

**МОДЕЛІ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ В ОБ'ЄКТАХ КІНЦЕВИХ РОЗМІРІВ ТА ЇХНЄ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

С.М. Герцик<sup>1</sup>, А.Д. Городжа<sup>2\*</sup>, канд.техн.наук, М.В. Мислович<sup>1\*\*</sup>, докт.техн.наук,  
О.Д. Подольцев<sup>1\*\*\*</sup>, докт.техн.наук, Р.М. Сисак<sup>1\*\*\*\*</sup>, канд.техн.наук, Б.О. Трощинський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

Е-mail: [sergey.gertsik@gmail.com](mailto:sergey.gertsik@gmail.com); [mysl@ied.org.ua](mailto:mysl@ied.org.ua); [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua); [rsvsak@ied.org.ua](mailto:rsvsak@ied.org.ua);

<sup>2</sup> – Київський національний університет будівництва і архітектури,

Повітрофлотський просп., 31, Київ, 03037, Україна. Е-mail: [gorodzha@knuba.edu.ua](mailto:gorodzha@knuba.edu.ua); [bohiant@gmail.com](mailto:bohiant@gmail.com)

*Розглянуто питання побудови математичних моделей хвильових процесів, що збуджуються у суцільних об'єктах кінцевих розмірів ударним впливом, та їхньої комп'ютерної реалізації на основі еквівалентних електричних кіл завдяки існуючій електромеханічній аналогії. Розроблено ймовірнісні моделі вібраційних хвильових процесів, що поширюються у шихтованих магнітопроводах трансформаторів, за результатами дослідження яких обґрунтовано діагностичні ознаки для визначення ступеня пресування цих магнітопроводів. Проведено імітаційне моделювання поширення ударної хвилі по досліджуваному об'єкту. За результатами моделювання вибрано параметри і характеристики, які описують процес поширення ударної хвилі у шихтованому магнітопроводі, високовольтних вимикачах та у пальових конструкціях сейсмостійких фундаментів для електротехнічного обладнання. Бібл. 12, рис. 10.*

**Ключові слова:** моделі хвильових процесів, ударна вібродіагностика, шихтований магнітопровід, електроенергетичне обладнання.

За оцінкою спеціалістів технічний стан електротехнічного обладнання (ЕО) енергогенеруючих підприємств України досяг критичної межі, що підвищує ймовірність виникнення аварій і надзвичайних ситуацій. Разом з тим темпи відновлення цього обладнання є надзвичайно низькими внаслідок економічної ситуації в країні. Тому першочерговим завданням, що постає перед розробниками та обслуговуючим персоналом підприємств електроенергетики, є створення та впровадження сучасних систем моніторингу, контролю і діагностики ЕО [1, 5, 10]. Практичне застосування таких систем у певній мірі сприятиме підвищенню надійності ЕО, що знаходиться в експлуатації.

Існують різні методи та пристрої для розв'язання різноманітних задач моніторингу і діагностики ЕО, однак одним із найбільш ефективних для діагностики масивних вузлів ЕО є методи та засоби неруйнівної вібродіагностики [1, 7, 10, 11]. Ці методи та засоби набули досить широкого поширення завдяки відносній простоті їхнього застосування, що пов'язано із зручним доступом до поверхні досліджуваного вузла ЕО, де можна розташувати сенсори для вимірювання діагностичних сигналів без необхідності значних конструктивних змін цього вузла. Постійне удосконалення технічних засобів, відповідної апаратури та програмного забезпечення за рахунок використання сучасних інформаційних технологій роблять методи і засоби ударного діагностування об'єктів ЕО найбільш ефективними з точки зору визначення технічного стану об'єкта діагностування. Слід також зауважити, що згаданий метод ударної вібраційної діагностики є найбільш зручним і придатним для діагностування масивних вузлів ЕО з обмеженим доступом до певних ділянок їхньої поверхні [1, 4, 6, 11].

Однак не завжди користувача влаштовує інформація про придатність або непридатність певного ЕО для подальшої експлуатації. Найчастіше це питання пов'язане не тільки з визначенням, а і з класифікацією певних видів дефектів, що, у свою чергу, дає відповідь на запитання – наскільки довго дане ЕО може знаходитися в експлуатації? Тобто, у певній мірі ця інформація дає уявлення про залишковий ресурс того чи іншого виду ЕО.

Успішне розв'язання цієї задачі потребує створення нових математичних моделей, пов'язаних з утворенням і розповсюдженням хвильових процесів у об'єктах кінцевих розмірів, що породжуються

ударним впливом на ці об'єкти. Крім цього, враховуючи стохастичну структуру ударного вібраційного сигналу [1, 6, 7], необхідно запропонувати правила класифікації можливих дефектів, що базуються на методах перевірки статистичних гіпотез.

На сьогодні для побудови математичних моделей поширення ударних хвильових процесів у суцільному середовищі кінцевих розмірів використовується ехо-метод (Impact-Echo), який у 1960-х роках минулого століття був запропонований Жаном Паке (Франція) для дефектоскопії залізобетонних паль [4, 12]. Як показано у [1, 6], метод збудження ударних вібраційних хвиль може бути успішно використаний і для діагностики окремих вузлів ЕО.

Метод полягає в ударному збудженні пружної хвилі стиснення з вільного торця палі. Частотна область хвильових процесів при цьому виді генерації пружних хвиль, як правило, становить 0,5...10 кГц. При поширенні хвиля відбивається від тих ділянок, де змінюється хвильовий опір матеріалу, і, в тому числі, від кінців палі. Приймач пружних хвиль (датчик швидкості або прискорення), встановлений поруч із точкою збудження, сприймає зондувальний і відбитий сигнали. Миттєві значення цих сигналів, пропорційні швидкості або прискоренню переміщення торця палі, фіксуються в функції часу за допомогою пристрою, що перетворює їх у числовий код та передає у комп'ютер для подальшої обробки. Згідно з [4, 6] ехо-метод, що розглядається, має високі показники достовірності і при цьому процес аналізу результатів (сигналограм хвильових процесів) може бути автоматизований. Саме ця особливість вказаного методу може бути використана при створенні моделей і методів дослідження поширення хвильових процесів у суцільних середовищах об'єктів кінцевих розмірів.

**Метою** роботи є створення моделей хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів, їхня комп'ютерна реалізація за допомогою еквівалентних електричних кіл існуючої електромеханічної аналогії та дослідження можливості використання цих моделей для побудови методів діагностики вузлів ЕО.

Об'єктами дослідження було обрано різнотипне та, водночас, типове електротехнічне обладнання, а саме шихтований магнітопровід трансформаторів та високовольтний вимикач. Крім того, досліджувалися залізобетонні палі, які використовувалися у сейсмостійких платформах для електротехнічного обладнання. Таке широке застосування методу ударних хвильових процесів для різних електричних та технічних об'єктів довело його універсальність та ефективність при діагностуванні їхнього технічного стану.

**Моделі ударних хвильових процесів у вузлі ЕО.** Математична модель утворення і поширення хвильового процесу в суцільних об'єктах обмежених розмірів і циліндричної конфігурації, що розглядається в даній роботі, базується на моделі Кельвіна-Фойгта [4], результати дослідження якої було використано Жаном Паке (Франція) для дефектоскопії залізобетонних паль. Отримання розв'язку математичної задачі щодо вібрації вузла, що розглядається, можливе тільки за умови введення у розрахунок суттєвих спрощень. Відомі різні способи побудови спрощених схем пристроїв для розрахунку вібрацій, але найбільш поширеним є припущення про одномірний характер розповсюдження механічних хвиль в об'єкті, що досліджується [1, 3, 4, 6]. Розв'язування цієї задачі можливе у двох основних напрямках: ймовірнісному та детермінованому. Зупинимося на розгляді цих питань.

**Ймовірнісна модель хвильових процесів у вузлах ЕО.** Вище було розглянуто детерміновану математичну модель хвильових процесів, які виникають у шихтованих магнітопроводах ЕО. Нижче, як приклад, коротко розглянемо питання представлення ударного вібраційного процесу, що збуджується у шихтованому магнітопроводі електричних машин (ЕМ), у вигляді ймовірнісної багаторезонансної моделі. Слід зазначити, що докладне обґрунтування цієї моделі розглянуто у роботах [1, 6]. Саме використання властивості багаторезонансності вказаної моделі надає можливість запропонувати досить простий та наочний метод побудови розв'язуючих правил для діагностування ступеня пресування досліджуваного магнітопроводу.

У відповідності до [1, 6] при ударному впливі на таку систему її відгук має багаторезонансний характер, оскільки шихтований магнітопровід можна розглядати як багаторезонансну систему певним чином зв'язаних  $RLC$ -контурів. Це саме стосується і інших елементів і вузлів ЕМ, наприклад, підшипникового вузла. Тому можна запропонувати узагальнену математичну модель, що описує коливальні процеси в цих різних конструкціях, виходячи із загальних позицій, а при діагностиці в конкретному випадку модель буде уточнюватися таким чином, що її параметри будуть відображати властивості конкретного об'єкта діагностики. Основна ідея такої моделі полягає у тому, що досліджуваний об'єкт розглядається як багаторезонансна система, що може бути представлена вектором імпульсних перехідних функцій з компонентами

$$\varphi_j(\tau) = \omega_j^2 \psi_j^{-1} \cdot e^{-\beta_j \tau} \cdot \sin(\psi_j \tau) \cdot U(\tau), \quad (1)$$

де  $j = \overline{1, n}$ ,  $\psi_j = \sqrt{\omega_j^2 - \beta_j^2}$ ,  $\omega_j = (L_j C_j)^{-1/2}$ ,  $\beta_j = R_j (2 L_j)^{-1} > 0$ ,  $\omega_j > \beta_j$ , а  $U(\tau)$  – нормалізована функція Хевісайда.

Вібрації в точці розміщення акселерометра в усталеному режимі можна розглядати як суму випадкових процесів, що надходять у цю точку по різних каналах поширення хвильового процесу у об'єкті,

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^n a_j \xi_j(t), \quad t \in (-\infty, \infty), \quad (2)$$

де  $n$  – натуральне число, обумовлене конструктивними, технологічними й експлуатаційними характеристиками об'єкта, у якому поширюється вібраційна хвиля;  $a_j$  – вагові коефіцієнти, що враховують згасання вібраційної хвилі по відповідному каналу.

Згідно з [1, 6] у розглянутому випадку кожна компонента-відгук, пов'язана з певним каналом поширення ударної хвилі у шихтованому магнітопроводі, може бути представлена в усталеному режимі у вигляді

$$\xi_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(t - \tau) d\eta_j(\tau), \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

де функції  $\varphi_j(\tau)$ ,  $\tau \in (-\infty, \infty)$  визначаються з [1, 5] для всіх компонент;  $\{\eta_j(\tau), j = \overline{1, n}\}$  – вектор породжуючих процесів із незалежними приростами, похідні компонент якого впливають на входи багаторезонансної системи – моделі досліджуваного об'єкта.

У [1, 6] наведено аналітичні залежності, які дозволяють отримати функціональні залежності для кореляційної функції  $R(s)$  та спектральної щільності потужності  $S(f)$ , що характеризують діагностичні вібраційні сигнали. Саме ці залежності є основою для обґрунтування діагностичних ознак у часовій та частотній областях представлення досліджуваного діагностичного сигналу.

Виходячи з цього, для виявлення та класифікації дефектів, пов'язаних з послабленням ступеня пресування пакета заліза шихтованого магнітопроводу осердя ротора або статора ЕМ з урахуванням співвідношень (3), можуть бути використані часові і частотні характеристики вібраційних діагностичних сигналів, основними з яких є: при кореляційному аналізі –  $\beta_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  – коефіцієнти, що характеризують ступінь згасання корелограми  $R(s)$  досліджуваного сигналу; при спектральному аналізі –  $f_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  – частоти максимумів спектрограми  $S(f)$  досліджуваного вібраційного сигналу.

**Вібраційна модель шихтованого магнітопроводу трансформатора при ударному збудженні та її комп'ютерна реалізація.** Розглянемо утворення вібрацій у шихтованому магнітопроводі, який використовується у різних видах електричних машин. Конструктивно це осердя представляє собою композиційну структуру, яка складається з набору пластин із листової магнітострикційної сталі та ізоляційних проміжків між ними. Для визначення параметрів механічної системи, які впливають на характер розповсюдження хвильових процесів та частотні характеристики шихтованого магнітопроводу, в роботі [6] досліджено процес виникнення коливань у крайньому пакеті осердя цього магнітопроводу.

Пакет осердя шихтованого магнітопроводу має складну періодичну структуру (рис. 1, а), який можна спрощено представити у вигляді однорідного середовища з ефективними механічними параметрами. Як відомо [2], вільні поздовжні коливання такого однорідного середовища у напрямку шихтовки описуються лінійним диференціальним рівнянням другого порядку у частинних похідних

$$\rho_{eff} \partial^2 u / \partial t^2 = E_{eff} \partial^2 u / \partial x^2, \quad (4)$$

де  $E_{eff} = C_{eff}^2 \rho_{eff}$ ,  $\rho_{eff}$  – відповідно ефективні значення модуля пружності та щільності магнітопроводу;  $C_{eff}$  – ефективна швидкість поширення звукової хвилі у магнітопроводі у напрямку шихтовки;  $u$  – поздовжнє зміщення врівноваженої точки його перетину. Для визначення  $C_{eff}$  та  $\rho_{eff}$  можуть використовуватися наступні вирази, записані для елементарної комірки довжиною  $l_1 + l_2$

$$l_1 / C_1 + l_2 / C_2 = (l_1 + l_2) / C_{eff} \rightarrow C_{eff} = 1 / (k_z / C_1 + (1 - k_z) / C_2), \quad \rho_{eff} = \rho_1 k_z, \quad (5)$$

де  $l_1, l_2$  – товщина сталевих листів та ізоляційного проміжку відповідно;  $C_1, C_2$  – швидкість поширення звуку в електротехнічній сталі та ізоляції відповідно;  $k_z = l_1 / (l_1 + l_2)$  – коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю,  $\rho_1$  – щільність цієї сталі.

Використовуюючи основні положення теорії мультифізичних еквівалентних кіл (наприклад, [8, 9]), рівнянню (4) після його просторової дискретизації на дискретні елементи довжиною  $\Delta x_k$  можна поставити у відповідність еквівалентне електричне  $RLC$ -коло, схему якого показано на рис. 1, б для дискретного елемента шихтованого магнітопроводу. Таке коло дозволяє моделювати механічні процеси через існуючу електромеханічну аналогію між механічними величинами – силою і швидкістю – та відповідно електричними величинами – струмом і вузловою напругою. Відповідно до цієї моделі суцільне середовище – магнітопровід – може бути представлене у вигляді послідовно розташованих зосереджених дискретних елементів з масою  $m_k$ ,  $k=1, \dots, N$  де  $N$  – загальна кількість елементів. Інерційні сили цих елементів моделюються за допомогою ємності  $C$  на рис. 1, б. Між цими елементами також існують пружні сили із в'язкими втратами, які відображаються за допомогою індуктивностей та резисторів, як показано на рис. 1, б. Для моделювання з високою точністю процесу поширення акустичної хвилі довжиною  $\lambda$  вздовж магнітопроводу за наявності в загальному випадку дефектів, довжина кожного елемента  $\Delta x_k$  повинна вибиратися, виходячи із наступних умов:  $\Delta x_k \ll \lambda$ ,  $\Delta x_k \leq \delta$  де  $\lambda$  – довжина хвилі, а  $\delta$  – характерний розмір дефекту.

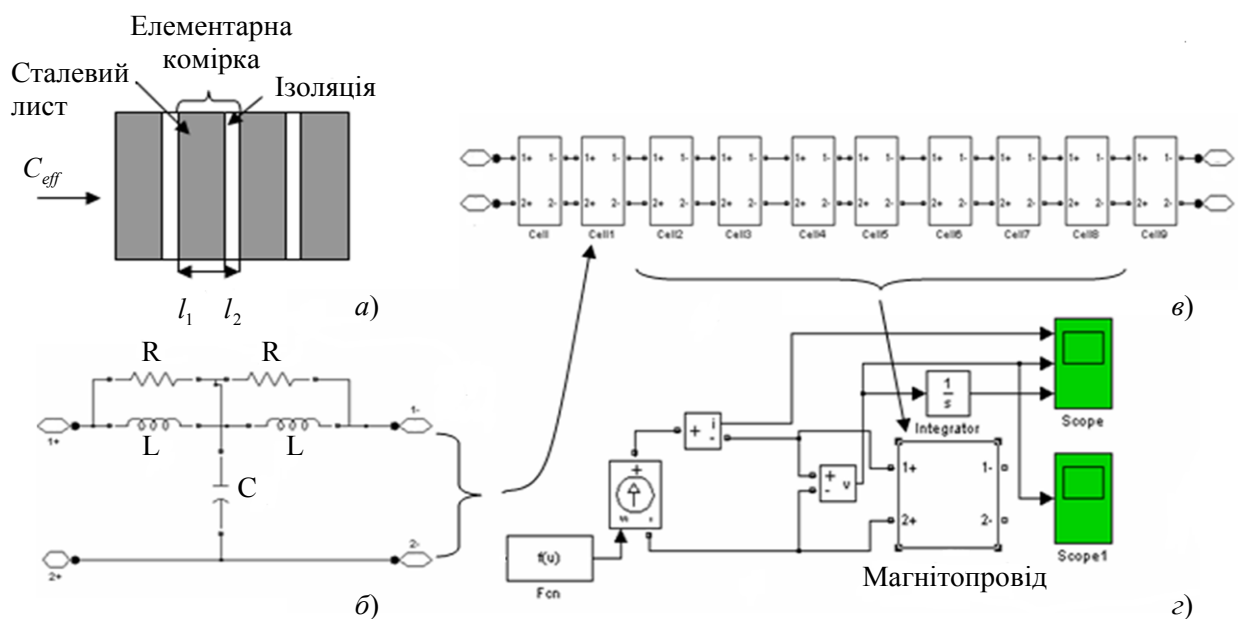


Рис. 1

Для аналізу електричних перехідних процесів в електричному колі за наявності великої кількості дискретних елементів у роботі використовувався пакет програм Matlab/Simulink. На рис. 1, з представлено Simulink-модель шихтованого магнітопроводу, що містить загальну кількість дискретних елементів  $N=100$ . Використовуючи блочну структуру цієї моделі, всі елементи були згруповані по 10 у кожному блоці (рис. 1, в) і з цих блоків будувалися макроблоки загальною кількістю також 10. Еквівалентне електричне коло для кожного елемента показано на рис. 1, б.

Джерело струму  $I(t)$  на вході в модель магнітопроводу на рис. 1, з моделює імпульсну механічну силу, що діє на поверхні магнітопроводу і задається у вигляді частини синусоїди

$$I(t) = \begin{cases} I_m \sin \pi t / \tau, & t \leq \tau, \\ 0, & t > \tau. \end{cases} \quad \text{де } \tau \text{ – тривалість імпульсу.}$$

Наведена Simulink-модель також містить засоби візуалізації результатів розрахунку, а саме – зміни у часі швидкості руху і величини деформації на поверхні магнітопроводу, значення яких збігаються відповідно з напругою на вході та з інтегралом по часу від цієї напруги.

Розрахунки проводилися при наступних значеннях параметрів магнітопроводу: довжина магнітопроводу у напрямку шихтовки  $l = 65$  мм, ширина 40 мм, висота 60 мм, товщина сталевих листів  $l_1 = 0,5$  мм, товщина ізоляційних проміжків  $l_2 = 0,005 \div 0,05$  мм, швидкість поширення звуку  $C_1 = 5100$  м/с,  $C_2 = 330$  м/с, щільність сталі  $\rho_1 = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $I_m = 1$  А,  $\tau = 1$  мкс.

Слід зазначити, що одним із найбільш типових дефектів для шихтованого магнітопроводу є так звана «розпушівка», тобто розшарування пакету магнітопроводу внаслідок послаблення зусилля, що через стяжні призми (шпильки) стискає серцевину магнітопроводу. Згідно з [6] стан пресування шихтованого магнітопроводу можна контролювати із застосуванням методів ударної діагностики. У даній роботі було доведено, що для діагностування стану пресування найбільш ефективним виявився метод спектрального аналізу. А саме кількість резонансних максимумів  $f_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  у спектрограмі вібрацій  $S(f)$  шихтованого магнітопроводу виявилася найбільш ефективною діагностичною ознакою, що дозволяє встановлювати ступінь зусилля  $p$ , з яким спресовано досліджуваний магнітопровід. Виходячи з цього, для шихтованого магнітопроводу саме стан пресування пластин є одним з основних факторів, який треба контролювати. Для прийняття вірного рішення про стан пресування шихтованого магнітопроводу при проведенні його діагностики необхідно мати еталони, які б відповідали найбільшій кількості значень моменту стягнення сталевих пластин у шихтованому пакеті.

На рис. 2 наведено результати розрахунку швидкості руху поверхні магнітопроводу в зоні прикладання імпульсної сили  $V = \partial u / \partial t|_{x=0}$  при двох значеннях коефіцієнта заповнення магнітопроводу сталлю  $k_z = 0,98$  («не розпушений» магнітопровід) та  $0,99$  («розпушений» магнітопровід). Довжина розпушеного магнітопроводу складає 71 мм. Як впливає із цих результатів, при імпульсному збудженні магнітопроводу в його об'ємі рухається одиночна хвиля, яка віддзеркалюється від його границь та спадає при цьому за амплітудою внаслідок втрат. Часова відстань між двома сусідніми імпульсами залежить від швидкості руху цієї хвилі та розміру магнітопроводу. У разі «розпушеного» магнітопроводу (рис. 2, б) швидкість руху цієї хвилі значно зменшується і відповідно часова відстань між двома імпульсами збільшується, що дозволяє діагностувати за цим параметром стан магнітопроводу. Із рис. 2 також видно, що при «розпушенні» магнітопроводу довжина хвилі зростає (див. величину  $\lambda_i$  на рис. 2, б).

Другий тип дефекту магнітопроводу, що розраховувався на основі наведеної Simulink-моделі, пов'язаний з порушенням цілісності шихтованого пакета. В роботі досліджувався випадок, коли суцільний пакет, що мав довжину  $l = 65$  мм, поділено на два окремих пакета довжиною  $0,3l$  і  $0,7l$ , між якими утворився повітряний проміжок товщиною  $0,5$  мм. На рис. 3 показано результати розрахунку швидкості руху поверхні магнітопроводу при коефіцієнті заповнення цих пакетів сталлю  $k_z = 0,99$  та за наявності такого типу дефекту шихтованого магнітопроводу. Із порівняння результатів на цьому рисунку та на рис. 2, а видно, що наявність дефекту призводить до додаткового віддзеркалювання імпульсної хвилі від дефекту і внаслідок цього часовий проміжок між імпульсами швидкості руху на поверхні магнітопроводу значно скорочується. При цьому збільшується загасання імпульсів та з'являються високочастотні осциляції. Виявлені особливості поширення ударної хвилі вздовж шихтованого магнітопроводу за наявності дефектів двох типів доцільно використовувати на практиці при діагностиці стану таких об'єктів.

**Експериментальні дослідження шихтованого магнітопро-**

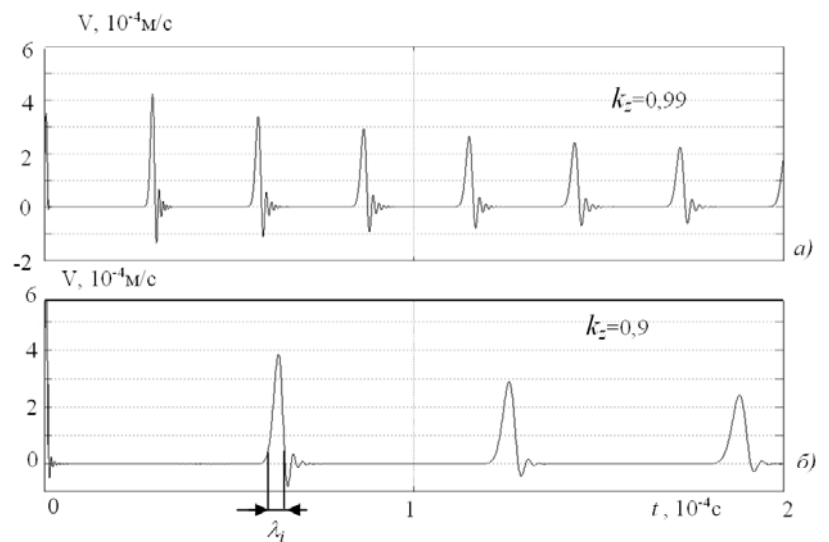


Рис. 2

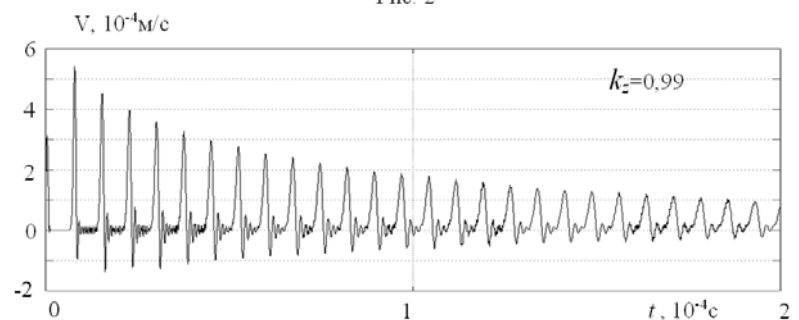


Рис. 3

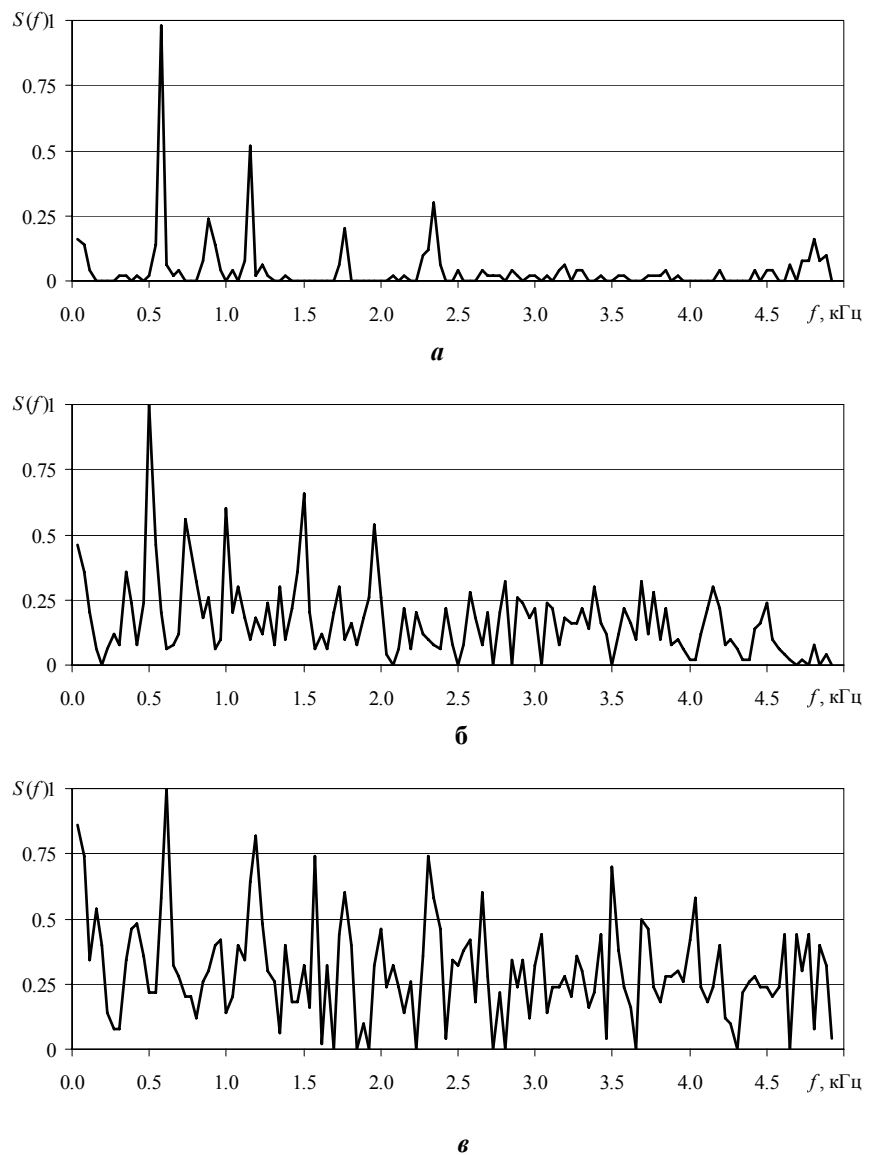
**воду.** Для експериментального дослідження інформативності запропонованих спектральних діагностичних ознак було використано фізичну модель шихтованого магнітопроводу та лабораторний зразок інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) ударної діагностики, структуру й особливості практичного використання яких досить докладно було описано у роботах [1, 6].

Експеримент із діагностування стану пресування пластин шихтованого магнітопроводу здійснювався наступним чином. Перш за все включався і налаштовувався лабораторний зразок ІВС ударної діагностики [1, 6]. Після налаштування ІВС у напрямку, перпендикулярному до площини магнітопроводу, за допомогою спеціального молотка [1] здійснювався удар. Збуджений вібраційний сигнал, що виникає у шихтованому магнітопроводі внаслідок цього, вимірювався акселерометром АВС-017, який встановлено на досліджуваному магнітопроводі. Вибраний акселерометр забезпечував вимірювання вібраційного сигналу у смузі частот 20 ... 30 кГц. Ступінь стискання пластин магнітопроводу здійснювалася за допомогою пари «гайка – шпилька». Кількісне значення ступеня стискання здійснювалося і контролювалося за допомогою динамометричного ключа.

На рис. 4 показано спектрограми віброприскорень, виміряні на шихтованому магнітопроводі, при трьох різних станах його стискання: рис. 4, а – стиснення 30 Н·м; рис. 4, б – 5 Н·м; рис. 4, в – стискання повністю відсутнє.

Як вже було зазначено, одержання та обробка експериментальних даних здійснювалися за допомогою лабораторного зразка ІВС статистичної діагностики [1, 6]. При проведенні цих експериментів аналоговий вібраційний сигнал перетворювався у цифровий код із частотою дискретизації  $f_d = 10$  кГц, тобто представлені на рис. 4 спектрограми містять інформацію про частоти аналізованого сигналу у смузі з верхньою граничною частотою 5 кГц. Як видно (рис. 4, в), при повній відсутності стискаючого зусилля в магнітопроводі у отриманій спектрограмі спостерігається значна кількість частотних складових (10, що перетинають умовний граничний рівень 0,5 за амплітудою) у всій смузі досліджуваних частот (до 5 кГц), що пояснюється вібраціями окремих пластин, які складають магнітопровід. Рівень 0,5 за амплітудою, за яким фіксується кількість максимумів спектрограми, обрано довільно для підрахунку цих максимумів.

Збільшення стискаючого зусилля у магнітопроводі до 5 Н·м призводить до зменшення кількості частотних максимумів у спектрограмі віброприскорень (рис. 4, б), які перевищують рівень 0,5. Крім того, у смузі частот, що спостерігається, відбувається перерозподіл амплітуд частотних максимумів. При максимальному значенні стискаючого зусилля 30 Н·м спектрограма вібрацій магнітопроводу (рис. 4, а) містить тільки 2 максимуми, які перетинають



**Рис. 4**

рівень 0,5. Ці максимуми розташовані в областях 700 та 1350 Гц. Слід відзначити, що у всіх трьох експериментах при різних рівнях стискання у вібраціях магнітопроводу відмічаються з різними амплітудами частотні складові у вказаних областях 700, 900, 1350, 1800 та 2400 Гц. Тобто одержані результати показали багаторезонансну структуру вібрацій шихтованого магнітопроводу.

Виходячи з розгляду спектрограм ударних вібраційних хвиль, що поширюються по тілу шихтованого магнітопроводу (типові з них представлені на рис. 4), можна відзначити, що найбільш інформативними діагностичними ознаками, що дозволяють діагностувати ступінь його пресування, є амплітуди  $A_f$  основних максимумів спектрограми  $S(f)$ , їхні частоти  $f_n$ , кількість основних максимумів  $n_f$  у фіксованій смузі частот.

Універсальність розглянутого методу ударної діагностики можна підтвердити шляхом його застосування до діагностики інших об'єктів. Наприклад, за допомогою цього методу можна з успіхом досліджувати резонансні властивості конструкцій, на яких монтується електротехнічне обладнання на енергетичних підприємствах, що розміщуються у районах з підвищеною сейсмічною активністю.

**Експериментальні дослідження високовольтного вимикача та пальових конструкцій.** При експлуатації на енергетичних об'єктах електротехнічне обладнання (ЕО), а також споруди, на яких воно встановлено, можуть піддаватися впливу різних динамічних сил, які призводять до виникнення механічних коливань. Такі сили породжуються безпосередньо при роботі цього устаткування (електричних машин, вимикачів, роз'єднувачів тощо) чи можуть бути зумовлені зовнішнім впливом, а саме: сейсмохвилями, які виникають під час землетрусу (особливо для ЕО енергопідприємств, що розташовані у районах Карпат та у Криму), і як наслідок, можуть призвести до руйнування цього устаткування за рахунок резонансу, який може виникнути на власних частотах коливання ЕО.

Для усунення негативних наслідків руйнування ЕО при землетрусах останнє розміщується на спеціальних сейсмостійких платформах. Конструювання та побудова таких платформ здійснюється з урахуванням резонансних властивостей певних типів ЕО.

На рис. 5 представлено схематичне зображення однієї фази вимикача ВВ-220, який встановлений на металевій рамі I, яка, в свою чергу, кріпиться на чотирьох залізобетонних опорах II. Акселерометри A1, A2, A3 для вимірювання вібраційної хвилі встановлені в точках 1, 2, 3. Стрілками показано місця та напрямки ударів, які наносилися за допомогою ударного молотка. Римською цифрою III позначено бак вимикача.

На рис. 6 показано типову спектрограму коливань однієї з фаз вимикача ВВ-220, які виміряні за допомогою акселерометра, розміщеного в точці 3, при нанесенні удару в точку 1. Обробка вимірних ударних хвильових сигналів здійснювалася за допомогою експериментального зразка інформаційно-вимірної системи ударної діагностики, яка детально описана у роботах [1, 6]. Як видно з представленої спектрограми, основні частоти коливань вимикача знаходяться в області 300 Гц. Можна відзначити також незначні підйоми в областях 550, 650, 800 та 920 Гц.

На рис. 7 та рис. 8 представлено типові спектрограми коливань вводу досліджуваного вимикача при збудженні цих коливань ударним молотком у точках 2 та 4 відповідно. Результати аналізу спектрограм частот вібрацій, наведених на рис. 7 та рис. 8, підтверджують, що основні коливання вводу вимикача знаходяться в області 300 Гц. Крім цієї основної частоти 300 Гц спостерігаються незначні складові вібрації в областях 550 та 800 Гц. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що для підвищення вібраційної стійкості вимикача ВВ-220 його варто розмістити на платформі, яка максимально послабить вплив частот в області 300 Гц.

Були проведені також дослідження відгуків у залізо-бетонних опорах, на яких розміщений вимикач ВВ-220. Удари проводилися у точках 5, ..., 8 та вимірювалися акселерометрами A1 та A2. На рис. 9 та рис. 10 показано типові спектрограми коливань, які збуджувалися в опорах при нанесенні

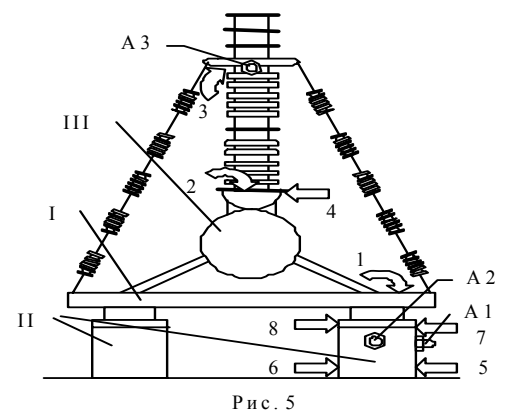


Рис. 5

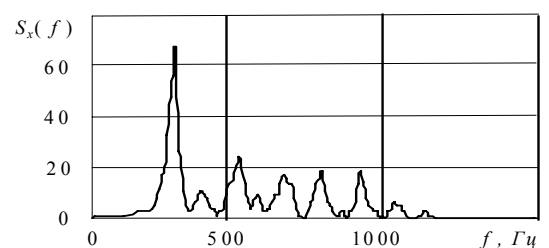


Рис. 6

ударів у точку 5 та точку 8 відповідно. Аналіз спектрограм, представлених на рис. 9, показує, що основні частотні складові ударних хвильових процесів, які поширюються в тілі опори, знаходяться в області 300, 500 та 600 Гц. Спектрограма рис. 10 підтверджує попередні результати, що основні частоти коливань опори з встановленим на ній вимикачем ВВ-220 знаходяться в області 300 Гц.

### Висновки.

1. За результатами аналізу побудованих математичних моделей виникнення і розповсюдження хвильових процесів та з використанням методу імітаційного моделювання було досліджено поширення хвильових процесів при ударному збудженні у шихтованому магнітопроводі як об'єкті кінцевих розмірів та з ефективними параметрами, що враховують складну композиційну його структуру. Розглянуто хвильові процеси у ньому за наявності дефектів двох типів – «розпушовка» листів у всьому об'ємі магнітопроводу та наявність локального повітряного проміжку між сталевими листами, та показано, яким чином наявність цих дефектів впливає на швидкість руху поверхні магнітопроводу, де встановлений акселерометр, що вимірює віброприскорення хвильового процесу.

2. На основі теорії лінійних випадкових процесів побудовано ймовірнісні моделі вібраційних діагностичних сигналів, що збуджуються ударним впливом і поширюються по шихтованому магнітопроводу та у пальових конструкціях, які використовуються як фундамент у сейсмостійких платформах для ЕО.

3. Експерименти по збудженню ударних вібраційних хвиль в окремих вузлах ЕО довели можливість використання результатів дослідження цих хвиль для діагностування технічного стану цих вузлів.

4. У результаті аналізу розглянутих спектрограм вібрацій повітряного вимикача ВВ-220 та залізобетонних опор, на яких він розміщений, для підвищення вібраційної стійкості вимикача варто розмістити на платформі, яка максимально ослабить вплив частот в області 300 Гц.

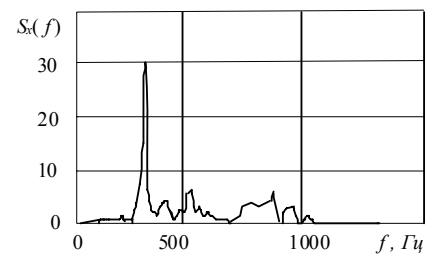


Рис. 7

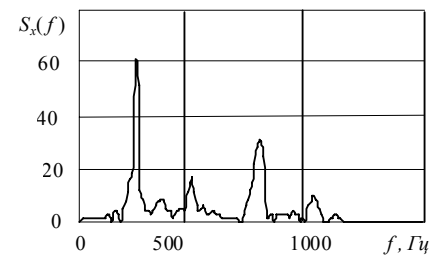


Рис. 8

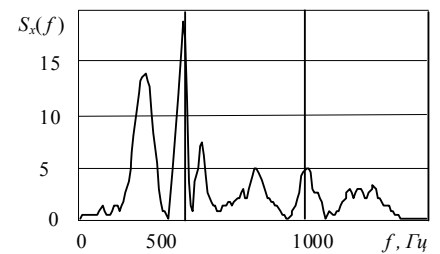


Рис. 9

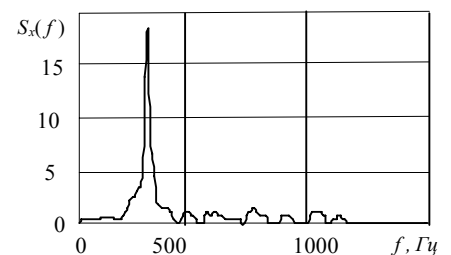


Рис. 10

1. Бабак С.В., Мыслович М.В., Сысак Р.М. Статистическая диагностика электротехнического оборудования. К.: Институт электродинамики НАН Украины, 2015. 456 с.
2. Бабаков И.М. Теория колебаний. М., Наука, 1988. 559 с.
3. Бьюлей Л.В. Волновые процессы в линиях передачи и трансформаторах. М.-Л.: ОНТИ, 1938. 236 с.
4. Городжа Л.В., Трощинский Б.А. Механическая и электрическая волновые модели железобетонных свай при эхо-дефектоскопии. *Техн. электродинамика. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки.* Ч.2. 2000. С. 103-108.
5. Кузьмин В.В., Лившиц А.Л., Шпатенко В.С. Малокапитальные и энергосберегающие технологии реабилитации турбогенераторов – основа технического перевооружения энергетики Украины. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи.* 2011. Вип. 2(14). С. 90-92.
6. Марченко Б.Г., Мыслович М.В., Целина В.Н. Ударная диагностика шихтованных магнитопроводов. Киев: Ин-т электродинамики АН Украины, 1993. 41 с. (Препринт АН Украины; Ин-т электродинамики, 745).
7. Синдеев И.М., Воскобоев В.В., Гаскаров Д.В. Надежность и эффективность в технике: Техническая диагностика. Том 9. М.: Машиностроение, 1987. 352 с.
8. Ленк А. Электромеханические системы. М.: Энергоатомиздат, 1982. 472 с.
9. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Институт электродинамики, 2015. 305 с.
10. Ключев В.В., Пархоменко П.П. Технические средства диагностирования: Справочник. М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
11. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. Львів: Фізико-механічний інститут НАН України, 2013. 804 с.
12. Paquet J. Etude vibratoire des en be'tonnepense harmonique et impulsionelle. Applicationn au controle. *Annales De L'Institut Technique du Batiment et des travaux Publics.* Mai 1968. P. 794-803.



**МОДЕЛИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**С.Н. Герцык<sup>1</sup>, А.Д. Городжа<sup>2</sup>**, канд.техн.наук, **М.В. Мыслович<sup>1</sup>**, докт.техн.наук,  
**А.Д. Подольцев<sup>1</sup>**, докт.техн.наук, **Р.М. Сысак<sup>1</sup>**, канд.техн.наук, **Б.О. Трошинский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина,

E-mail: [sergey.gertsik@gmail.com](mailto:sergey.gertsik@gmail.com); [mvsl@ied.org.ua](mailto:mvsl@ied.org.ua); [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua); [rsvsak@ied.org.ua](mailto:rsvsak@ied.org.ua);

<sup>2</sup> – Киевский национальный университет строительства и архитектуры,

Воздухофлотский пр. 31, Киев, 03037, Украина, e-mail: [gorodzha@knuba.edu.ua](mailto:gorodzha@knuba.edu.ua); [bohiant@gmail.com](mailto:bohiant@gmail.com)

*Рассмотрен вопрос построения математических моделей волновых процессов, которые возникают в сплошных объектах ограниченной формы ударным воздействием. Разработаны вероятностные модели вибрационных волновых процессов, которые распространяются в шихтованных магнитопроводах электрических машин, по результатам которых обосновано диагностические признаки определения степени прессования этих магнитопроводов. Проведено имитационное моделирование распространения ударной волны по исследуемому объекту. По результатам моделирования обосновано параметры и характеристики, которые описывают процесс распространения ударной волны в шихтованном магнитопроводе и в свайных конструкциях сейсмостойких фундаментов для электротехнического оборудования. Библ. 12, рис. 10.*

**Ключевые слова:** модели волновых процессов, ударная вибродиагностика, шихтованный магнитопровод, электро-энергетическое оборудование.

**MODELS OF WAVE PROCESSES IN OBJECTS OF LIMITED FORM AND THEIR USE FOR DIAGNOSTICS  
OF ELECTROTECHNICAL EQUIPMENT**

**S.M. Hertsyk<sup>1</sup>, A.D. Gorodzha<sup>2</sup>, M.V. Myslovych<sup>1</sup>, O.D. Podoltsev<sup>1</sup>, R.M. Sysak<sup>1</sup>, B.O. Troshchynskiy<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [sergey.gertsik@gmail.com](mailto:sergey.gertsik@gmail.com); [mvsl@ied.org.ua](mailto:mvsl@ied.org.ua); [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua); [rsvsak@ied.org.ua](mailto:rsvsak@ied.org.ua)

<sup>2</sup> – Kyiv National University of Construction and Architecture,

pr. Povitroflotskyi, 31, Kyiv, 03037, Ukraine, e-mail: [gorodzha@knuba.edu.ua](mailto:gorodzha@knuba.edu.ua); [bohiant@gmail.com](mailto:bohiant@gmail.com)

*In this article considered the problem of constructing mathematical models of wave processes that are excited in solid objects of limited form by shock influence. Probabilistic models of vibrational wave processes propagating in charged magnetic pipelines of electric machines, have been developed, based on results of which the diagnostic features for determining the degree of compression of these magnetic conductors have been substantiated. Carried out simulated simulation of shock wave propagation on the investigated object. Based on the results of the modeling, parameters and characteristics describing the process of propagation of shock wave in the charged magnetic circuit and in the pile structures of seismic-resistant foundations for electrical equipment are substantiated. References 12, figures 10.*

**Key words:** models of wave processes, shock vibration diagnosis, charged magnetic lead, power equipment.

1. Babak S.V., Myslovych M.V., Sysak R.M. Statistical diagnostics of electrical equipment. Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii nauk Ukrainy, 2015. 456 p. (Rus)
2. Babakov I.M. Theory of oscillations. Moskva: Nauka, 1988. 559 p. (Rus)
3. Bulley L.V. Wave processes in transmission lines and transformers. Moskva-Leningrad: ONTI, 1938. 236 p. (Rus)
4. Gorodzha L.V., Troshchynskiy B.A. Mechanical and electric wave models of reinforced concrete piles under echo-defectoscopy *Tekhnichna Elektrodynamika*. Tematychnyi vypusk Problemy suchasnoi elektrotekhniki. Part-2. 2000. P. 103-108. (Rus)
5. Kuzmin V.V., Livshits A.L., Shpatenko V.S. Low-cost and energy saving technologies of rehabilitation of turbine generators – is the basis of technical reequipment of the power industry of Ukraine. *Elektromechanichni i enerhozberihaiuchi tekhnolohii*. 2011. Issue 2(14). P. 90-92. (Rus)
6. Marchenko B.H., Myslovych M.V., Tselina V.N. Shock diagnostic of charged magnetic pipelines. Kyiv: Institut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii nauk Ukrainy. 1993. 41 p. (Preprint Akademii nauk Ukrainy, Institut Elektrodynamiky, 745). (Rus)
7. Sinder V.I., Voskoboev V.V., Gaskarov D.V. Reliability and efficiency in engineering: Technical diagnostics. Vol. 9. Moskva: Mashinostroenie, 1987. 352 p. (Rus)
8. Lenk A. Electromechanical systems. Moskva: Energoatomizdat, 1982. 472 p. (Rus)
9. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. Multiphysical modeling in electrical engineering. Kyiv: Instytut Elektrodynamiky NAN Ukrainy. 2015. 305 p. (Rus)
10. Klyuev V.V., Parkhomenko P.P. Technical means of diagnosis: Handbook. Moskva: Mashinostroenie, 1989. 672 p. (Rus)
11. Javorskyj I.M. Mathematical Models and Analysis of Stochastic Oscillations. Lviv: Fisyko-mekhanichniy Instytut NAN Ukrainy, 2013. 804 p. (Ukr)
12. Paquet J. Etude vibratoire des en be'tonnepense harmonique et impulsionelle. Application au controle. Annales De L'Institut Technique du Batiment et des travaux Publics. Mai 1968. P. 794-803.

Надійшла 04.07.2017  
Остаточний варіант 28.12.2017