

*Синтезирована оптимальная система обнаружения и оценки скачков амплитуды вибраций динамических объектов*

*Ключевые слова: моделирование, диагностика, вибрации, апостериорная плотность вероятности*

*Проанализованы результаты моделирования оптимальной системы выявления и оценивания стрибків амплітуди вібрацій динамічних об'єктів*

*Ключові слова: моделювання, діагностика, вібрації, апостеріорна щільність імовірності (АЩІ)*

*The simulation of the optimal system of vibration amplitude jumps detection and estimation is analyzed for dynamic objects*

*Key words: simulation, diagnostic, vibration, posteriori probability density*

# РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ І ОЦІНЮВАННЯ СТРИБКІВ АМПЛІТУДИ ВІБРАЦІЙ

**О.В. Полярус**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри\*

**В.В. Барчан**

Аспірант\*

Контактний тел.: 063-411-85-93

\*Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності  
Національний автомобільно-дорожній університет  
вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002

## 1. Вступ

Моніторинг стану складних динамічних конструкцій є необхідною умовою забезпечення безпечної експлуатації об'єктів продовж тривалого строку в умовах випадкових імпульсних навантажень різної тривалості. Своєчасна діагностика дозволяє попередити розвиток та визначити положення структурних дефектів з метою їх подальшого усунення. Останнім часом для діагностики вузлів та елементів конструкцій спеціалістами широко застосовуються засоби неруйнівного контролю (НК). Різноманітність методів НК зумовлена особливостями архітектури, географії та умовами експлуатації об'єктів дослідження. Інформацію про стан конструкції можуть нести різноманітні фізичні параметри. Джерелом діагностичної інформації можуть бути вібрації конструкцій. Наявність дефектів та порушень в конструкції призводить до зміни спектра вібрацій. Особливу небезпеку становлять швидкі змінювання, які умовно називаються стрибками параметрів вібрацій (амплітуди, фази, частоти тощо). Вимірювання стрибків параметрів звичайними приладами є проблематичним. І тому виникає задача створення вимірювальних систем, що здатні зафіксувати ці змінювання і оцінити їх характеристики.

## 2. Аналіз публікацій

Питанням виявлення швидких змінювань в динамічних системах присвячена робота [1]. В [2] приведений алгоритм оцінювання моменту стрибкоподібного змінювання статистичних характеристик випадкового процесу. Нами в [3] синтезована схема оптимального виявлення і оцінювання стрибків амплітуди вібрацій динамічних об'єктів і оцінені її характеристики для окремих випадків.

## 3. Мета і постановка задачі

В [3] приведені тільки окремі кількісні оцінки синтезованої системи виявлення стрибків амплітуди вібрацій. Метою статті є проведення аналізу якісних показників роботи зазначеної системи в широкому діапазоні умов і узагальнення результатів математичного моделювання.

Розглядається деякий динамічний об'єкт (машина, технічна споруда тощо), що знаходиться під впливом вібрацій. Параметри вібрацій визначаються методом дистанційного зондування з застосуванням надвисокочастотних або лазерних сигналів. Відбитий від об'єкта сигнал обробляється в приймачі, що містить

систему виявлення і оцінки стрибків амплітуди вібрацій. Априорна інформація про виникнення стрибка амплітуди задається нормальним законом розподілу  $P_{\tau_{\text{сп}}} (t)$ , що дозволяє моделювати роботу системи з різною достовірністю цієї інформації. Потрібно проаналізувати і узагальнити поведінку оптимальної системи виявлення і оцінки стрибків амплітуди вібрацій в різних умовах, тобто дати аналіз ймовірності стрибка амплітуди, його абсолютної величини і точності визначення.

**4. Основні математичні співвідношення, на яких ґрунтується робота системи**

Сигнал, що поступає на вхід оптимального приймача, являє собою адитивну суму синусоїдального сигналу амплітудою  $A$ , частотою  $\omega$  і фазою  $\phi_0$  та білого гаусівського шуму частотою  $n(t)$  з спектральною щільністю  $N$ . В момент часу  $\tau_{\text{сп}}$  з'являється стрибок амплітуди  $\Delta A$  з дисперсією  $\sigma_{\Delta A}^2$ . Вид сигналу зображений на рис. 1 і описується залежністю:

$$y(t) = \begin{cases} A \cdot \sin(\omega t + \phi_0) + n(t) & \text{при } t \leq \tau_{\text{сп}}, \\ (A + \Delta A) \cdot \sin(\omega t + \phi_1) + n(t) & \text{при } t > \tau_{\text{сп}}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $A$  - амплітуда сигналу,  $\Delta A$  - величина стрибка амплітуди,  $\tau_{\text{сп}}$  - момент стрибка амплітуди сигналу із значення  $A_0(\tau_{\text{сп}})$  до  $A_1(\tau_{\text{сп}})$ ;  $t > 0$  - час;  $\phi_0(t), \phi_1(t)$  - фази сигналу до появи стрибка та після нього відповідно;  $n(t)$  - білий гаусівський шум з нульовим середнім та спектральною інтенсивністю  $N$ .

В [3] синтезована оптимальна система виявлення і оцінки стрибка амплітуди вібрацій, робота якої описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = P_{\tau_{\text{сп}}} (t)e^{-z} + \frac{1}{N} \cdot p_1 \cdot (1 - p_1) \left\{ q_1 \cdot \Delta \hat{A}_1 - \frac{1}{2} \sigma_{\Delta A_1}^2 - \frac{1}{2} \Delta \hat{A}_1^2 \right\}, & (2) \\ \frac{dz}{dt} = \frac{p_1}{N} \left\{ q_1 \cdot \Delta \hat{A}_1 - \frac{1}{2} \Delta \hat{A}_1^2 - \frac{1}{2} \sigma_{\Delta A_1}^2 \right\}, & (3) \\ \frac{d\Delta A_1}{dt} = q_2 \cdot (\Delta \hat{A}_0 - \Delta \hat{A}_1) + V_1(t) \cdot \frac{1}{N} \cdot [q_1 - \Delta A_1], & (4) \\ \frac{dV_1}{dt} = q_2 \cdot \left[ (\Delta \hat{A}_0 - \Delta \hat{A}_1)^2 + V_0 - V_1 \right] - \frac{1}{N} \cdot V_1^2, & (5) \end{cases}$$

де:

$$q_1 = 2y(t)\sin(\omega t + \phi_1) - A \cdot \cos(\phi_0 + \phi_1), \quad q_2 = \frac{1}{p_1} \cdot P_{\tau_{\text{сп}}} (t) \cdot e^{-z},$$

$p_1$  - апостеріорна ймовірність виявлення стрибка амплітуди,  $\Delta \hat{A}_1$  - оціночне значення стрибка амплітуди,  $\Delta \hat{A}_0 = \Delta \hat{A}_1|_{t=0}$  - оціночне значення стрибка амплітуди в момент часу  $t = 0$ ,  $\sigma_{\Delta A_1}^2$  - дисперсія стрибка амплітуди,  $V_0, V_1$  - елементи коваріаційної матриці похибок до і після стрибка відповідно,  $z$  - безрозмірний параметр, який характеризує швидкість спрацювання оптимальної схеми при виявленні стрибка.

Розв'язання диференціальних рівнянь проводиться при початкових умовах:

$$\begin{cases} \Delta \hat{A}_1|_{t=0} = \Delta \hat{A}_1, \quad V_1(t)|_{t=0} = V_0, \\ p_1(t)|_{t=0} = \int_{-\infty}^0 P_{\tau_{\text{сп}}} (\tau_{\text{ск}}) d\tau_{\text{сп}}, \quad z(t)|_{t=0} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

**5. Результати математичного моделювання**

В [3] дана оцінка впливу априорного розподілу часу виникнення стрибка амплітуди на ймовірність виявлення стрибка. На практиці час виникнення стрибка параметра вібрації може бути заздалегідь відомий з деякою точністю. Наприклад, при визначенні коефіцієнта динамічності моста на останній у відомий для експериментатора час діє імпульсне навантаження, в результаті чого можуть істотно змінюватись параметри вібрацій об'єкта. При дистанційному зондуванні об'єкта можливе стрибкоподібне змінювання всіх або окремих параметрів вібрацій: амплітуди, фази, затримки, доплерівського зміщення частоти. Приклад відбитого від об'єкта сигналу зі стрибком амплітуди показаний на рис. 1. Відношення сигнал/шум до стрибка дорівнювало при моделюванні одиниці. Під час стрибка амплітуда збільшувалась в 5 раз.

Найсильніше впливають на змінювання ймовірностей виявлення стрибка енергетичні параметри сигналу, до яких відноситься, зокрема, амплітуда. На рис. 2 приведена динаміка ймовірності виявлення стрибка амплітуди для випадку, який ілюструється на рис. 1. Спостерігається значна інерція в розвитку  $p(t)$ . Важливе для практики значення  $p_1 = 0,8$  з'являється більше ніж через  $3\sigma$  після моменту стрибка, причому при наявності хоча б незначних априорних відомостей про стрибок еволюція ймовірності  $p_1(t)$  (крива 1) більш динамічна, ніж при відсутності подібних відомостей (крива 2).

Високе значення ймовірності ( $p_1 \approx 0,9$ ) з'являється приблизно через  $7-8\sigma$  після стрибка. Для задач діагностики об'єкта такі затримки у визначенні  $p_1$  мало впливають на очікуваний результат. Сама швидкість спрацювання оптимальної системи у відносних одиницях описується другим диференціальним рівнянням (3) системи і представлена на рис. 3. Найбільша швидкість досягається при досягненні великих значень ймовірності виявлення стрибка амплітуди.

Оптимальна система дозволяє оцінити величину стрибка амплітуди (рис. 4), а також точність його визначення, що виражена через середньоквадратичне значення похибки стрибка (рис. 5). З рис. 5 випливає, що наявність априорних даних може суттєво знизити дисперсію стрибка або підвищити точність його визначення. Отже, оптимальну схему виявлення і оцінки стрибків параметрів вібрації можна рекомендувати частіше використовувати в умовах наявності яких-небудь відомостей про стрибок, в першу чергу, про час його виникнення.

Залежності, що приведені на рис. 3...5, є характерними для більшості практичних ситуацій. При відсутності априорних даних та при невеликих амплітудах та тривалостях стрибків ймовірність їх виявлення є невисокою. Короткочасні стрибки сприймаються системою як викиди шуму і тому не виявляються. Для даної моделі сигналу узагальнена залежність ймовірності виявлення стрибка від тривалості останнього зображена на рис. 6. Зрозуміло, що тривалість стрибка і його амплітуда є енергетичними параметрами і тому суттєво впливають на якісні показники виявлення. Невизначеність даних

про момент появи стрибка характеризується в моделі середньоквадратичним відхиленням часу  $S_{стр}$  (рис. 7). Чим більше  $S_{стр}$ , тим менше система має відомостей про момент виникнення стрибка і тим менше ймовірність виявлення стрибка. Графік, що приведений на рис. 7, характерний для малих амплітуд і тривалостей стрибка.

Якщо апіорні відомості про момент стрибка та час виникнення реального стрибка значно не співпадають, то оптимальна система може і не виявити стрибок з невисокими енергетичними характеристиками (відносно малими амплітудою і тривалістю).

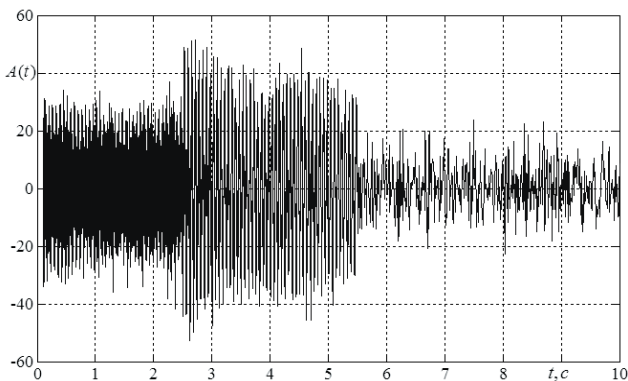


Рис. 1. Вид вхідного сигналу зі стрибком амплітуди в момент часу  $t = 4$  с

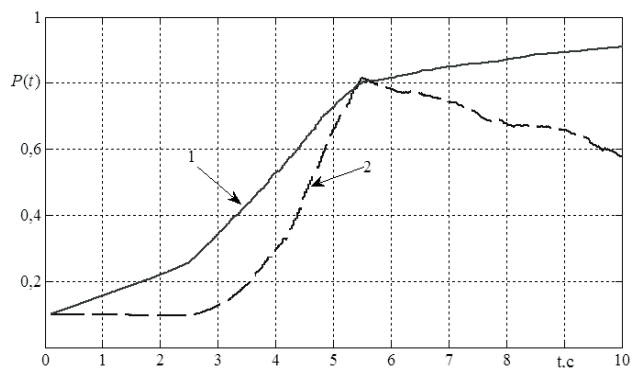


Рис. 2. Залежність від часу ймовірності виявлення стрибка амплітуди при наявності (крива 1) та відсутності (крива 2) апіорних даних про стрибок

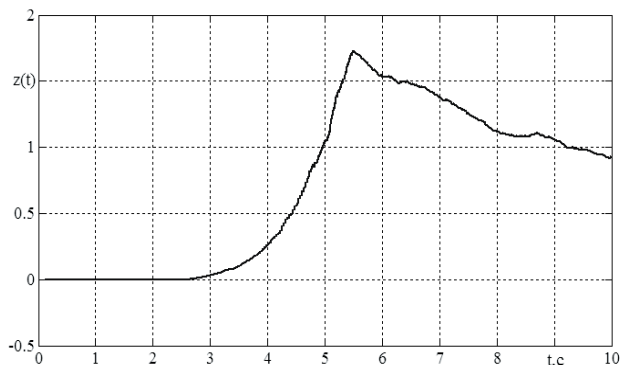


Рис. 3. Залежність від часу швидкості спрацювання оптимальної системи

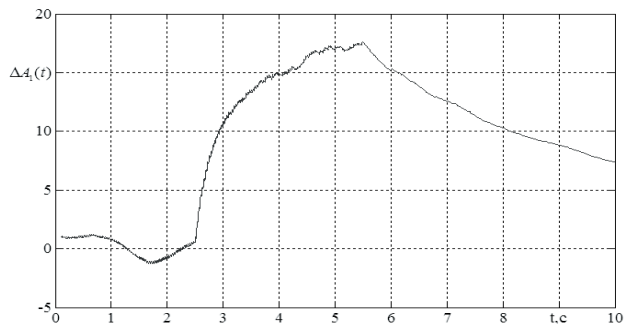


Рис. 4. Змінювання оцінки величини стрибка амплітуди з часом

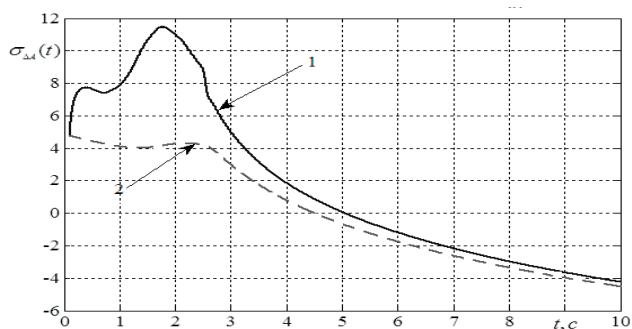


Рис. 5. Змінювання величини середньоквадратичної похибки стрибка з часом за відсутності апіорних значень про появу стрибка амплітуди (крива 1) та за їх наявності (крива 2)

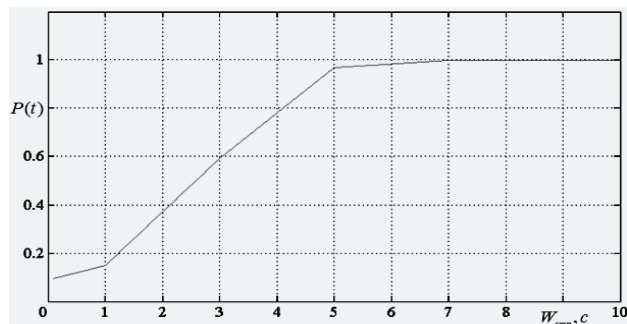


Рис. 6. Залежність ймовірності виявлення стрибка амплітуди сигналу від тривалості стрибка для вибраних в статті вхідних даних

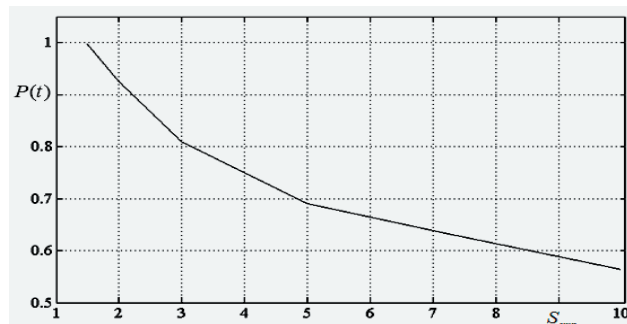


Рис. 7. Залежність ймовірності виявлення стрибка амплітуди від рівня апіорного середньоквадратичного часу відхилення стрибка

### Висновки

Запропонована оптимальна система здатна виявляти та оцінювати стрибки амплітуди луна-сигналу від динамічного об'єкта з високими якісними показниками. Найбільша ймовірність виявлення стрибка амплітуди і його точність досягаються при наявно-

сті надійних апріорних даних про час виникнення стрибка. Цей час може бути відносно точно відомим у випадках експериментальних робіт, що проводяться з динамічними об'єктами.

У цьому випадку оптимальна система може виявляти з високою ймовірністю навіть невеликі і короткочасні стрибки амплітуди.

### Література

1. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем: Пер. с англ./М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банветист и др.; Под ред. М. Бассвиль, А. Банветиста. – М.: Мир, 1989. – 278 с.
  2. Мальцев А.А., Силаев А.М. Оптимальное оценивание момента скачкообразного изменения статистических характеристик случайного процесса. – Изв. вузов. Радиофизика, 1986, №1, с.62-72.
- Полярус О.В., Барчан В.В., Поляков Є.О., Коваль А.О. - Оптимальна система виявлення і оцінювання стрибків амплітуди вібрацій динамічних об'єктів. – Харків: Східно-Європейський журнал передових технологій, 2009, 6/6 (42), с.21-23.

*Запропоновано новий підхід до визначення сил ударної взаємодії у віброударних системах. Розроблено критерії, алгоритми, моделі для верифікації цих сил. Наведено приклад розв'язання модельної задачі*

*Ключові слова: ударна взаємодія, віброударні системи*

*Предложен новый подход для определения сил ударного взаимодействия в виброударных системах. Разработаны критерии, алгоритмы, модели для верификации этих сил. Приведен пример решения модельной задачи*

*Ключевые слова: ударное взаимодействие, виброударные системы*

*A new approach for determining the strength of shock interaction in vibro-impact systems. The criteria, algorithms, models for verification of these forces. An example of solving a model problem*

*Keywords: shock interaction, vibro-impact systems*

УДК 531.8:621.747:539.3

## МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВЕРИФИКАЦИИ СИЛ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ВИБРОУДАРНЫХ СИСТЕМАХ

**А.В. Грабовский**

Младший научный сотрудник

Кафедра «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин»

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Контактный тел.: (057) 707-69-02

E-mail: tma@kpi.kharkov.ua

### Введение и постановка задачи

Как было показано в серии работ [1 - 4], вибрационные машины достаточно широко используются в сельском хозяйстве, строительстве и тяжелом машиностроении, металлургии и других отраслях про-

мышленности. Было показано, что в таких машинах и в настоящее время есть масса проблем, особенно в тяжелонагруженных. Одной из основных проблем является определение внутренней силы ударного взаимодействия, поскольку эта информация является базовой для исследования металлоконструкции