

УДК.631.356.26

## МЕТОДИ ОПРАЦЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЧАСТОТНОЇ СТРУКТУРИ ПРИ ОЦІНЦІ ДОВГОВІЧНОСТІ

Ріпецький Є. Й., д.т.н., доцент, Ріпецький Р.Й., к.т.н., доцент

(Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
м. Івано-Франківськ)

*Відзначено, що в несучих системах мобільних сільськогосподарських машин відбуваються складні багаточастотні процеси, які суттєво впливають на міцність й довговічність несучих конструкцій. Оцінку довговічності несучих систем мобільних сільськогосподарських машин запропоновано проводити за амплітудно-частотною характеристикою навантаження. Спектр силового навантаження отримано методом швидкого перетворення Фур'є для дискретних даних із використанням програм аналізаторів спектра.*

**Постановка проблеми.** Експериментальні дані експлуатаційного навантаження засвідчили, що у сільськогосподарських машинах протікають складні багаточастотні стохастичні процеси, які суттєво впливають на міцність і довговічність несучих конструкцій. Під час виконання технологічного процесу елементи несучих систем зазнають силового впливу, яке включає навантаження різної частоти і амплітуди, що приводить до зміни згинальних напружень в несучих системах. Вказаний процес представляє собою змінну складову навантаження з низькими частотами і великими амплітудами. На ці навантаження накладаються високочастотні складові з меншою амплітудою, викликані випадковими та вібраційними процесами від незрівноваженості обертових мас двигуна і робочих органів, ґрунтового фону та ін.

Накладання високочастотної складової (вібрації) на основний цикл змінних напружень викликає прискорене накопичення втомних пошкоджень і приводить до суттєвого зниження циклічної довговічності матеріалів і зварних конструкцій, зародження тріщин на більш ранній стадії роботи машин [1].

Тому підвищення ефективності оцінки довговічності можливо шляхом подання експлуатаційного навантаження у вигляді спектра силового впливу, що включає розподіл навантаження за різними частотами та амплітудами і тим самим дозволить встановити долю кожної частоти у руйнуванні конструкції.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Зменшення довговічності матеріалів від вібраційної складової при двочастотном навантаженні було досліджено авторами в роботі [2] та встановлено негативну роль у збільшенні відносних значень амплітуди і частоти. Якісна оцінка довговічності несучих мобільних машин можлива при аналізі частотного спектру напружень в

металоконструкціях. Отриманий при цьому енергетичний спектр дозволяє оцінити при яких частотах інтенсивність коливань має максимальне значення [3].

Загальною тенденцією отримання точних частотних характеристик навантажень є опрацювання записів напружень у визначених перетинах конструкції за використанням сучасного програмного забезпечення (STATISTICA, Mathematics) [4]. Однак, робота в названих пакетах супроводжується складністю інтерактивного виділення фрагментів із загальної запису на опрацювання даних.

**Постановка завдання.** Визначення реальної динаміки навантаженості несучих систем можливо шляхом проведення ґрунтовних експериментальних досліджень у натурних умовах експлуатації машини. Для дослідження динамічної навантаженості сільськогосподарських машин розроблено і успішно використовується спеціальна універсально-вимірювальну систему (УВС) на базі мікропроцесорної техніки [5]. Основною базою технічної складової УВС є мікрокомп'ютер, тензометричні датчики, підсилювачі сигналів, засоби відображення інформації. Спеціальне програмне забезпечення УВС призначене для синхронної реєстрації величин та відображення інформації на екрані від різних типів датчиків у реальному масштабі часу. Результати тензометрування записуються у файл цифрового формату із заданою частотою дискретизації. Розроблена програма дозволяла виводити на екран у вигляді графіків кожен записаний показник шляхом вказування відповідних каналів виводу.

Подальші опрацювання експериментальних даних експлуатаційного навантаження у напрямку оцінки довговічності несучих систем полягають у знаходженні усереднених статистичних показників (максимального, мінімального середнього значення напружень і середньоквадратичного відхилення), а також в отриманні спектра навантаженості за частотами. Так як програмне забезпечення УВС ці функції не виконує, тому необхідно було визначитися з додатковими програмами, які могли б вирішувати вказані дві задачі як статистичного опрацювання даних, так і проведення спектрального аналізу за частотами експлуатаційного навантаження.

**Мета роботи** полягає у розширенні функціональних можливостей УВС шляхом адаптації існуючих програмних продуктів для аналізу спектральних характеристик експлуатаційного навантаження при оцінці довговічності несучих систем машин.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розширення функції УВС можливо шляхом залучення додаткових програм з опрацювання експериментальних даних. Експериментальні дані експлуатаційного навантаження являють собою числові записи значень сигналів з датчиків і записані через заданий інтервал часу, який задається частою дискретизації  $\Delta t$ . В такому випадку, вихідні дані однієї програми будуть виступати як вхідні дані для інших програм. Вибір програмного продукту повинен базуватися на можливостях опрацьовувати вихідну інформацію і виконувати потрібні

розрахункові операції.

Розширення функцій УВС розглянуто за рахунок додаткових програмних модулів: пакету Matlab [6] та програми Bard [7].

Узгодження даних програмного забезпечення УВС з додатковими програмними модулями здійснено через процедуру переіндексацію файлів. Підготовчі процедури пов'язані з тим, що прикладні програми Matlab і Bard можуть опрацювати дані тільки з одного взятого каналу. Зміст переіндексації файлів цифрових записів полягав у формуванні масивів даних з однотипних каналів. Це дозволяє згрупувати дані з окремих каналів, їх відсортувати і, тим самим, надати даним форму придатну для опрацювання у прикладних програмах (рис. 1).

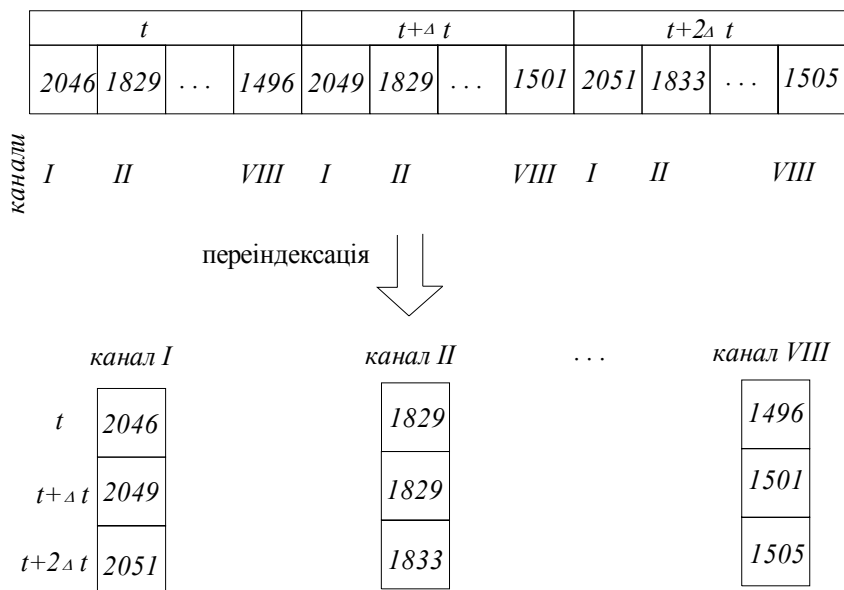


Рисунок 1 - Переіндексація дискретних сигналів при опрацюванні файлів цифрових даних

Таким чином, як що під час експерименту дані з кількох датчиків записуються у файл послідовно у вигляді цифрових сигналів, то після виконання процедури переіндексації можуть бути сформовані окремі масиви даних з однойменних датчиків. Сформовані масиви представляють собою сигнали про навантаженість з інтервалом часу, що визначається частотою дискретизації й становить  $\Delta t$ . Отримані масиви з однойменних датчиків були вже придатні для подальших процедур опрацювання.

Наступна задача з обробки експериментальних даних передбачала аналіз складних багаточастотних процесів, які суттєво впливають на міцність й довговічність несучих конструкцій. Аналіз частотної структури навантаження запропоновано здійснювати на засадах амплітудно-частотної характеристики. Теоретичним підґрунтям опрацювання експериментальних даних обрано спектральний аналіз. Даний аналіз ґрунтується на методі дискретного перетворення Фур'є, за яким отримують пару перетворень, що встановлює

залежність між кінцевим числом дискретних вибірок значень напружень  $\sigma_k$  часової функції  $f(t)$  та її частотного спектра  $S(\sigma_k)$  [8].

Так, для  $2 \cdot N$  рівновіддалених вибірок у точках маємо такі залежності:

$$t_k = t_0 + k \cdot \Delta t, \quad n = 0, 1, \dots, 2 \cdot N - 1$$

$$k = 0, 1, \dots, 2 \cdot N - 1;$$

$$\sigma_k = \sigma_0 + n \cdot \Delta \sigma,$$

$$S(\sigma_k) = \Delta t \cdot \sum_{t=0}^{2 \cdot N - 1} f(t_k) \cdot \exp(-i \cdot 2\pi \cdot \sigma_n \cdot t_k), \quad (1)$$

$$n = 0, 1, \dots, 2 \cdot N - 1$$

$$f(t_k) = \Delta \sigma \cdot \sum_{n=0}^{2 \cdot N - 1} f(v_n) \cdot \exp(-i \cdot 2\pi \cdot \sigma_n \cdot t_k), \quad k = 0, 1, \dots, 2 \cdot N - 1. \quad (2)$$

При цьому функція  $S(\sigma_k)$  називається спектром щільності енергії та характеризує відносний вклад різних частотних складових у загальну енергію. Для її обчислення за виразами (1) – (2) використовують ефективний алгоритм швидкого перетворення Фур'є [8, 9], який реалізується у прикладних пакетах.

Такою програмою було обрано програму *VarD*, відому як аналізатор спектру сигналів. Програма *VarD* для двох груп дискретних часових вибірок даних  $x$  і  $y$  з довірчим інтервалом їх значень дозволяє розрахувати такі спектральні функції:

- спектральну щільність енергії сигналу  $x$  і його довірчий діапазон;
- спектральну щільність енергії сигналу  $y$  і його довірчий діапазон;
- взаємною спектральною щільності сигналів  $x$  і  $y$  і його довірчий діапазон;
- комплексну передавальну функцію від  $x$  до  $y$ ;
- функцію кореляції між спектральними щільностями енергії  $x$  і  $y$ .

Програма *VarD* має дві вкладки. Перша вкладка (рис.2 а) відображає сигнал експериментальних даних. Як вже наголошувалось у цьому вікні програми може відобразитися сигнал тільки від одного каналу, тому попередньо була передбачена переіндексація даних.

Враховуючи можливості програми *VarD* опрацювати дані частотної структури, вона була адаптована до аналізу експериментальних даних навантаженої несучих систем (рис. 2).

Друга вкладка призначена для спектрального аналізу обраного сигналу й складається з двох частин (рис. 2 б, в). У верхній частині вікна (рис. 2 б) виводиться таблиця, в якій перераховані всі отримані гармоніки, їх амплітуди, частота й початкові фази, а також вказано загальну кількість утворених гармонік за допомогою індексу Фур'є. У нижній частині вікна «Спектральний аналіз» (рис. 2 в) відображаються результати перетворення Фур'є у вигляді амплітудно-частотної характеристики.

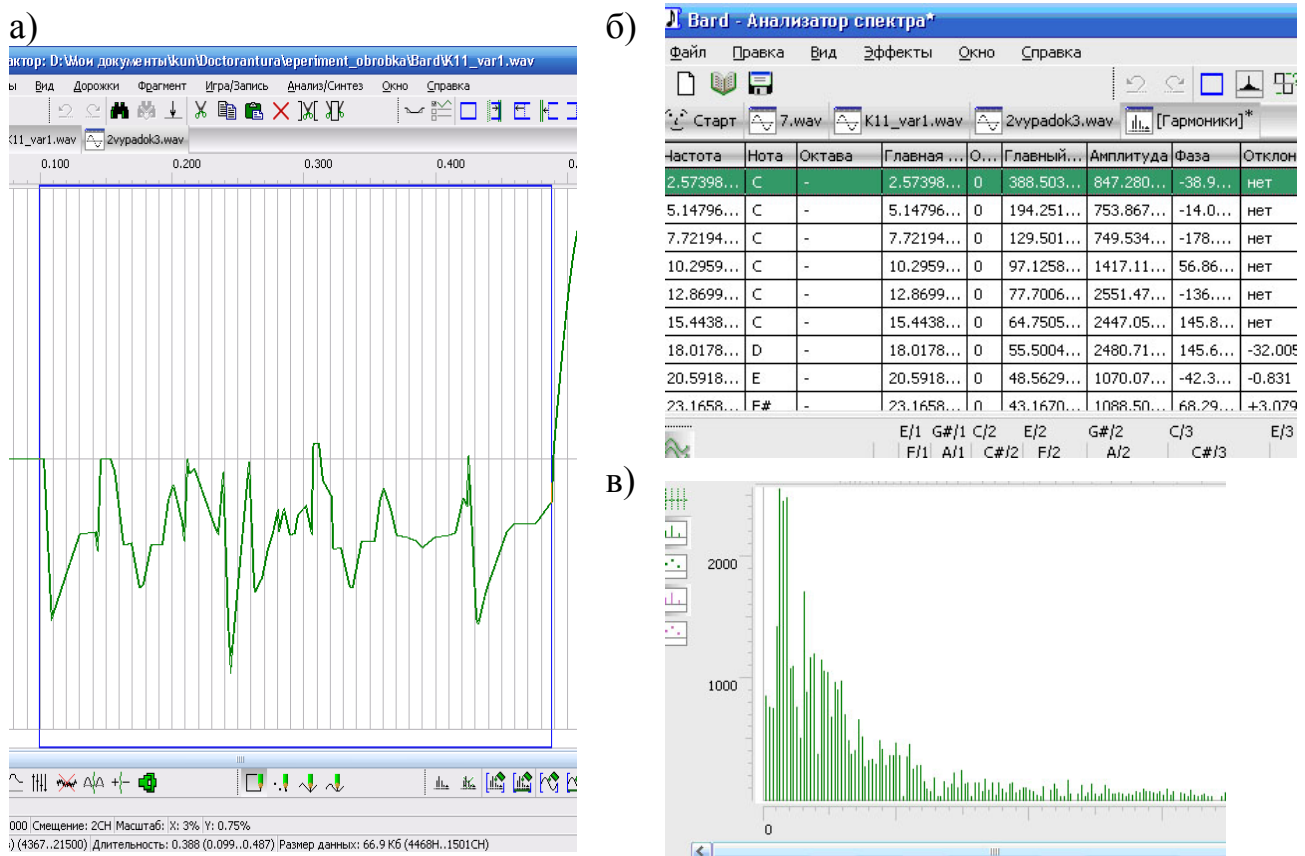


Рисунок 2 - Визначення амплітудно-частотної характеристики експлуатаційного навантаження у програмі Bard

а) сигнал експлуатаційного навантаження, б) вікно гармонік, в) вкладка «Спектральний аналіз».

Наявність двох вікон дозволяє переглядати фрагмент процесу перед тим, як проводити його спектральний аналіз. Крім того, можна виділити потрібний фрагмент. При цьому, чим більший фрагмент виділяється, тим більше часу потрібно на його розрахунки, що проявляється у кількості отриманих гармонік.

Адаптація програми Bard для розрахунку за частотними характеристиками полягала у проведенні додаткових налаштувань параметрів програми. Вони були спрямовані на відключення гармонік, які за своєю амплітудою знаходяться в зоні гігациклового навантаження і не впливають на втомну довговічність конструкції.

Вказана методика була випробувана при дослідженні несучих систем грейферного навантажувача ПЕА-1,0 «Карпатець». Дослідження проводилися при виконанні навантажувачем технологічного циклу зі встановленням машини на домкрати. Отримані експериментальні дані експлуатаційного навантаження були направлені на опрацювання в програми Matlab та Bard.

Процедури статистичної обробки результатів здійснювалися у пакеті Matlab. Для вказаного фрагмента (рис. 3 а) за допомогою пакета Matlab встановлено такі фактичні значення напружень: мінімальні – 27,32 МПа, максимальні – 42,28 МПа; середньоарифметичні – 34,61 МПа; середньоквадратичні відхилення – 2,4 МПа; коефіцієнт варіації – 0,0701.

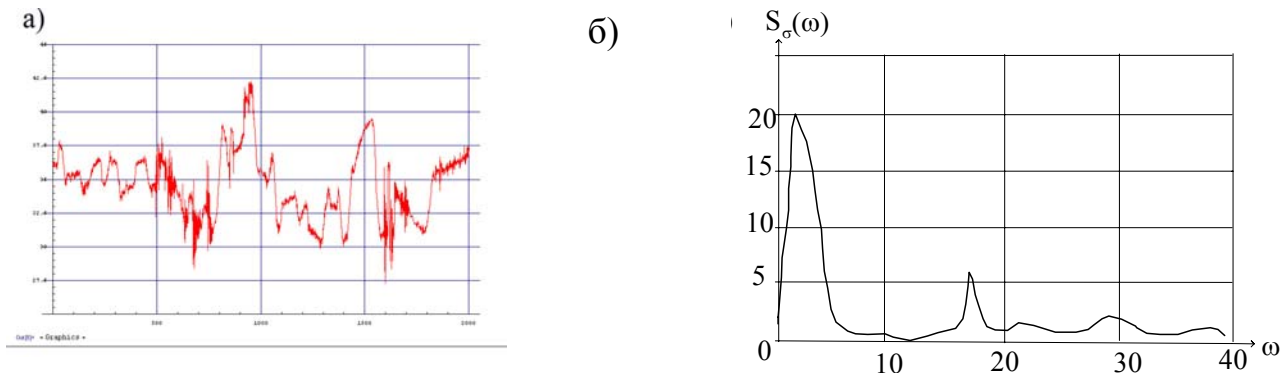


Рисунок 3 - Результати тензометричних досліджень НДС несучої рами навантажувача ПЕА-1А «Карпатець»:

а) експлуатаційне навантаження; б) графік спектральної щільності

Спектральні щільності випадкових напружень в діапазоні від 0 до 40 Гц. отримано у програмі Bard (рис. 3 б). Показано, що процес являє собою змінну складову навантаження з низькою частотою 0,8 – 1,7 Гц та амплітудою 18 – 20 МПа. На ці навантаження накладаються високочастотні складові частотою 15 – 18 Гц з амплітудою до 5 МПа, які викликані випадковими факторами.

Проведені розрахунки на довговічність рами навантажувача за теорією накопичення пошкоджень [2] показали, що поява, низькочастотних амплітуд в експлуатаційному спектрі навантаження знижує довговічність рами на 25–35%.

### Висновки

Запропоновано і показано ефективність методів опрацювання експериментальних даних експлуатаційного навантаження частотної структури для оцінки довговічності мобільних сільськогосподарських машин. Обробка експериментальних даних передбачена в програмах Matlab та Bard. Показана ефективність аналізу навантаження з отриманням спектру щільності за алгоритмом швидкого перетворення Фур'є для дискретних даних із використанням програм аналізаторів спектру.

Метод застосовано при оцінці довговічності несучих систем навантажувача ПЕА-1,0 «Карпатець». Відзначено наявність двох частот напружень в спектрі навантаження і показано негативний вплив на довговічність високочастотної складової.

### Список літератури

1. Підгурський М.І. Оцінка впливу дефектності зварних з'єднань на надійність сільськогосподарської техніки / М.І.Підгурський, Т.І.Рибак, М.Я.Сташків // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка "Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва". – Харків, 2007. – Вип.51. – С.289–295.

2. Труфяков В.И. Долговечность и трещиностойкость при двухчастотном нагружении / В.И. Труфяков, В.С. Ковальчук // Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. – К.: Наук. думка, 1990. – С. 221–237.

3. Черняк А.Ю. Модальный анализ рам тележек тягового подвижного состава [Текст] / А.Ю. Черняк, Е.О. Гриндей, П.А. Гриндей // Вісник СНУ ім. В. Даля. – № 5 (147). – Частина 1. – 2010. – С. 46 – 50.
4. Саркисян Н.Н. Спектральные характеристики нагруженности элементов конструкций при случайном нагружении //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2000. Т. LIII, Машиностроение № 1. – С. 22–27
5. Рибак Т.І. Метрологічне забезпечення експериментальних досліджень динаміки грейферних навантажувачів [Текст] / Т.І. Рибак, М.І. Підгурський, Є.Й. Ріпецький, М.Я. Сташків. П.В. Паламарчук // Вісник Львівського національного університету. Агро. – Львів. – 2011. – №15. – С. 151 – 158.
6. Кетков Ю.Л. Matlab 7: Программирование, численные методы [Текст] / Ю.Л. Кетков. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 752 с.
7. Звуковой редактор – Bard – Справка по программе [режим доступа]: <http://psi-logic.shadanakar.org/bard/help/edit.htm>
8. Cooley J.W., Lewis P.A. W., Welch P.D. The fast Fourier transform algorithm: Programming considerations in the calculation of sine, cosine and Laplace transforms. J. Sound Vib. 12, 1970. – P. 315 – 337.
9. Бэдсел Ч. Физика плазмы и численное моделирование [Текст] / Ч. Бэдсел, А. Ленгдон.

#### Аннотация

### МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ ЧАСТОТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Ріпецький Е. Й., Ріпецький Р. Й.

*Отмечено, что в несущих системах мобильных сельскохозяйственных машин происходят сложные многочастотные процессы, которые существенно влияют на прочность и долговечность несущих конструкций. Оценку долговечность несущих систем предложено проводить за амплитудно-частотной характеристикой нагрузки. Спектр силового нагрузки получен методом быстрого преобразования Фурье для дискретных данных с использованием программ анализаторов спектра.*

#### Abstract

### METHODS FOR EXPERIMENTAL DATA PROCESSING OF FREQUENCY STRUCTURE SERVICE LOAD WHILE DURABILITY EVALUATION

Y. Ripetskiy, R. Ripetskiy

*It has been noted that complicated multi-frequency processes take place in bearing systems and these processes have a significant impact on strength and durability of bearing constructions. Evaluation of bearing system durability has been offered to be carried out applying a load amplitude-time characteristic. Spectrum of power load has been obtained by a fast Fourier transform for discrete data employing spectrum analysis software.*