтримується рівність інтегралів їх спектральних складових, див. рис.9.

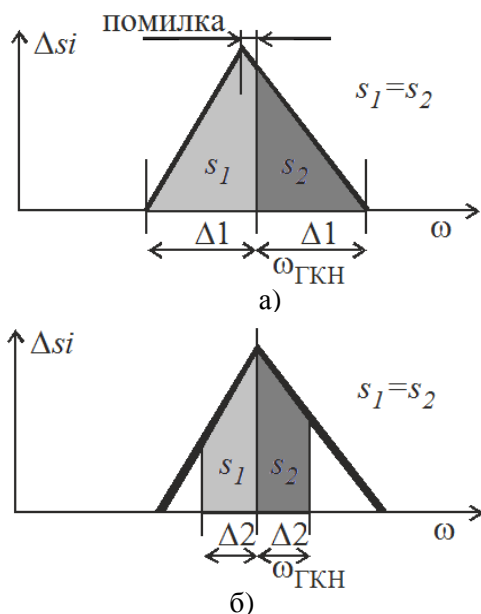


Рисунок 9 - Вплив ширини смуги опрацювання на точність налаштування ГКН при несиметричній спектральній щільності вхідного сигналу

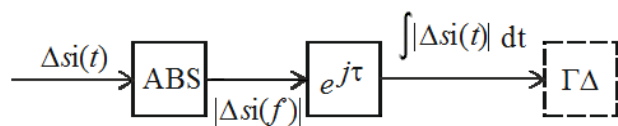
Щоб збільшити точність опрацювання вхідного сигналу, частота генератора  $G\Delta$  зменшується. Це призводить до звуження ділянки між частотами дискретизації, знижує вимоги до симетричності спектральної щільності вхідного сигналу і підвищує точність налаштування частоти ГКН.

Якщо частота генератора дельта частоти  $G\Delta$  буде залежати від напруги, то ширину смуги опрацювання можна змінювати в процесі налаштування. Первинним є налаштування  $fn(t)$  ГКН на середину спектральної щільності вхідного сигналу  $\omega_0$ . Після налаштування частоти ГКН сигнал помилки  $\Delta si(t)$  зменшується до 0. Модуль цього сигналу із затримкою використовується для управління частотою  $G\Delta$ . При значному відхиленні частоти ГКН від  $\omega_0$  частота  $G\Delta$  також висока. При зменшенні відхилення зменшується помилка  $\Delta si(t)$  і за нею із затримкою буде зменшуватися частота  $G\Delta$ . Це призведе до звуження частотної смуги опрацювання вхідного сигналу.

Структурна схема підсистеми керування частотою  $G\Delta$  подана на рис.10.

За допомогою описаних схем пристрій налаштовується на частоту в середині спектральної щільності вибраної смуги. Результатом роботи підсистем є сигнал  $fnd(t)$  із частотою в  $n$  разів вищою за частоту основної гармоніки  $\Omega_0$ . Використовуючи  $fnd(t)$  після ділення його по черзі на  $n/2, n/3$  і т.д. отримуємо сигнал  $fn(t)$  із частотами рівними 2, 3 і т.д. гармоніки першої моди сенсора (струни).

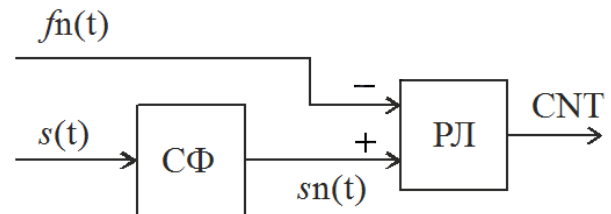
Після налаштування на частоту першої моди визначаємо коефіцієнт відношення частоти  $n$ -ої гармоніки першої моди до частоти  $n$ -ої моди за (4).



**Рисунок 10 - Структурна підсистема керування шириною частотної смуги опрацювання вхідного сигналу**

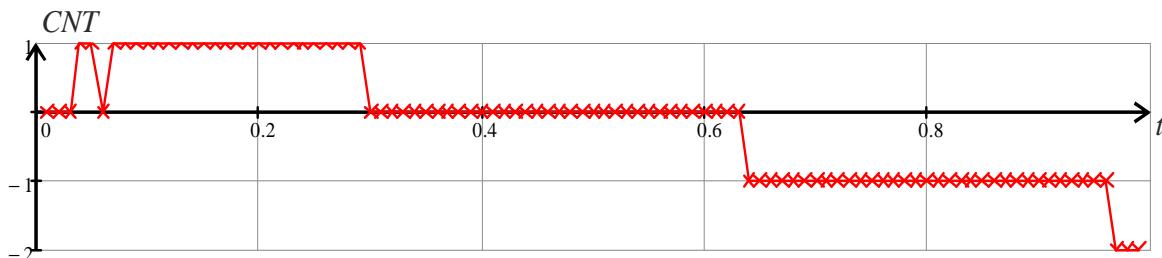
Вхідний сигнал  $s(t)$ , який містить спектральні складові частот коливання сенсора (струни), надходить на додатковий смуговий фільтр, який виділяє смугу частот в околі частоти коливання  $n$ -ої моди  $sn(t)$ . Сигнал опорної частоти надходить на вхід віднімання реверсивного

лічильника, див.рис.11, а сигнал із виходу фільтра - на вхід додавання реверсивного лічильника. На виході реверсивного лічильника формується сигнал різниці між частотою моди і опорною частотою  $CNT = sn - fn$ .



**Рисунок 11 - Структурна схема блоку визначення різниці частот діагностичного сигналу**

Таким чином, різниця частот використовується як вихідна інформація про відхилення частоти моди і гармоніки діагностичного сигналу. При малій різниці між частотами сигналів  $fn(t)$  і  $sn(t)$  вихідний сигнал  $CNT$  за час вимірювання частоти змінюється дискретно, див.рис.12.



**Рисунок 12 - Форма сигналу різниці частот на виході реверсивного лічильника**

Різницю частот можна вимірювати за допомогою безпосереднього відліку, тобто протягом певного часу рахувати імпульси  $fn(t)$  і  $sn(t)$ , після чого шукати їх частку за (3).

В результаті проведених наукових та експериментальних досліджень вперше запропоновано використовувати відносну, приведену до номера гармоніки першої моди, зміну частоти коливання діагностичного сигналу, при виявленні структурних змін в металевих компонентах механічних конструкцій у експлуатаційних умовах.

Розроблено відповідні структурні, схемотехнічні та алгоритмічні рішення цифрової системи формування та опрацювання діагностичних сигналів, що реалізується на основі запропонованого методу. Основними перевагами реалізованого пристрою є функціональні компоненти для автоматичного налаштування частоти опорного генератора із керуванням шириною смуги опрацювання. Крім того, враховуючи високу стабільність параметрів сенсора - струни та її низьку вартість, запропонований механізм збудження

коливань розширює функціональні можливості використання запропонованого методу.

1 В. В. Панасюк, *Механіка руйнування і міцність матеріалів*. Т. 5 (ISBN 966-02-1735-8).

2 Ю.Й. Стрілецький. Використання коливань струни для збудження хвиль в металі. *Методи та прилади контролю якості №37*, 2016, Ст. 79-84.

3 Новицкий, П. В. *Цифровые приборы с частотными датчиками [Текст]* / П. В. Новицкий, В. Г. Кнорринг, В. С. Гутников. – Л. : Энергия, 1970. – 424 с.

4 Бернштейн М. Л. *Структура и механические свойства металлов* // М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. М.- Металлургия. 1970. 472с.

5 Коллинз Дж. *Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ.*- М.: Мир, 1984.- 624с.

6 R. S. Lakes, *Viscoelastic measurement techniques/ Review of scientific instruments* Vol. 75, No. 4, 2004. p.797-810.

7. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник*/В.В. Клюев, Ф.Р.

Соснин, В.Н. *Филинов и др.; М.: Машиностроение, 1995. –488с.*

8. Ф. Крауфорд, *Волны*/ М.: Наука: 1984.

9. H.A.C. Tilmans, *Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: I. Lumped-parameter systems*//*Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 6, No. 1: 359 (1996).

10 H.A.C. Tilmans, *Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: II. Distributed-parameter systems*// *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Vol.6 No.4 1997. 285.

11. Стрілецький Ю. Й., Ровінський В. А. *Спосіб виявлення зміни пластичних властивостей металеві пластини за частотами мод натягнутої над нею струни* // *Металлофізика і новітні технології*. 2017. Т. 39, вип. 10. С. 1377–1393

**Поступила в редакцію 13.05.2018 р.**  
**Рекомендували до друку: докт.техн.наук,**  
**проф. Райтер П. М., докт. техн. наук, проф.**  
**Олійник А. П.**