

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КЕПСТРА В АКУСТИЧНІЙ ДІАГНОСТИЦІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ

Юрій Човнюк¹, Михайло Діктерук², Костянтин Почка²

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна
² Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна

IMPROVEMENT OF A METHOD OF A KEPSTR IN ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF CONSTRUCTION CARS AND MECHANISMS

Yuriy Chovnyuk¹, Mykhaylo Dykteruk², Konstantin Pochka²

¹ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, Ukraine
² Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky Prospect, 31, Kyiv, Ukraine

АНОТАЦІЯ. Наведений у роботі підхід дозволяє вдосконалити та уточнити інформативні діагностичні ознаки у задачах акустичної діагностики технічного стану будівельних машин і механізмів за методом кепстру. Сполучення останнього з методом фазових портретів (класичного та вищих порядків) дає змогу виявити основні динамічні процеси (та їхні характеристики), що відбуваються всередині машин/механізмів та більш точно визначати параметри їхнього технічного стану.

Ключові слова: вдосконалення, метод, кепстр, акустична діагностика, технічний стан, будівельні машини, механізми.

АННОТАЦИЯ. Приведенный в работе подход позволяет усовершенствовать и уточнить информативные диагностические признаки технического состояния строительных машин и механизмов методом кепстра. Сочетание последнего с методом фазовых портретов (классического и высших порядков) даёт возможность выявлять основные динамические процессы (их характеристики), которые происходят внутри машин/механизмов и более точно определять параметры их технического состояния.

Ключевые слова: усовершенствование, метод, кепстр, акустическая диагностика, техническое состояние, строительные машины, механизмы.

ABSTRACT. Purpose. The purpose of this work consists in method of a kepstr justification for acoustic diagnostics of technical condition of construction cars and mechanisms. **Methodology/approach.** Researches in this work are of analytical character. **Findings.** Use of this combined diagnostic sign together with a method of phase portraits (classical and of the highest orders) allows to improve process of an identification of key parameters of technical conditions of construction cars and mechanisms, especially in transitional modes of their functioning. **Research limitations/implications.** The results received in work can be used further for specification and improvement of existing engineering methods of acoustic diagnostics of technical condition of construction cars and mechanisms identification at stages of their design/designing and in modes of real operation as well. **Originality/value.** The work has scientific and practical interest.

Key words: improvement, method, kepstr, acoustic diagnostics, technical condition, construction cars, mechanisms.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відомо, що вибір діагностичних ознак є найбільш важкою частиною задачі акустичної діагностики технічного стану будівельних машин і механізмів. За невдалого вибору діагностичних ознак їхні зміни від збільшення чи зменшення параметрів можуть виявитись недостатньо великими, у результаті чого випадкові зміни умов вимірювань можуть бути прийняті як зміна внутрішнього стану об'єкта дослідження. У цьому випадку говорять про малу інформативність ознак чи про їхню малу чутливість по відношенню до даних структур-

них параметрів. Основна вимога щодо діагностичної ознаки – максимальна чутливість до одного із структурних параметрів і мінімальна до всіх інших.

При визначенні найбільш інформативних діагностичних ознак слід, взагалі кажучи, знати структуру акустичного сигналу, для чого слід детально дослідити процеси звукоутворення всередині об'єкту діагностики. Однак, пошук ознак є якоюсь мірою й самостійною задачею, пов'язаною з аналізом акустичних сигналів і розробкою алгоритмів для ПЕОМ чи апаратури для їх обробки. У випадках, коли заздалегідь невідома структура машинного сигнала-

лу і, таким чином, незрозуміло, яким є вплив параметрів стану на акустичний сигнал, повинен існувати доволі повний набір різноманітних незалежних характеристик сигналу, серед яких можна обрати дослідним шляхом найбільш чутливі до змін досліджуваних параметрів стану і потім використати їх як інформативні діагностичні ознаки.

Зараз за діагностичні ознаки використовуються найрізноманітніші характеристики акустичних сигналів. Вони зазвичай пов'язані з імовірнісними та спектрально-кореляційними властивостями сигналів. Майже всі ці ознаки разом з деякими іншими, наприклад, амплітудами, частотами і фазами гармонічних сигналів, можна назвати простими на відміну від комбінованих. Останні складаються з простих ознак та підкреслюють якісь особливості машинних сигналів.

Прикладом таких комбінованих ознак є акустичні вектори. Вони є наборами з n простих ознак, за яких потім здійснюються векторні операції: визначаються їх довжини, кути між ними і таке подібне. Досвід показує, що застосування акустичних векторів замість простих ознак, що їх утворюють, знижує ймовірність помилкового діагнозу.

Цікавим прикладом комбінованої діагностичної ознаки є так званий *кепстр*. Ця величина визначається наступною формулою

$$K(\tau) = \left\{ \int_0^{\infty} \lg |F(\omega)|^2 \cdot \cos(\omega \cdot \tau) d\omega \right\}^2, \quad (1)$$

де $F(\omega)$ – спектр потужності сигналу; τ – час; ω – частота сигналу. *Кепстр* – невід'ємна функція часу. Для її отримання (на ПЕОМ), згідно формули (1), слід узяти квадрат модуля спектральної щільності потужності $|F(\omega)|^2$ у логарифмічному масштабі (у δB) та здійснити перетворення Фур'є.

Кепстр суттєвим чином відрізняється від функції автокореляції сигналу $B(\tau)$. Зокрема, згідно теореми Вінера-Хінчина, функція автокореляції $B(\tau)$ випадкового

сигналу $\xi(t)$ та його спектральна щільність потужності $F(\omega)$ пов'язані одна з одною за допомогою звичайного перетворення Фур'є:

$$\begin{cases} B(\tau) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\infty} F(\omega) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot \tau) d\omega, \\ F(\omega) = \int_0^{\infty} B(\tau) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot \tau) d\tau, \quad i^2 = -1. \end{cases} \quad (2)$$

З першої формули (2) при $\tau=0$ безпосередньо визначається рівність

$$\langle \xi^2(t) \rangle = B(0) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\infty} F(\omega) d\omega, \quad (3)$$

яка визначає функцію спектральної щільності потужності $F(\omega)$ випадкового процесу $\xi(t)$.

Для сигналу з рівномірним суцільним спектром потужності обидві функції $B(\tau)$ та $K(\tau)$ не дорівнюють нулю лише у околі $\tau=0$ та представляють собою функції, близькі до $\delta(\tau)$ (дельта-функції П. Дірака). Однак наявність навіть невеликих неоднорідностей функції $F(\omega)$ робить функцію автокореляції $B(\tau)$ відмінною від нуля і за інших затримках часу τ , у той час як *кепстр* $K(\tau)$ залишається близьким до нуля завдяки присутності логарифма, що вирівнює неоднорідності спектра. *Кепстр* стає відмінним від нуля, коли достатньо великі неоднорідності функції $F(\omega)$ мають місце у періодично розміщених точках. Наприклад, якщо на рівномірний суцільний спектр накладається дискретний спектр гармонічного ряду з частотами Ω , $2 \cdot \Omega$, $3 \cdot \Omega$, ... або $\omega_0 \pm \Omega$, $\omega_0 \pm 2 \cdot \Omega$, $\omega_0 \pm 3 \cdot \Omega$, ..., то *кепстр* відмінний від нуля при $\tau=0$ та $2 \cdot \frac{\pi}{\Omega}$ і близький до нуля при інших значеннях τ . Якщо у сигналі присутні кілька гармонічних рядів з періодами Ω_i , то *кепстр* буде відмінним від нуля у точках $\tau_i = 2 \cdot \frac{\pi}{\Omega_i}$.

Таким чином, на відміну від функції автокореляції, *кепстр* чутливий не до всіх неоднорідностей спектра $F(\omega)$, а лише до

неоднорідностей, обумовлених присутністю у сигналі гармонічних рядів, тобто коли у сигналі існує низка періодичних імпульсів або модульованих сигналів. Якщо у сигналі є кілька таких рядів, то практично за видом функції $F(\omega)$ їх неможливо відділити один від одного, оскільки комбінаційні частоти накладаються одна на одну. *Кепстр* для кожного гармонічного ряду приймає значення, положення якого на осі часу визначається періодом Ω_i , а величина – амплітудами усіх гармонік ряду.

Ця властивість *кепстрів* дуже корисна при дослідженні сигналів діагностики будівельних машин та механізмів. Акустичні сигнали таких машин характеризуються наявністю гармонічних рядів різноманітної природи. Амплітуди піків *кепстру* є інформаційними діагностичними ознаками.

Слід зазначити, що у кожному конкретному випадку слід підбирати такі незалежні прості чи комбіновані ознаки, які найкращим чином підходять для даної діагностичної задачі будівельних машин та механізмів. Вдалий результат у підборі залежить головним чином від наявної у дослідника інформації про структуру діагностичного сигналу, а також від його інтуїції та досвіду.

ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

У роботах [1, 2] застосовані акустичні вектори як діагностичні ознаки стану машин та показано, що такий підхід суттєво знижує ймовірність помилкового діагнозу. У [3, 4] вказано на переваги *кепстра* як інструменту діагностики технічного стану машин та висвітлені його інформаційно-діагностичні ознаки. Результати наведених вище робіт будуть використані у даному дослідженні.

МЕТА РОБОТИ

Мета даної роботи полягає у обґрунтуванні методу *кепстра* для акустичної діагностики технічного стану будівельних машин і механізмів. Використання цієї комбінованої діагностичної ознаки разом з методом фазових портретів (класичного та

вищих порядків) дозволяє вдосконалити процес ідентифікації основних параметрів технічного стану будівельних машин і механізмів, зокрема у перехідних режимах їхнього функціонування (пуск/гальмування).

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Спектральна щільність потужності акустичного сигналу

Відомо [5], що детермінована функція часу $f(t)$, що задана у інтервалі $(-\infty, \infty)$ і досить швидко спадає на кінцях цього інтервалу, задовольняє нерівності

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty \quad (4)$$

і може бути зображена інтегралом Фур'є

$$f(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) d\omega; \quad (5)$$

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) dt,$$

де ω – кругова частота; t – час; $i^2 = -1$; $S(\omega)$ – спектральна щільність функції $f(t)$. З формул (5) можна отримати відому рівність Парсеваля:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega. \quad (6)$$

У лівій частині цієї рівності стоїть величина, що зветься повною питомою (на одиницю маси механічної системи) енергією функції $f(t)$. Фізичний зміст рівності Парсеваля полягає у тому, що повна питома енергія функції $f(t)$ дорівнює сумі енергій її окремих частотних складових $|S(\omega)|^2 d\omega$. У цьому випадку величину $|S(\omega)|^2$ можна назвати також спектральною щільністю сигналу $f(t)$ [4].

Спектральна щільність потужності може бути визначена [4] наступним чином:

$$F(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot T} \cdot |S(\omega, T)|^2, \quad (7)$$

де $[-T, T]$ – інтервал часу, у якому $S(\omega) \neq 0$, а поза ним – $S(\omega) \equiv 0$. Виходячи

із співвідношення (7), можна потім з (1) визначити *кепстр* даного акустичного сигналу.

2. Математична модель нестационарних процесів у лінійних системах з одним ступенем вільності руху

Вважаємо, що процес пуску/гальмування будівельної машини чи механізму може бути описаний у межах моделі лінійної механічної системи з одним ступенем вільності руху:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mu \cdot \frac{dx}{dt} + f_0 \cdot g \cdot \text{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right) + \omega^2 \cdot x = P_0 \cdot \cos\left(\frac{\varepsilon \cdot t^2}{2} + \delta\right), \quad (8)$$

де x – лінійне переміщення; μ – коефіцієнт, що характеризує затухання; ω – частота вільних коливань; f_0 – коефіцієнт сухого тертя ковзання; g – прискорення вільного падіння; P_0 – амплітуда вимушеної сили, віднесена до одиниці маси системи; ε – швидкість зміни частоти вимушеної сили; δ – початкова фаза. (У подальшому задля зручності приймаємо $\delta \equiv 0$). Перейдемо у (8) до безрозмірних змінних

($\varepsilon = \text{const} > 0$): (\tilde{x} та τ). Тоді отримаємо

$$x = A \cdot \tilde{x}; \quad A > 0; \quad \sqrt{\varepsilon} \cdot t = \bar{\tau}; \quad \frac{P_0}{(\varepsilon \cdot A)} = 1; \\ \frac{d^2\tilde{x}}{d\bar{\tau}^2} + \bar{\mu} \cdot \frac{d\tilde{x}}{d\bar{\tau}} + \bar{f}_0 \cdot \text{sign}\left(\frac{d\tilde{x}}{d\bar{\tau}}\right) + \bar{\omega}^2 \cdot \tilde{x} = \cos\left(\frac{\bar{\tau}^2}{2}\right). \quad (9)$$

У (9) введені позначення

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{\sqrt{\varepsilon}}; \quad \bar{f}_0 = \frac{f_0 \cdot g}{\varepsilon \cdot A}; \quad \bar{\omega}^2 = \frac{\omega^2}{\varepsilon}. \quad (10)$$

Розв'язок рівняння (9) за нульових початкових умов можна знайти на ПЕОМ чисельним методом. Нехай він має вигляд $\tilde{x}(\bar{\tau})$. Тоді для знаходження *кепстра* сигналу $\tilde{x}(\bar{\tau})$ слід знайти спочатку розв'язок рівняння

$$\frac{dz}{d\bar{\tau}} = 2 \cdot \pi \cdot \lg \left[\frac{\pi^2}{\bar{\tau}^2} \cdot \tilde{x}^4(\bar{\tau}) \right] \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \bar{\tau}^2) \quad (11)$$

за нульових початкових умов, а потім визначити *кепстр* $K(\bar{\tau})$ за формулою

$$K(\bar{\tau}) = z(\bar{\tau})^2. \quad (12)$$

Далі на рис. 1-3 наведені для різних значень β (коефіцієнта в'язкого тертя), f_0

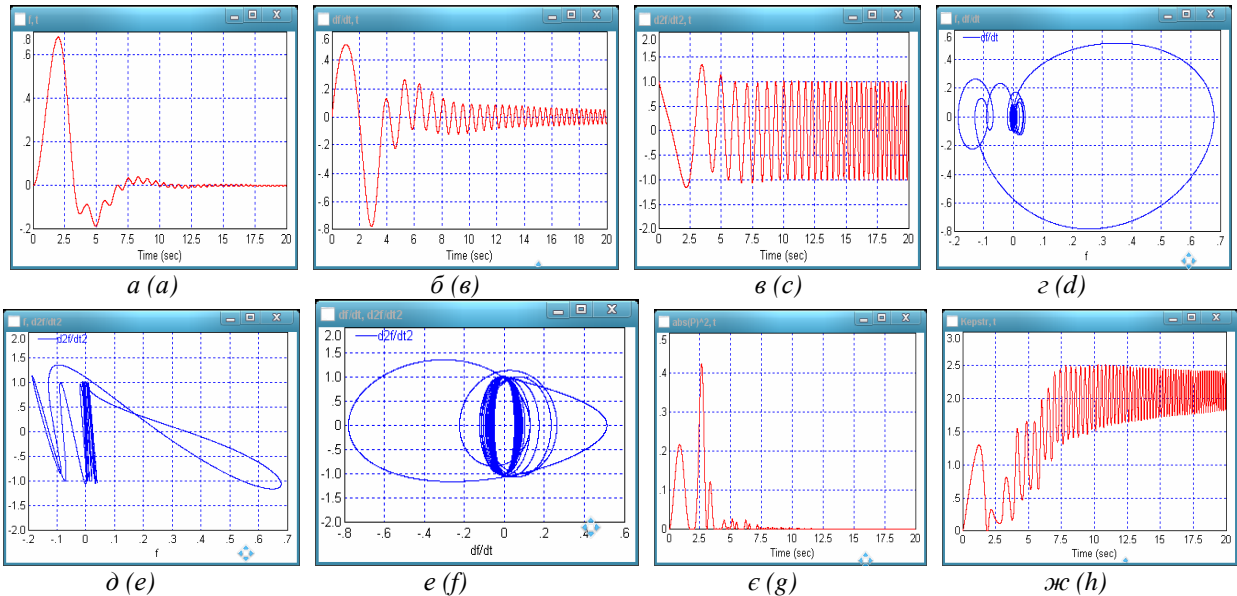


Рис. 1. Графічні залежності: $\tilde{x}(\bar{\tau})$ – а; $\dot{\tilde{x}}(\bar{\tau})$ – б; $\ddot{\tilde{x}}(\bar{\tau})$ – в; $(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})$ – г; $(\tilde{x}, \ddot{\tilde{x}})$ – д; $(\dot{\tilde{x}}, \ddot{\tilde{x}})$ – е; $|F(\bar{\tau})|^2$ – е та $K(\bar{\tau})$ – ж при наступних параметрах $\beta = 1,0$; $f_0 = 0,0$; $\omega = 1,0 \text{ c}^{-1}$

Fig. 1. Graphic dependences: $\tilde{x}(\bar{\tau})$ – а; $\dot{\tilde{x}}(\bar{\tau})$ – б; $\ddot{\tilde{x}}(\bar{\tau})$ – в; $(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})$ – г; $(\tilde{x}, \ddot{\tilde{x}})$ – д; $(\dot{\tilde{x}}, \ddot{\tilde{x}})$ – е; $|F(\bar{\tau})|^2$ – г and $K(\bar{\tau})$ – ж at the following parameters $\beta = 1,0$; $f_0 = 0,0$; $\omega = 1,0 \text{ s}^{-1}$

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КЕПСТРА В АКУСТИЧНІЙ ДІАГНОСТИЦІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ

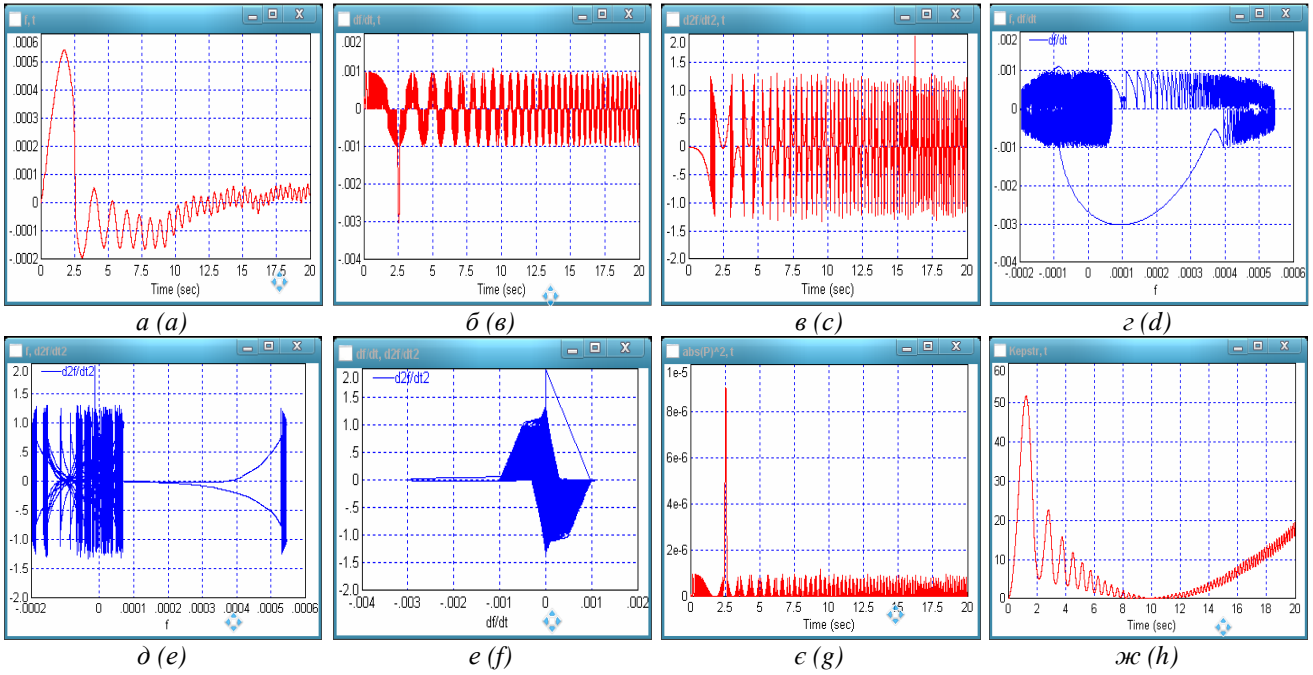


Рис. 2. Графічні залежності: $\tilde{x}(\bar{\tau}) - a$; $\dot{\tilde{x}}(\bar{\tau}) - b$; $\ddot{\tilde{x}}(\bar{\tau}) - c$; $(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}) - d$; $(\tilde{x}, \ddot{\tilde{x}}) - e$; $(\dot{\tilde{x}}, \ddot{\tilde{x}}) - f$; $|F(\bar{\tau})|^2 - g$ та $K(\bar{\tau}) - ж$ при наступних параметрах $\beta = 1,0$; $f_0 = 1,0$; $\omega = 10,0 \text{ c}^{-1}$

Fig. 2. Graphic dependences: $\tilde{x}(\bar{\tau}) - a$; $\dot{\tilde{x}}(\bar{\tau}) - b$; $\ddot{\tilde{x}}(\bar{\tau}) - c$; $(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}) - d$; $(\tilde{x}, \ddot{\tilde{x}}) - e$; $(\dot{\tilde{x}}, \ddot{\tilde{x}}) - f$; $|F(\bar{\tau})|^2 - g$ and $K(\bar{\tau}) - h$ at the following parameters $\beta = 1,0$; $f_0 = 1,0$; $\omega = 10,0 \text{ s}^{-1}$

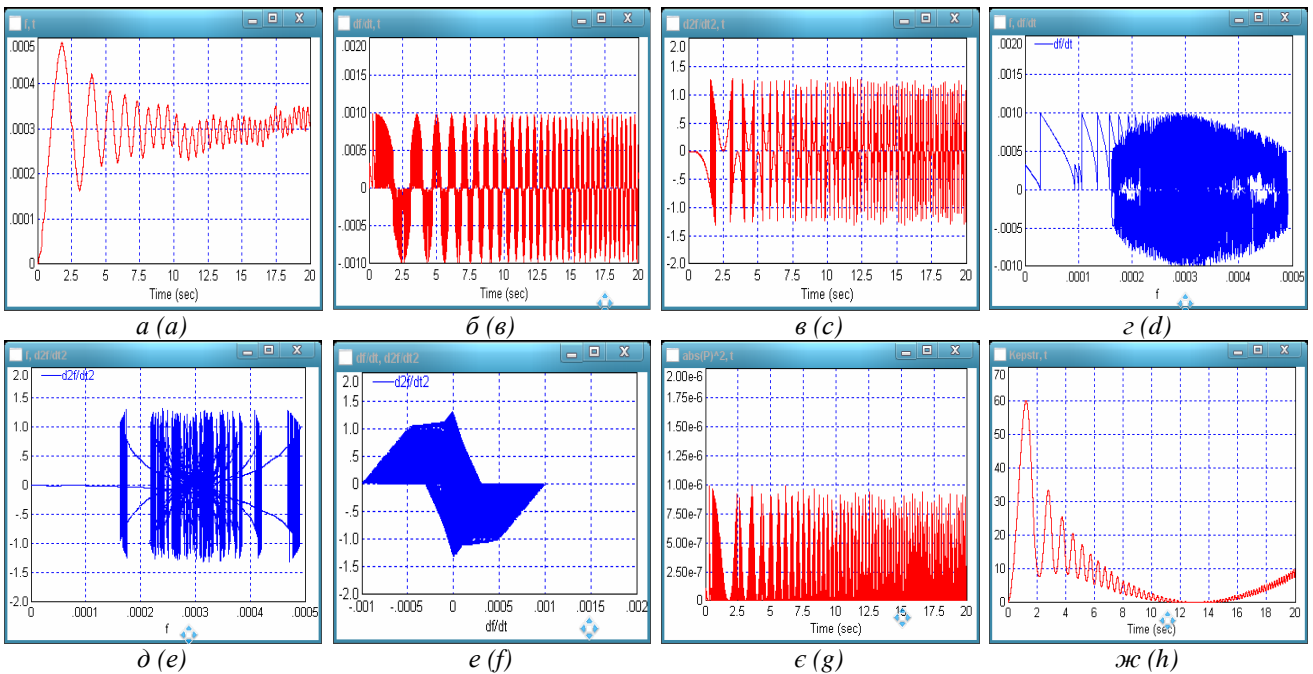


Рис. 3. Графічні залежності $\tilde{x}(\bar{\tau}) - a$; $\dot{\tilde{x}}(\bar{\tau}) - b$; $\ddot{\tilde{x}}(\bar{\tau}) - c$; $(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}) - d$; $(\tilde{x}, \ddot{\tilde{x}}) - e$; $(\dot{\tilde{x}}, \ddot{\tilde{x}}) - f$; $|F(\bar{\tau})|^2 - g$ та $K(\bar{\tau}) - ж$ при наступних параметрах $\beta = 10,0$; $f_0 = 1,0$; $\omega = 1,0 \text{ c}^{-1}$

Fig. 3. Graphic dependences $\tilde{x}(\bar{\tau}) - a$; $\dot{\tilde{x}}(\bar{\tau}) - b$; $\ddot{\tilde{x}}(\bar{\tau}) - c$; $(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}) - d$; $(\tilde{x}, \ddot{\tilde{x}}) - e$; $(\dot{\tilde{x}}, \ddot{\tilde{x}}) - f$; $|F(\bar{\tau})|^2 - g$ and $K(\bar{\tau}) - h$ at the following parameters $\beta = 10,0$; $f_0 = 1,0$; $\omega = 1,0 \text{ s}^{-1}$

(коефіцієнта сухого тертя ковзання) та ω (частоти вільних коливань) залежності $\tilde{x}(\tau)$, $\dot{\tilde{x}}(\tau)$, $\ddot{\tilde{x}}(\tau)$, $|F(\tau)|^2$, $K(\tau)$, а також фазові портрети – $(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})$ (класичний); $(\tilde{x}, \ddot{\tilde{x}})$, $(\dot{\tilde{x}}, \ddot{\tilde{x}})$ – вищих порядків, які, на думку авторів даної роботи, вдало і всебічно описують усі особливості руху системи під час перехідних процесів, що у ній відбуваються.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано застосування методу *келстру* в акустичній діагностиці технічного стану будівельних машин і механізмів, який дозволяє виділяти основні (ведучі) частоти коливань механічної системи у процесах її пуску/гальмування.

2. Використання цієї комбінованої діагностичної ознаки разом з методом фазових портретів (класичного та вищих порядків) дозволяє вдосконалювати процес ідентифікації основних параметрів технічного стану будівельних машин і механізмів, зокрема у перехідних режимах їх функціонування.

3. Отримані у роботі результати у подальшому можуть бути використані для уточнення та вдосконалення існуючих інженерних методів акустичної діагностики технічного стану будівельних машин і механізмів як на стадії їх проектування/конструювання, так і у режимах реальної експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Балицкий Ф.Я., Генкин М.Д., Иванова М.А., Соколова А.Г.* Вопросы моделирования акустических процессов в машинах. – В. кн.: Динамика и акустика машин. – М.: Наука, 1971.

2. *Генкин М.Д. и др.* Вопросы акустической диагностики. – В кн.: Методы виброизоляции машин и присоединённых конструкций. – М.: Наука, 1975. – 210 с.
3. *Оппенгейм А.В., Шефер Р.И., Стокхэм Т.Г.* Нелинейная фильтрация сигналов, представленных в виде произведения и свёртки. // Труды института инженеров по электронике и радиоэлектронике. – 1962. – Т. 56, № 8.
4. *Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д.* Введение в акустическую динамику машин. – М.: Наука, 1979. – 296 с.
5. *Харкевич А.А.* Спектры и анализ. – М.: Гостехиздат, 1957. – 230 с.

REFERENCES

1. *Balickij F.Ja., Genkin M.D., Ivanova M.A., Sokolova A.G., 1971.* Voprosy modelirovanija akusticheskikh processov v mashinah [Questions of modeling of acoustic processes in cars]. V. kn.: Dinamika i akustika mashin [In book: Dynamics and acoustics of cars]. Moscow, Nauka Publ.
2. *Genkin M.D. and others, 1975.* Voprosy akusticheskoy diagnostiki [Questions of acoustic diagnostics]. V kn.: Metody vibroizoljacji mashin i prisoedinjonnyh konstrukcij [In book: Methods of vibration insulation of cars and the attached designs]. Moscow, Nauka Publ., 210.
3. *Oppenhejm A.V., Shefer R.I., Stokhjem T.G., 1962.* Nelinejnaja fil'tracija signalov, predstavlenykh v vide proizvedenija i svjortki [Nonlinear filtration of the signals presented in the form of work and parcels]. Trudy instituta inzhenerov po jelektronike i radioelektronike [Works of institute of engineers on electronics and radio electronics]. Vol. 56, No. 8.
4. *Artobolevskij I.I., Bobrovnickij Ju.I., Genkin M.D., 1979.* Vvedenie v akusticheskiju dinamiku mashin [Introduction in acoustic dynamics of cars]. Moscow, Nauka Publ., 296.
5. *Harkevich A.A., 1957.* Spektry i analiz [Ranges and analysis]. Moscow, Gostehizdat Publ., 230.