

УДК 621.313:62-799

М.В.Мислович, докт.техн.наук, **Р.М.Сисак**, канд.техн.наук, **О.В.Улітко** (Інститут електродинаміки НАН України, Київ)

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ВИРШЕННІ ЗАДАЧІ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

У роботі розглянуто питання імітаційного моделювання процесів акустичної емісії, що супроводжують роботу вузлів електротехнічного обладнання. На базі математичної моделі лінійних випадкових процесів побудовано конструктивну модель сигналу акустичної емісії, що вимірюється п'єзоелектричним вимірювальним перетворювачем, закріпленим на поверхні об'єкту діагностики. Таким чином, показано, що імітаційне моделювання сигналів акустичної емісії може бути реалізовано шляхом лінійної фільтрації поодинокого імпульсу релаксаційного типу або пуассонівського потоку таких імпульсів за допомогою деякого RLC-фільтра. На основі отриманих співвідношень створено спеціальне програмне забезпечення для проведення імітаційного моделювання. Це програмне забезпечення має можливість генерувати реалізації сигналів акустичної емісії при різних вхідних параметрах, виводити їхні графіки та передавати дані для подальшої обробки за допомогою інших програм. За результатами проведеного моделювання обґрунтовано діагностичні ознаки, що дозволяють визначати технічний стан вузлів електротехнічного обладнання, які діагностуються.

В работе рассмотрен вопрос имитационного моделирования процессов акустической эмиссии, сопровождающих работу узлов электротехнического оборудования. На базе математической модели линейных случайных процессов построена конструктивная модель сигнала акустической эмиссии, измеряемого пьезоэлектрическим измерительным преобразователем, закрепленным на поверхности объекта диагностики. Таким образом, показано, что имитационное моделирование сигналов акустической эмиссии может быть реализовано путем линейной фильтрации одиночного импульса релаксационного типа или пуассоновского потока таких импульсов с помощью некоторого RLC-фильтра. На основе полученных соотношений разработано специальное программное обеспечение для проведения имитационного моделирования. Это программное обеспечение имеет возможность генерировать реализации сигналов акустической эмиссии при разных входных параметрах, выводит их графики и передает данные для последующей обработки посредством других программ. По результатам проведенного моделирования обоснованы диагностические признаки, позволяющие определять техническое состояние диагностируемых узлов электротехнического оборудования.

На сьогодні для електроенергетичного комплексу України характерна значна зношеність його основного обладнання – більш ніж 90% обладнання електричних станцій та підстанцій виробило свій ресурс. Зрозуміло, що водночас замінити таку кількість обладнання в умовах його експлуатації на енергооб'єктах неможливо. Існують декілька способів підтримки цього обладнання у робочому стані, і один із них – це проведення моніторингу, контролю та діагностики його технічного стану. Визначальним моментом при цьому є вибір діагностичного сигналу, що несе інформацію про технічний стан досліджуваного обладнання. Серед них при діагностиці електротехнічного обладнання (ЕО) найбільш часто використовують сигнали, що несуть інформацію про електромагнітні, вібраційні, акусто-емісійні (АЕ), теплові та інші процеси, що супроводжують роботу ЕО.

У даній роботі докладно зупинимося на розгляді АЕ сигналів і дослідженні їхніх характеристик, що можуть бути використані при дослідженні технічного стану ЕО. Однією з основних переваг АЕ сигналів у порівнянні з іншими є те, що вони крім інформації про технічний стан досліджуваного обладнання надають можливість отримувати інформацію про механічне перевантаження вузлів, що діагностуються. Як відомо [6,8,9], визначення діагностичних параметрів при проведенні АЕ діагностики можливо за результатами аналізу математичної моделі (імітаційного моделювання) процесу АЕ, а також за результатами проведення експериментальних досліджень.

Головною метою даної роботи є імітаційне моделювання процесів АЕ, які супроводжують роботу ЕО, та визначення їхніх деяких імовірнісних характеристик, що можуть бути використані при проведенні діагностики та визначенні ступеня механічного навантаження окремих його вузлів.

Модель лінійного випадкового процесу в описі АЕ сигналів. Для проведення імітаційного моделювання зробимо деякі пояснення відносно практичного використання моделі лінійного випадкового процесу (ЛВП) для опису процесу АЕ. Як відмічено у [4–8], використання класу ЛВП дозволяє проводити повний імовірнісний аналіз відгуків як лінійних, так і нелінійних систем навіть у випадках впливу на ці системи породжуючих процесів, що мають пуассонівський розподіл. Згідно [4–8], ЛВП припускає представлення

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\eta(\tau), \quad t \in T, \quad (1)$$

де $\{\eta(\tau), \eta(0)=0, \tau \in (-\infty, \infty)\}$ – стохастично неперервний процес з незалежними приростами, який називають породжуючим; $\varphi(\tau, t)$ – не випадкова числова функція, для якої виконується умова $\left| \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^p(\tau, t) d\kappa_p(\tau) \right| < \infty, p = 1, 2$, де $\kappa_p(\tau)$ – семіінваріант p -го порядку процесу $\eta(\tau)$; $T \in (-\infty, \infty)$.

З урахуванням [4,7], процес (1) є результатом лінійної фільтрації процесу типу білого шуму. Канал виникнення та розповсюдження у досліджуваному об'єкті АЕ сигналу схематично може бути представлений наступним чином (рис. 1).

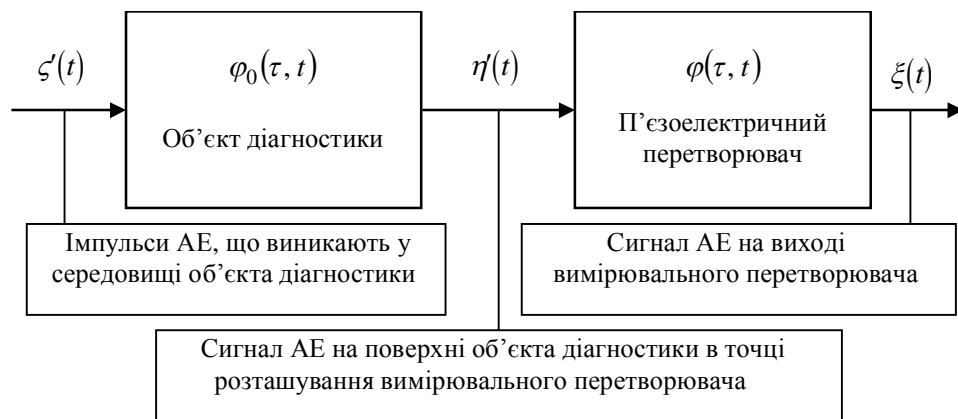


Рис. 1

На основі властивостей ЛВП [4–7] вимірюваний на виході сенсора (в нашому випадку п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП)) сигнал АЕ $\xi(t)$ у припущенні, що він є стаціонарним, запишеться наступним чином:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) \eta'(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) \varphi_0(\tau_1, \tau) d\zeta(\tau_1) d\tau. \quad (2)$$

Якщо позначити $\varphi_1(\tau, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau_1, t) \varphi_0(\tau, \tau_1) d\tau_1$, то вираз (2) можна записати

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(\tau, t) d\zeta(\tau). \quad (3)$$

Згідно з [4–7], у цьому випадку імовірнісні характеристики процесу $\xi(t)$ можуть бути визначені за умови вибору конкретного виду імпульсних перехідних функцій $\varphi_0(\tau, t)$ та $\varphi(\tau, t)$, що характеризують об'єкт діагностування та ПЕП відповідно. Крім того, необхідно враховувати властивості породжуючих процесів $\zeta'(t)$ і $\eta'(t)$. Саме ці моменти використовуються при побудові схеми імітаційного моделювання процесу АЕ. Виходячи з цього, а також з урахуванням [6,8] імпульси АЕ, які виникають у середовищі об'єкта діагностики, можуть бути представлені виразом

$$\varphi_0(s) = \alpha \cdot e^{-\alpha s} \cdot U(s), \quad s \in (-\infty, \infty), \quad s = t - \tau, \quad (4)$$

де $\alpha > 0$ – коефіцієнт згасання, $U(s)$, $s \in (-\infty, \infty)$ – одинична функція Хевісайда.

На підставі [5,6,8,9] імпульсна перехідна функція ПЕП має вигляд

$$\varphi(\tau, t) \equiv \varphi(s) = \gamma \cdot e^{-\beta s} \sin \theta s \cdot U(s), \quad s = t - \tau, \quad s \in (-\infty, \infty), \quad (5)$$

де $\theta > 0$, $0 < \beta < \theta$ – дійсні константи, які мають конкретний фізичний сенс, а саме, частоти осциляцій і коефіцієнту згасання відповідно; $\gamma = (\beta^2 + \theta^2)/\theta$ – нормуючий множник; $\theta = \sqrt{\omega^2 - \beta^2}$.

Виходячи з (2),

$$\varphi_1(\tau, t) = \varphi_1(t - \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_0(x - \tau) \varphi(t - x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_0(x) \varphi(t - \tau - x) dx. \quad (6)$$

Враховуючи (4) і (5), отримаємо

$$\varphi_1(\tau, t) = \varphi_1(t - \tau) = \alpha \gamma e^{-\beta(t-\tau)} \int_0^{\infty} e^{-(\alpha-\beta)x} \sin[-\theta x + \theta(t-\tau)] dx. \quad (7)$$

Інтеграл в останньому виразі зводиться до табличного. В результаті перетворень одержуємо

$$\varphi_1(t - \tau) = \frac{\alpha \gamma e^{-\beta(t-\tau)}}{(\alpha - \beta)^2 + \theta^2} \{ \theta \cos[\theta(t - \tau)] + (\alpha - \beta) \sin[\theta(t - \tau)] \}. \quad (8)$$

Отримавши у явному вигляді згортку (8), процес АЕ на виході ПЕП з урахуванням (2) може бути записаний наступним чином:

$$\xi(t) = \frac{\alpha \cdot \gamma}{(\alpha - \beta)^2 + \theta^2} \left[\theta \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \cos[\theta(t - \tau)] d\tau + (\alpha - \beta) \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \sin[\theta(t - \tau)] d\tau \right]. \quad (9)$$

З урахуванням [8,10] вираз (8) представляє собою сумісну імпульсну перехідну функцію, яка характеризує канал розповсюдження АЕ сигналу в системі, що складається з двох послідовно з'єднаних кіл першого і другого порядку. Ці кола описують систему: об'єкт діагностики – ПЕП.

При імітаційному моделюванні ця система може бути представлена послідовним з'єднанням RC та RLC кіл з імпульсними перехідними функціями (4) і (5). Зазвичай, при вирішенні цієї задачі припускається, що імпульсні АЕ сигнали, що вимірюються ПЕП у точці його розміщення на поверхні досліджуваного об'єкта, не мають суттєвого впливу на власні характеристики ПЕП. Крім того, згідно з [5,6,8], при вирішенні задачі моделювання для ПЕП з імпульсною перехідною функцією (5) най-

більш цікавим з точки зору практики є коливальний режим роботи ПЕП. Тобто, коли у виразі (5) $\theta > 0$, або, виходячи з співвідношення $\theta = \sqrt{\omega^2 - \beta^2}$, $\omega > \beta$.

На основі наведених співвідношень було розроблено програму, яка дозволяє моделювати та досліджувати імпульсні АЕ сигнали. Зупинимось на цьому питанні докладніше.

Програма імітаційного моделювання процесу АЕ. Програма «Моделювання АЕ» складається з кількох модулів, об'єднаних для виконання спільної задачі. Головний модуль програми забезпечує її запуск та вивід головного вікна (рис. 2). Модуль інтерфейсу містить підпрограми, що забезпечують: обробку системних подій (наприклад, відкриття та закрит-

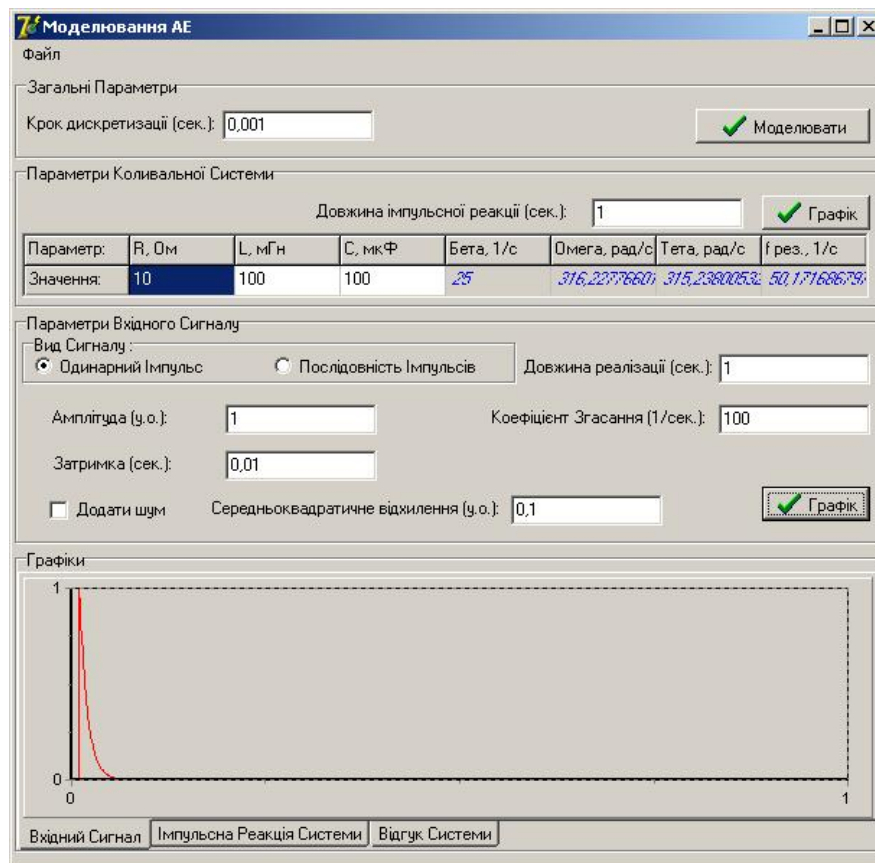


Рис. 2

тя вікна), обробку команд користувача (натискання кнопок, вибір пунктів меню тощо) та ввід даних.

Модуль моделювання виконує такі операції:

– обчислення реалізації вхідного сигналу у вигляді поодинокого імпульсу релаксаційного типу (згасаючого за експонентою, рис. 2);

– обчислення реалізації вхідного сигналу у вигляді пуассонівської послідовності вхідних імпульсів релаксаційного типу;

– обчислення імпульсної реакції ПЕП, яка в подальшому використовується у цифровому фільтрі (реалізовано фільтрацію з використанням скінченної імпульсної реакції);

– обчислення відгуку ПЕП на вхідний сигнал (у одній із форм, перелічених вище).

Графіки вхідного сигналу, імпульсної реакції ПЕП і відгуку ПЕП можуть відображатися в нижній частині головного вікна за допомогою вибору відповідної закладки.

Через головне вікно створеної програми можна задавати необхідні параметри.

1. *Загальні параметри* (верхня частина вікна) включають крок дискретизації $\Delta\tau$, сек. У розробленій програмі моделювання передбачено діапазон зміни кроку дискретизації $\Delta\tau = 0,00001 - 1$ сек. У цій же частині вікна розташована кнопка «Моделювати», натискання на яку запускає процес моделювання. Результати обчислень відображаються в області «Графіки» у нижній частині вікна.

2. *Параметри коливальної системи* включають: тривалість реалізації (сек.), параметри R (Ом), L (мГн) і C (мкФ), які характеризують ПЕП. Крім того, у лівій частині вікна відображаються результати обчислень кількісних оцінок параметрів β (1/сек.); ω (рад/сек.); θ (рад/сек.); $f_{рез}$ (1/сек.). Натискання на кнопку «Графік» забезпечує обчислення і відображення графіка, що характеризує імпульсну реакцію системи при заданих параметрах R , L і C .

3. *Параметри вхідного сигналу* залежать від вибраного виду вхідного сигналу: поодиноким імпульсом або послідовністю імпульсів. Для поодинокого імпульсу вказуються: амплітуда (в умовних одиницях), затримка початку (сек.). Для серії імпульсів: інтенсивність (1/сек.), середня амплітуда (в умовних одиницях), середньоквадратичне відхилення амплітуд окремих імпульсів (в умовних одиницях). Додатково для обох видів вхідного сигналу задаються: тривалість реалізації (сек.) і коефіцієнт згасання (1/сек.). Виведення графіка вхідного впливу здійснюється за допомогою натискання на кнопку «Графік», яка розташована праворуч.

Результати імітаційного моделювання сигналів АЕ. Розглянемо деякі результати імітаційного моделювання АЕ сигналу з використанням створеної програми. Основні задачі дослідження:

– аналіз реакції ПЕП в залежності від його внутрішніх параметрів (величин R , L і C – компонентів, що входять до складу ПЕП) на вплив на його вхід поодинокого релаксаційного імпульсу з характеристикою виду (4);

– аналіз сигналу на виході ПЕП при впливі на його вхід імпульсної пуассонівської послідовності заданої інтенсивності $\lambda = \text{const}$ при зміні параметрів R , L , C , що характеризують ПЕП;

– аналіз відгуку на виході ПЕП при впливі на його вхід імпульсної пуассонівської послідовності з різними значеннями інтенсивності λ ; при цьому параметри R , L , C , що характеризують ПЕП, залишаються незмінними.

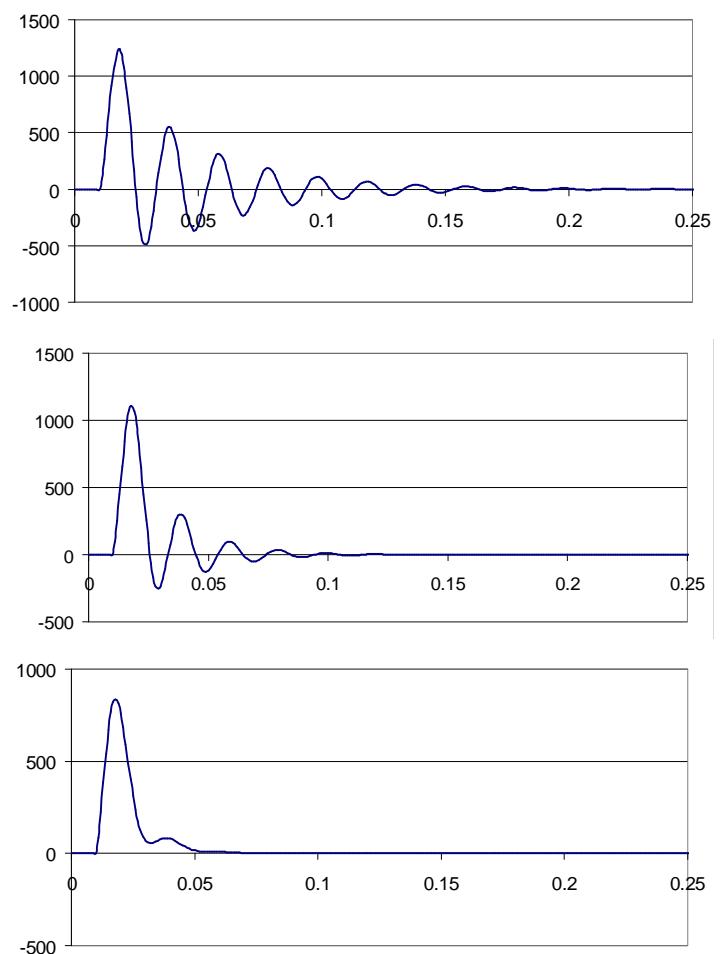


Рис. 3, а, б, в

На рис. 3, *а, б, в* показано результати, що ілюструють зміну відгуку на виході ПЕП при впливі на його вхід поодиноким релаксаційним імпульсом з характеристикою (4). Виходячи з наведених на цих рисунках графіків, можна зробити висновок щодо коефіцієнта згасання α на характер зміни імпульсної реакції системи. Зростання значень коефіцієнта α , що досягається шляхом послідовної зміни величини R (10 Ом; 20 Ом; 50 Ом відповідно) при сталих значеннях $L=100$ мГн, $C=100$ мкФ, призводить до зменшення протяжності відгуку (0,25 с; 0,12 с; 0,07 с відповідно) та зниження кількості його коливань. Одержані результати імітаційного моделювання підтверджують необхідність врахування власних характеристик ПЕП при проведенні вимірювань АЕ сигналів.

Друга задача, яку було вирішено з використанням розробленої програми імітаційного моделювання процесів АЕ, – це формування та визначення характеру імпульсної послідовності на виході ПЕП при зміні його R, L, C параметрів, але при постійній інтенсивності λ вхідного процесу.

На рис. 4 показано графіки, що характеризують імпульсну послідовність на виході ПЕП при різних

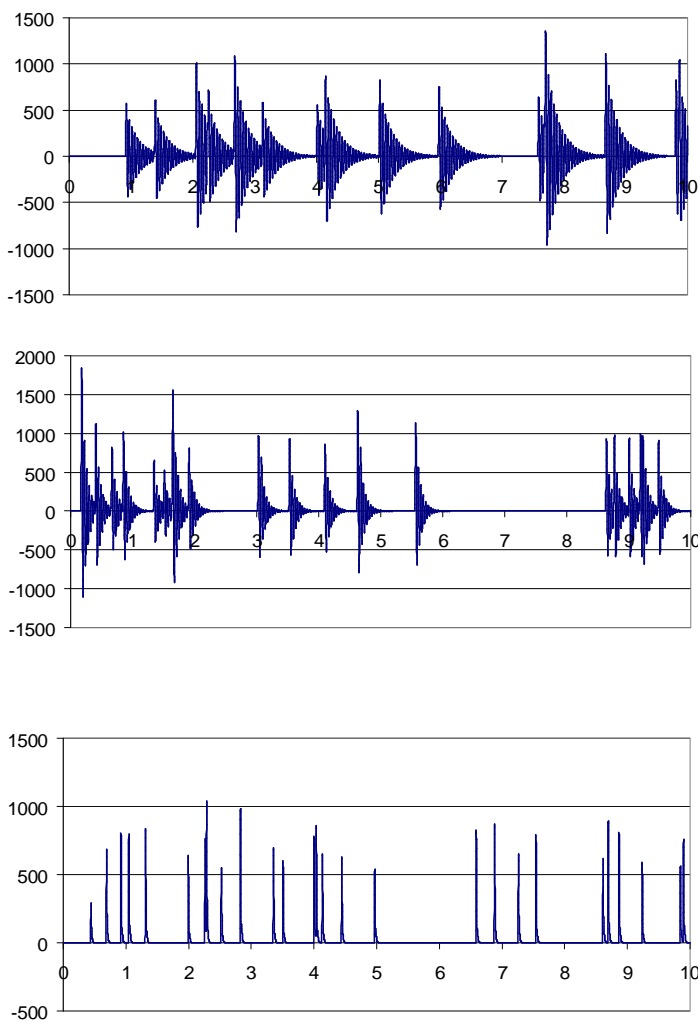


Рис. 4, *а, б, в*

його параметрах та однакових значеннях інтенсивності λ . В даному випадку було вибрано $\lambda = 2 = \text{const}$, а інші параметри набували таких значень: на рис. 4, *а* – $R=10$ Ом, $L=500$ Гн, $C=100$ мкФ, рис. 4, *б* – $R=100$ Ом, $L=200$ Гн, $C=200$ мкФ, рис. 4, *в* – $R=30$ Ом, $L=50$ Гн, $C=200$ мкФ.

Як видно з рис. 4, *а*, у випадку, коли ПЕП має досить високу добротність, сигнал на його виході представляє собою послідовність, у якій задній фронт кожного імпульсу має яскраво виражений коливальний характер. При зменшенні добротності ПЕП (рис. 4, *б*) коливальний характер заднього фронту в імпульсах стає менш вираженим. І, нарешті, коли ПЕП представляє собою систему з низькою добротністю, імпульси у послідовності на його виході набувають експоненціального характеру. Як видно з рис. 4, *в*, в імпульсах повністю відсутні коливання їх заднього фронту та зникають від'ємні значення в імпульсній послідовності, що спостерігається. Такі характеристики ПЕП досягаються шляхом підвищення величини опору R та зменшення значень індуктивності L у порівнянні з попередніми випадками.

І, на завершення, третя задача, яку було вирішено з використанням розробленої програми “Моделювання АЕ”, – це формування і визначення характеру зміни імпульсної послідовності на виході ПЕП при зміні інтенсивності вхідного процесу λ та при незмінних параметрах R, L, C .

На рис. 5, *а, б, в* показано змодельовані пуассонівські послідовності імпульсів на виході ПЕП, що одержані при постійних параметрах $R=10$ Ом, $L=100$ мГн, $C=100$ мкФ і різних значеннях λ ($\lambda = 1; 2; 5 \text{ с}^{-1}$ відповідно). Як видно, збільшення значення параметра λ призводить до зростання кількості імпульсів на фіксованому інтервалі часу. Так, на наведених графіках при фіксованому інтервалі часу ($\Delta t = 0 - 4$ сек) спостерігається $n=3; 8; 15$ імпульсів відповідно.

Враховуючи, як це відзначено в [1–3,9,11], зростання інтенсивності λ процесу АЕ при підвищенні механічного навантаження у досліджуваному об'єкті, останню можливість створеної програми можна використовувати при обґрунтуванні параметра λ як діагностичну ознаку, що дозволяє визначити ступінь навантаження на об'єкт, який діагностується.

Висновки. 1. На базі математичної моделі лінійних випадкових процесів узагальнено підхід до імітаційного моделювання сигналів АЕ та створено відповідне програмне забезпечення.

2. Обґрунтовано необхідність врахування власних характеристик датчиків АЕ при вимірюванні сигналів АЕ.

3. Результати імітаційного моделювання сигналів АЕ дозволили обґрунтувати можливість використання як діагностичної ознаки інтенсивності λ сигналів АЕ, що може характеризувати певний технічний стан досліджуваного об'єкту.

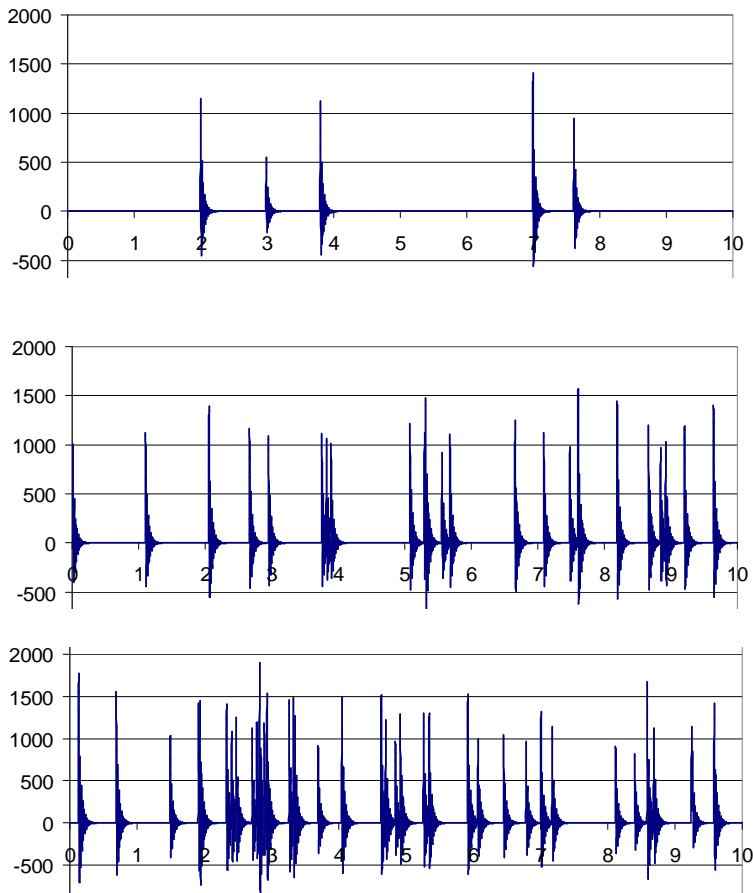


Рис. 5, а, б, в

дели усталостных дефектов в узлах электротехнического оборудования и их использование при создании акустико-эмиссионных информационно-измерительных систем диагностики // Техн. электродинамика. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2002. – Ч. 4. – С. 114–119.

9. Мыслович М.В., Улитко А.В. Обоснование диагностических признаков для использования в акустико-эмиссионных системах диагностики авиационного оборудования // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА 2003». – К.: НАУ, 2003. – Ч. 11. – С. 91–95.

10. Улитко А.В. Особенности формирования обучающих совокупностей при проведении акустоэмиссионной диагностики электротехнического оборудования // Техн. электродинамика. Тем. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2006. – Ч. 5. – С. 102–107.

11. *Nondestructive testing handbook*. Vol.5. Acoustic emission testing. ASME, 1987. – 603 p.

1. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследованиях процессов разрушения. – К.: Наукова думка, 1989. – 176 с.

2. Буйло С.И. Связь функции распределения долговечности с параметрами потока актов акустической эмиссии и количественная оценка достоверности акустико-эмиссионной диагностики предразрушающего состояния // Техн. диагн. и неразр. контроль. – 1993. – №3. – С. 10–16.

3. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Неразрушающий контроль акустико-эмиссионным методом. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.

4. Марченко Б.Г. Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике. – К.: Наукова думка, 1973. – 192 с.

5. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Белые шумы в колебательных системах / Препр. / НАН Украины, Ин-т электродинамики, № 599. – Киев – 1989. – 42 с.

6. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. – К.: Наукова думка, 1992. – 195 с.

7. Марченко Б.Г., Щербак Л.Н. Линейные случайные процессы и их приложения. – К.: Наукова думка, 1975. – 143 с.

8. Мыслович М.В., Улитко А.В. Мо-

Надійшла 27.08.2010