

## № 12. ВІДДІЛ ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

УДК 621.3.011+621.3.013+621.313:62-799

### ОСНОВНІ ТВОРЧІ ЗДОБУТКИ ВІДДІЛУ ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ У 2010 РОЦІ

**Н.А. Шидловська<sup>1</sup>**, чл.-кор. НАН України, **Ю.М. Васецький<sup>2</sup>**, докт. техн. наук, **М.В. Мислович<sup>3</sup>**, докт. техн. наук

1–3 – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

*Висвітлюються основні наукові результати, отримані у відділі теоретичної електротехніки Інституту електродинаміки НАН України протягом 2010 року. Бібл. 17, рис. 5, таблиця.*

**Ключові слова:** електричне коло, перемикання, перехідний процес, індукційне нагрівання, спрощена математична модель, акустична емісія, імітаційне моделювання

У 2010 році відділ теоретичної електротехніки проводив наукові дослідження згідно з робочими планами за темами «Комплекс-2», «Сигма-Ш2» та «Об'єкт» у традиційних для тематики відділу напрямках:

- розвиток теорії і створення ефективних аналітичних методів дослідження процесів у нелінійних електричних колах (група під керівництвом члена-кореспондента НАН України Н.А. Шидловської);
- розробка асимптотичних і чисельно-аналітичних методів розрахунку електромагнітних систем (група докт. техн. наук Ю.М. Васецького);
- розвиток теорії і методів практичного використання інформаційно-вимірювальних систем статистичної діагностики електроенергетичного обладнання (група докт. техн. наук М.В. Мисловича);

Крім того, було виконано декілька проектів у рамках комплексних програм наукових досліджень НАН України «Ресурс» і «Об'єднання».

У статті зроблено короткий огляд основних наукових результатів, отриманих у цих напрямках за останній рік.

**Аналіз процесів у колах з перемиканнями.** Одним із можливих варіантів побудови пристроїв компенсації реактивної потужності є використання змінних електромагнітних або електростатичних полів [15]. Ефект генерування реактивної потужності досягається за допомогою вимушеної зміни напрямку струму в індуктивності або напруги на ємності, що здійснюється за допомогою керованого комутатора. При цьому циклічні зміни напрямку струму в індуктивності або напруги на ємності можуть відбуватися кілька разів за період напруги джерела живлення, а частота комутації вентилів може набувати будь-яких значень як вищих, так і нижчих частоти джерела живлення. Основу таких кіл складає послідовне  $RLC$ -коло, що живиться від джерела синусоїдної напруги, в якому керовані вентиляльні перетворювачі реверсують індуктивність або ємність у певні моменти часу. Зазначимо, що при розгляді процесів у таких колах керовані ключові елементи будемо вважати ідеальними. Можливі два варіанти керування реверсуваннями реактивних елементів: симетричні та несиметричні. У випадку симетричного керування перемиканнями  $\Delta t$  між перемиканнями однакові:

$$\Delta t = t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \dots, \quad (1)$$

тобто якщо  $t_0 = 0$ ,

$$t_1 = \Delta t; t_2 = 2\Delta t; \dots t_n = (n+1)\Delta t, n=0,1,2,3,\dots \quad (2)$$

Зазначимо, що перше ввімкнення кола вважатимемо нульовим. При несиметричному керуванні будуть відрізнятися інтервали часу при парному і непарному номері перемикань

( $n$ ). Однак суми непарного  $\Delta t_{\text{нп}}$  і парного  $\Delta t_{\text{п}}$  інтервалів часу у нашому випадку будуть рівні інтервалу  $2\Delta t$ .

Задача полягає в знаходженні рекурентних формул, що дозволяють описувати процеси в колі після будь-якої кількості перемикачів. Зазначимо, що схожа проблема для випадку симетричного керування перемикачними піднімалась у роботі [12].

Рівняння Кірхгофа для кола, що аналізується, має вигляд

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2h \frac{dq}{dt} + k^2 q = \frac{U_m}{L} \sin(\omega_1 t + \varphi_0), \quad i = \frac{dq}{dt}, \quad (3)$$

де

$$\frac{R}{L} = 2h; \quad \frac{1}{LC} = k^2; \quad (4)$$

$R$  – значення опору;  $L$  – індуктивність;  $C$  – ємність;  $U_m$  – максимальне значення напруги;  $\omega_1$  – кутова частота;  $\varphi_0$  – початкова фаза.

Початкові умови при першому вмиканні описуються співвідношенням

$$q|_{t=t_0} = q_{\text{ноч}}; \quad \left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=t_0} = i_{\text{ноч}}. \quad (5)$$

При реверсуванні ємності або індуктивності конфігурація кола не змінюється. Таким чином, не змінюється диференціальне рівняння, що описує процеси у ньому і, як наслідок, його розв'язок. Для випадку реверсування ємності відносно джерела живлення, згідно з законами комутації, початковими умовами на довільному інтервалі часу  $[t_n, t_{n+1}]$  після перемикачання в момент часу  $t_n$  будуть

$$q|_{t=t_{n+}} = -q|_{t=t_{n-}}, \quad \left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=t_{n+}} = \left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=t_{n-}}, \quad (6)$$

а для випадку реверсування індуктивності –

$$q|_{t=t_{n+}} = q|_{t=t_{n-}}, \quad \left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=t_{n+}} = -\left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=t_{n-}}. \quad (7)$$

Якщо в колі має місце коливальний режим, розв'язком диференціальних рівнянь (3) будуть

$$q = e^{-ht} (C_{1n} \cos pt + C_{2n} \sin pt) + \frac{U_m}{L} \alpha \sin(\omega_1 t + \varphi_0 + \delta); \quad (8)$$

$$i = \frac{dq}{dt} = e^{-ht} \left\{ -C_{1n} (h \cos pt + p \sin pt) + C_{2n} (p \cos pt - h \sin pt) \right\} + \frac{U_m}{L} \alpha \omega_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_0 + \delta), \quad (9)$$

де  $C_{1n}$ ,  $C_{2n}$  – перша і друга сталі інтегрування після  $n$ -го перемикачання,

$$p^2 = k^2 - h^2; \quad \alpha = \frac{1}{\sqrt{(k^2 - \omega_1^2)^2 + 4h^2 \omega_1^2}}; \quad \delta = -\arctg \frac{2h\omega_1}{k^2 - \omega_1^2}, \quad (10)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт спотворення і  $\delta$  – зсув фаз.

У випадку реверсування ємності на довільному інтервалі часу  $[t_n, t_{n+1}]$  після перемикачання в момент часу  $t_n$  сталі інтегрування у співвідношеннях (8), (9) визначаються співвідношеннями

$$\begin{aligned} C_{1n} &= -\frac{B_n}{p} \sin pt_n + A_n \left( \cos pt_n - \frac{h}{p} \sin pt_n \right), \\ C_{2n} &= \frac{B_n}{p} \cos pt_n + A_n \left( \frac{h}{p} \cos pt_n + \sin pt_n \right), \end{aligned} \quad (11)$$

де

$$A_n = -(C_{1,n-1} \cos pt_n + C_{2,n-1} \sin pt_n) - \frac{2U_m}{L} \alpha e^{ht_n} \sin(\omega_1 t_n + \varphi_0 + \delta); \quad (12)$$

$$B_n = -C_{1,n-1}(h \cos pt_n + p \sin pt_n) + C_{2,n-1}(p \cos pt_n - h \sin pt_n).$$

Для випадку реверсування індуктивності відповідні співвідношення мають вигляд

$$\begin{aligned} C_{1n} &= -\frac{B_n}{p} \sin pt_n + A_n \left( \cos pt_n - \frac{h}{p} \sin pt_n \right); \\ C_{2n} &= \frac{B_n}{p} \cos pt_n + A_n \left( \frac{h}{p} \cos pt_n + \sin pt_n \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Тут

$$A_n = C_{1,n-1} \cos pt_n + C_{2,n-1} \sin pt_n; \quad (14)$$

$$B_n = C_{1,n-1}(h \cos pt_n + p \sin pt_n) - C_{2,n-1}(p \cos pt_n - h \sin pt_n) - e^{ht_n} \frac{2U_m}{L} \alpha \omega_1 \cos(\omega_1 t_1 + \varphi_0 + \delta).$$

Одержано також співвідношення для випадків аперіодичного та критичного випадків розряду конденсатора [13, 14].

Рис. 1 демонструє процеси у колі при симетричному та несиметричному реверсуванні ємності, а рис. 2 – індуктивності у коливальному розряді конденсатора. Розглянуто випадки симетричного керування перемикачними  $\Delta t_{\text{мн}} = \Delta t_n = \frac{T}{4} = 0,005 \text{ с}$  (криві  $u_{C1}$ ,  $i_{L1}$ ), випадок, коли інтервали між перемикачними значно відрізняються один від одного  $\Delta t_{\text{мн}} = 0,001 \text{ с}$ ,  $\Delta t_n = 0,009 \text{ с}$  (криві  $u_{C2}$ ,  $i_{L2}$ ) і коли вони різняться несуттєво:  $\Delta t_{\text{мн}} = 0,004 \text{ с}$ ,  $\Delta t_n = 0,006 \text{ с}$  (криві  $u_{C3}$ ,  $i_{L3}$ ).

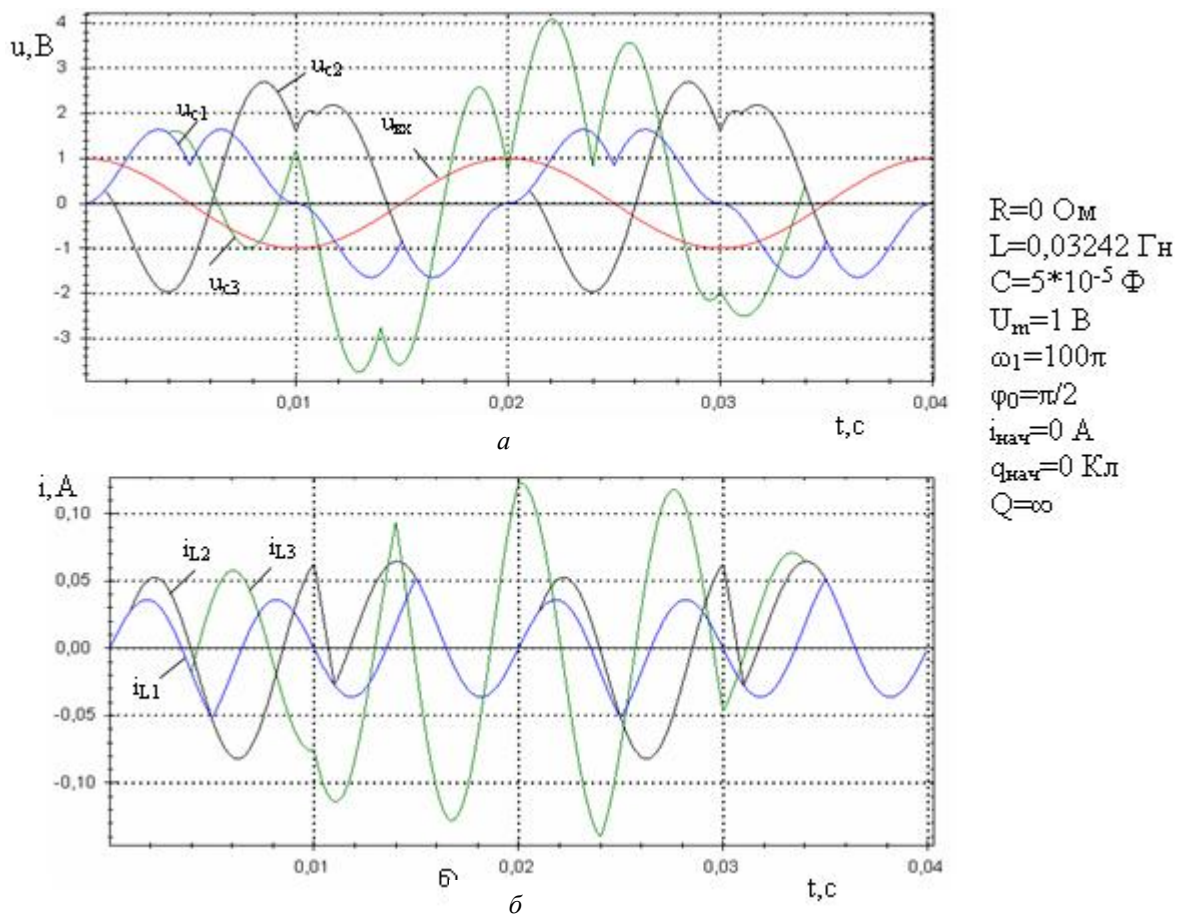


Рис. 1

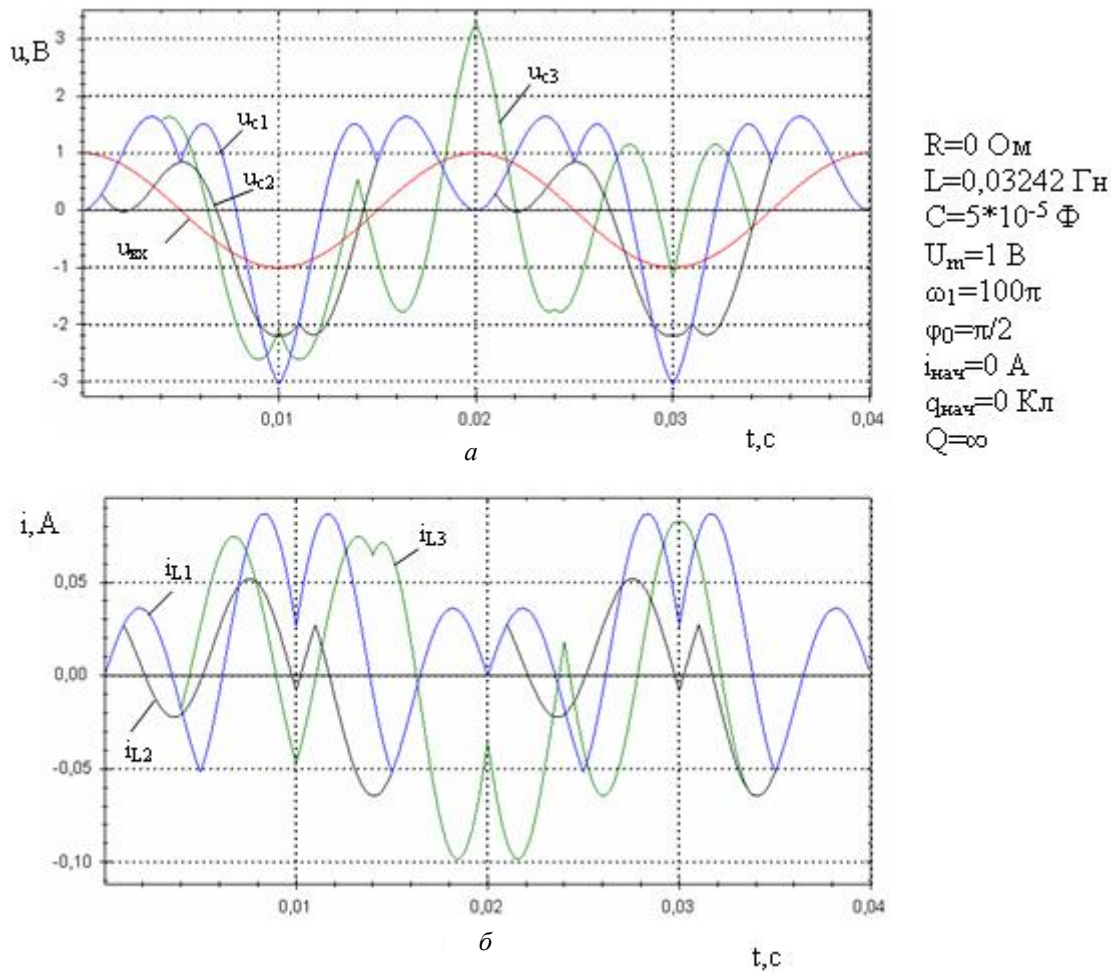


Рис. 2

**Оцінка параметрів високочастотного електромагнітного впливу на рухомі електропровідні середовища для розробки наближених математичних моделей.** Наближені асимптотичні методи розрахунку виявляються виправданими при аналізі процесів і параметрів пристроїв, що містять рухомі електропровідні середовища при спільному прояві електромагнітних і теплових явищ. Такі методи дозволяють урахувати найбільш суттєві геометричні, електро- та теплофізичні особливості електромагнітних систем [3]. У даному випадку в рамках задачі високочастотного індукційного нагрівання електропровідних стрічок основною метою є аналіз електромагнітних і теплових параметрів для визначення можливості використання наближених математичних моделей і знаходження умов, при яких можна окремо розглядати електромагнітну і теплову задачі [4, 16].

Звичайно при високочастотному індукційному нагріванні металевих стрічок наступні безрозмірні параметри виявляються малими:

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta}{d}; \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{h} \left( \frac{\mu}{\omega \mu_0 \gamma} \right)^{1/2}; \quad \varepsilon_3 = \frac{v}{\omega h}; \quad \varepsilon_4 = \frac{h}{D}, \quad (15)$$

де  $\delta$  – глибина проникнення поля;  $\omega$  – циклічна частота;  $\gamma$  – електропровідність;  $\mu$  – відносна магнітна проникність;  $d$  – товщина стрічки;  $h$  – висота розташування провідника індуктора над поверхнею стрічки;  $v$  – швидкість стрічки;  $D$  – характерний розмір контура індуктора. Більше того, для проведення оцінок у випадку високочастотного поля достатньо обмежитися першим ненульовим членом густини потоку електромагнітної енергії в електропровідне середовище:

$$p_z = \frac{I^2 \zeta}{\pi^2 h^2} \cdot \frac{1}{(1 + \zeta^2 / h^2)^2}, \quad (16)$$

де  $\zeta = \sqrt{\frac{\omega \mu \mu_0}{2\gamma}}$  – модуль величини поверхневого імпедансу.

**Вирівнювання температури за товщиною металеві стрічки.** Параметром, що відображає характер теплопередачі вглиб стрічки, може служити відношення часу встановлення однорідної температури за товщиною до характерного часу нагрівання. У відповідності з цим параметром температура вирівнюється за товщиною вже за час проходження стрічки під провідником зі струмом. Тому в математичних моделях температура може бути прийнята всюди однорідною за товщиною, за винятком ділянок, які в даний час перебувають під провідником контура.

**Теплопередача теплопровідністю уздовж поверхні металеві стрічки поблизу проміжних точок контура.** Безпосередньо під контуром зі струмом для ділянок металеві стрічки, що не проходять поблизу країв контура, має місце значний градієнт температури, спрямований у напрямку, протилежному вектору швидкості стрічки. Наявність градієнта температури і рух середовища обумовлюють відповідні теплові потоки.

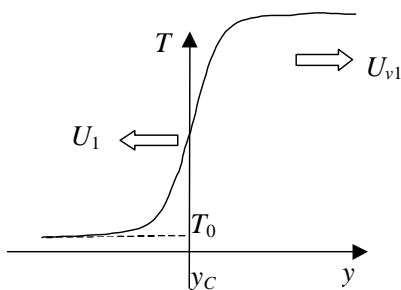


Рис. 3

Рис. 3 якісно ілюструє напрямки потоків теплової енергії, пов'язаної з теплопровідністю  $U_1$  і перенесенням тепла рухом середовища  $U_{v1}$ .

Порівняємо максимальну величину потоку  $U_1$  безпосередньо під контуром  $U_{1\max}$  з потоком тепла, який переноситься рухом нагрітого металу. Для характеристики теплопередачі теплопровідністю в напрямку уздовж вектора швидкості в порівнянні з теплопередачею рухом введемо такий параметр:

$$\varepsilon_{L1} = \frac{U_{1\max}}{U_{v1}} = \frac{\lambda}{c\rho v} \cdot \frac{p_z(0, h)}{\int_{-\infty}^{\infty} p_z(\xi, h) d\xi}, \quad (17)$$

де  $c$  – питома теплоємність;  $\lambda$  – теплопровідність;  $\rho$  – густина середовища.

З урахуванням (16) вираз для  $\varepsilon_{L1}$  набуває вигляду

$$\varepsilon_{L1} = \frac{2\lambda}{\pi c\rho h v}. \quad (18)$$

Для стрічок з алюмінію, латуні та сталі при  $h = 3 \cdot 10^{-2}$  м і швидкості руху  $v = 10^{-1}$  м/с значення параметра  $\varepsilon_{L1}$  наведено в таблиці.

Параметр	Алюміній	Латунь	Сталь
$\varepsilon_{L1}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
$\varepsilon_{L2}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$

Видно, що в усіх випадках і навіть при швидкості у декілька сантиметрів на секунду за рахунок стрибка температури в області провідника контура теплопередачею теплопровідністю можна нехтувати в порівнянні з переносом тепла за рахунок руху нагрітого металу.

**Теплопередача теплопровідністю уздовж поверхні металеві стрічки поблизу країв контура.** Поблизу країв контура з зовнішньої його частини градієнт температури спрямований перпендикулярно напрямку руху металу, що нагрівається (рис. 4), причому уведення тепла відбувається на досить протяжній ділянці, з характерним розміром, що дорівнює характерному розміру контура  $D$ .

Кількість тепла, що надійшло в ділянку смуги малої довжини  $\Delta u$  шириною  $2\xi$ , буде

$$\Delta W_{v2} = \int_{-\xi}^{\xi} p_z(\xi, h) \Delta y \Delta t d\xi, \quad (19)$$

де  $\Delta t = D/v$  – час нагрівання ділянки.

Кількість тепла, що віддається теплопровідністю з бічної поверхні ділянки, буде

$$\Delta W_2 = - \int_{-D/2v}^{D/2v} \lambda \frac{\partial T(\xi, y)}{\partial \xi} d\Delta y dt = - \frac{\lambda d \Delta y}{v} \int_{-D/2}^{D/2} \frac{\partial T(\xi, y)}{\partial \xi} dy, \quad (20)$$

де  $y$  – координата уздовж напрямку руху, що відраховується від краю контура.

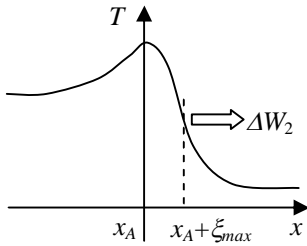


Рис. 4

Параметром, що дає змогу оцінити вплив вказаних двох процесів теплопередачі, може бути відношення енергії, яка надійшла в елементи смуги шириною  $2\xi$ , до максимальної енергії, відданої внаслідок теплопровідності на лінії з максимальним градієнтом температури  $\varepsilon_{L2} = W_{2\max} / W_{v2}$ . Напрямок потоку теплової енергії, пов'язаного з теплопровідністю, і координата  $\xi_{\max}$  лінії максимального градієнта температури показано на рис. 4.

Для проведення оцінок будемо вважати, що тепло підводиться рівномірно на ділянці довжиною  $D$ . У цьому випадку, проводячи обчислення з урахуванням (16), знайдемо наступну оцінку параметра  $\varepsilon_{L2}$ :

$$\varepsilon_{L2} = W_{2\max} / W_{v2} = 1,3 \cdot \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{D}{vh^2}. \quad (21)$$

У таблиці наведено значення  $\varepsilon_{L2}$  для параметрів нагрівання, вказаних раніше. Видно, що в більшості випадків тепловіддача теплопровідністю поблизу країв залишається незначною порівняно з теплопритоком, обумовленим джоулевою дисипацією електромагнітної енергії. Тільки при відносно невеликих швидкостях теплові потоки можуть виявитися порівнянними, особливо для матеріалів з високим значенням температуропровідності (алюміній, мідь та ін.).

На підставі виконаних оцінок основних параметрів нагрівання рухомих металевих стрічок у змінному височастотному полі впливають положення, що можуть бути використані при розробці математичних моделей розглянутих процесів:

1. За товщиною у будь-якій точці металевих стрічок поза областю безпосередньо під контуром зі струмом температуру можна вважати однорідною;

2. У напрямках уздовж поверхні металевої стрічки, що нагрівається, теплопередача за рахунок теплопровідності істотно мала порівняно з теплопереносом, обумовленим рухом середовища і теплопритоком за рахунок джоулевої дисипації електромагнітної енергії. Тому процес нагрівання можна назвати адіабатичним нагріванням тонких металевих стрічок. Температура у будь-якій точці рухомої стрічки при умові малості параметрів (14) буде мати вигляд

$$T(x) = \frac{P(x, y)}{c\rho v d}, \quad (22)$$

де  $P(x, y) = \int_{-\infty}^y p_z(\xi, h) d\xi$  – лінійна густина потоку теплової енергії, що виділилася у стрічці в точці, яка в процесі руху досягла координати  $y$ .

Таким чином, у наведеному випадку загальна задача взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів значно спрощується, і у більшості випадків достатньо визначити лише енергію, що передається стрічці електромагнітним полем.

**Імітаційне моделювання процесів акустичної емісії та використання його результатів при діагностиці електротехнічного обладнання.** У галузі розвитку теорії і методів практичного використання інформаційно-вимірjuвальних систем (ІВС) статистичної діагностики електроенергетичного обладнання (ЕО) проводились дослідження як у галузі розвитку теорії і статистичних методів, на яких базуються ІВС діагностики, так і в галузі їх практичного застосування для розв'язування задач моніторингу, контролю і діагностики ЕО. Прикладне спрямування цього напрямку обумовлене, перш за все, критичним станом ЕО українських станцій і підстанцій.

З одного боку, практичне застосування таких діагностичних систем дозволяє оперативно за результатами моніторингу діагностичних сигналів визначати технічний стан ЕО, що експлуатується. З іншого боку, використання даних моніторингу, а також спеціальних методів обробки сигналів (у нашому випадку – це методи статистичних сплайн-функцій) дозволяють прогнозувати залишковий ресурс досліджуваного ЕО. Остання задача зводиться до можливості визначення очікуваного часового інтервалу, в який може відбутися відмова досліджуваного вузла. В підсумку, отримані результати дозволяють відмовитися від виконання планово-попереджувальних ремонтів, передбачених план-графіком, і перейти до виконання ремонтів обладнання за його фактичним станом.

Визначальним моментом при проведенні моніторингу, контролю і діагностики ЕО є вибір діагностичного сигналу, що несе корисну інформацію про його фактичний технічний стан. Функціонування ЕО супроводжують різноманітні фізичні процеси – електромагнітні, вібраційні, акустоемісійні (АЕ), теплові та ін. У 2010 році у відділі теоретичної електротехніки досліджувалися АЕ сигнали та їх характеристики, що можуть бути використані при визначенні фактичного 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 [8, 10, 11], визначення діагностичних параметрів при проведенні АЕ діагностики можливе за результатами аналізу математичної моделі (імітаційного моделювання) процесу АЕ, а також за результатами проведення експериментальних досліджень. У відділі були проведені роботи по створенню методів та програмного забезпечення для імітаційного моделювання процесів АЕ, які супроводжують роботу ЕО. На основі цього були визначені ймовірнісні характеристики процесів АЕ, що можуть бути використані при проведенні діагностики та визначенні ступеня механічного навантаження окремих вузлів ЕО. Розглянемо отримані результати детальніше.

**Модель лінійного випадкового процесу в описі АЕ сигналів.** Для проведення імітаційного моделювання зробимо деякі пояснення стосовно практичного використання моделі лінійного випадкового процесу (ЛВП) [6, 8, 9] для опису процесу АЕ. Як зазначалося в цих роботах, використання класу ЛВП дозволяє проводити повний ймовірнісний аналіз відгуків як лінійних, так і нелінійних систем навіть у випадках впливу на ці системи породжувачих процесів, що мають пуассонівський розподіл. Згідно з [6, 8, 9] ЛВП припускає представлення

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\eta(\tau), \quad t \in T, \quad (23)$$

де  $\{\eta(\tau), \eta(0) = 0, \tau \in (-\infty, \infty)\}$  – стохастично неперервний процес з незалежними приростами, який називають породжувачим;  $\varphi(\tau, t)$  – 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  $\kappa_p(\tau)$  – семиінваріант  $p$ -го порядку процесу  $\eta(\tau)$ ;  $T \in (-\infty, \infty)$ .

З урахуванням [6, 9], процес (23) є результатом лінійної фільтрації процесу типу білого шуму. Канал виникнення та поширення у досліджуваному об'єкті АЕ сигналу схематично може бути представлений наступним чином (рис. 5).

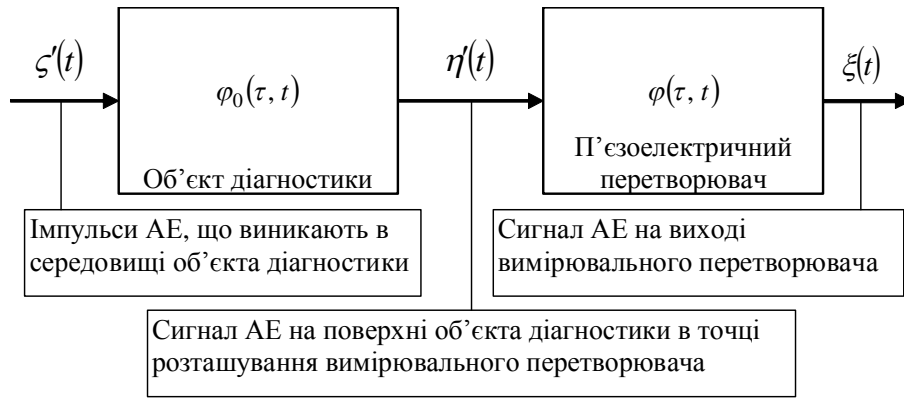


Рис. 5

На основі властивостей ЛВП [6, 8, 9] вимірюваний на виході п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) сигнал АЕ  $\xi(t)$ , у припущенні, що він є стаціонарним, має вид

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) \eta'(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) \varphi_0(\tau_1, \tau) d\zeta(\tau_1) d\tau. \quad (24)$$

Якщо позначити  $\varphi_1(\tau, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau_1, t) \varphi_0(\tau, \tau_1) d\tau_1$ , вираз (24) можна записати так:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(\tau, t) d\zeta(\tau). \quad (25)$$

Згідно з [6, 8, 9], у цьому випадку імовірнісні характеристики процесу  $\xi(t)$  можуть бути визначені при умові 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 на цих моментах базуються при побудові схеми імітаційного моделювання процесу АЕ. Виходячи з цього, а також з урахуванням [8, 10] імпульси АЕ, які виникають у середовищі об'єкта діагностики, можуть бути представлені виразом

$$\varphi_0(s) = \alpha \cdot e^{-\alpha s} \cdot U(s), \quad s \in (-\infty, \infty), \quad s = t - \tau, \quad (26)$$

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

На підставі [7, 8, 10, 11] імпульсна перехідна функція ПЕП має вигляд

$$\varphi(\tau, t) \equiv \varphi(s) = \gamma \cdot e^{-\beta s} \sin \theta s \cdot U(s), \quad s = t - \tau, \quad s \in (-\infty, \infty), \quad (27)$$

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

Виходячи з (24) і з врахуванням (26) і (27), процес АЕ на виході ПЕП

$$\xi(t) = \frac{\alpha \cdot \gamma}{(\alpha - \beta)^2 + \theta^2} \left[ \theta \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \cos[\theta(t-\tau)] d\tau + (\alpha - \beta) \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \sin[\theta(t-\tau)] d\tau \right]. \quad (28)$$

Вираз (28) являє собою сумісну імпульсну перехідну функцію, яка характеризує канал поширення 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 (26) і (27) відповідно. Зазвичай, при вирішенні цієї задачі припускається, що імпульсні АЕ сигнали, які вимірюються ПЕП у точці його розміщення на поверхні досліджуваного об'єкта, не мають суттєвого впливу на власні характеристики ПЕП. Крім того, згідно з [7, 8, 10], при моделюванні ПЕП з імпульсною перехідною функці-



єю (27) найбільш цікавий з точки зору практики коливальний режим роботи, коли у виразі (27)  $\theta > 0$ , 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.

**Програма імітаційного моделювання процесу АЕ.** «Моделювання АЕ» складається з кількох модулів, об'єднаних для виконання спільної задачі. Головний модуль програми забезпечує її запуск та виведення головного вікна. Модуль інтерфейсу містить підпрограми, що забезпечують:

- обробку системних подій (наприклад, відкриття та закриття вікна);
- обробку команд користувача (натискання кнопок, вибір пунктів меню тощо) та введення даних.

Модуль моделювання виконує такі операції:

- обчислення реалізації вхідного сигналу у вигляді поодинокого імпульсу релаксаційного типу (згасаючого за експонентою);
- обчислення реалізації вхідного сигналу у вигляді пуассонівської послідовності вхідних імпульсів релаксаційного типу;
- обчислення імпульсної реакції ПЕП, яка в подальшому використовується в 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 наступні параметри:

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

2. Параметри коливальної системи включають: тривалість реалізації (у секундах), параметри  $R$  (Ом),  $L$  (мГн) і  $C$  (мкФ), які характеризують ПЕП. Крім того, у лівій частині вікна відображаються результати обчислень кількісних оцінок параметрів  $\beta$  (1/с);  $\omega$  (рад/с);  $\theta$  (рад/с);  $f_{рез}$  (1/с). 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: поодинокий імпульс або послідовність імпульсів. Для поодинокого імпульсу вказується: амплітуда (умовні одиниці – далі у.о.), затримка початку (с). Для серії імпульсів: інтенсивність (1/с), середня амплітуда (у.о.), середньоквадратичне відхилення амплітуд окремих імпульсів (у.о.). Додатково для обох видів вхідного сигналу задаються: тривалість реалізації (с) і коефіцієнт згасання (1/с). Виведення графіка вхідного впливу здійснюється за допомогою натискання на кнопку «Графік», яка розташована праворуч.

**Основні задачі імітаційного моделювання сигналів АЕ та отримані результати.**

Основні задачі дослідження були такими:

1. 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 (26).

2. Аналіз сигналу на виході ПЕП при впливі на його вхід імпульсної пуассонівської послідовності заданої інтенсивності  $\lambda = const$  при зміні параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , що характеризують ПЕП.

3. Аналіз відгуку на виході ПЕП при впливі на його вхід імпульсної пуассонівської послідовності з різними значеннями інтенсивності  $\lambda$ . При цьому параметри  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , що характеризують ПЕП, залишаються незмінними.

Аналіз результатів моделювання показав, що зростання значень коефіцієнта  $\alpha$  (досягається шляхом збільшення величини  $R$ ) призводить до зменшення протяжності відгуку та зниження кількості його коливань. Це підтвердило необхідність врахування власних характеристик ПЕП при проведенні вимірювань АЕ сигналів.

Далі проводилося формування та визначення характеру імпульсної послідовності на виході ПЕП при зміні його  $R$ ,  $L$ ,  $C$  параметрів, але при сталій інтенсивності  $\lambda$  вхідного процесу. Як показав аналіз результатів моделювання, у випадку, коли ПЕП має досить високу добротність, сигнал на його виході являє собою послідовність, у якій задній фронт кожного імпульсу має яскраво виражений коливальний характер. При зменшенні добротності ПЕП коливальний характер заднього фронту в імпульсах стає менш вираженим. І, нарешті, коли ПЕП являє собою систему з низькою добротністю, імпульси у послідовності на його виході набувають експоненціального характеру, тобто 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  $\lambda$  та при незмінних параметрах  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Як показало моделювання, збільшення значення параметра  $\lambda$  призводить до зростання кількості імпульсів на фіксованому інтервалі часу.

Враховуючи, як зазначено в [1, 2, 5, 11, 17], зростання інтенсивності  $\lambda$  процесу АЕ при підвищенні механічного навантаження у досліджуваному об'єкті, цю можливість створеної програми можна використовувати при обґрунтуванні параметра  $\lambda$  у якості діагностичної ознаки, що дозволяє визначити ступінь навантаження на об'єкт, який діагностується.

**Висновки.** Проаналізовано процеси в  $RLC$ -колі синусоїдної напруги при реверсуванні в ній ємнісного або індуктивного елемента. Одержано рекурентні співвідношення, що дають можливість знаходити напругу на ємності і струм через індуктивність на будь-якому проміжку часу, незалежно від кількості реверсувань до цього при симетричному та несиметричному керуванні перемиканням. Досліджено основні режими роботи кола (коливальний, граничний, аперіодичний).

Виконані оцінки основних параметрів нагрівання рухомих металевих стрічок у змінному високочастотному полі дозволили визначити можливість застосування спрощених математичних моделей загальної задачі взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів і знайти умови, при яких достатньо визначити лише енергію, що передається стрічці електромагнітним полем.

На базі математичної моделі лінійних випадкових процесів було узагальнено підхід до імітаційного моделювання сигналів АЕ та створено відповідне програмне забезпечення. Обґрунтовано необхідність врахування власних характеристик датчиків АЕ при вимірюванні сигналів АЕ. Результати імітаційного моделювання сигналів АЕ дозволили обґрунтувати можливість використання в якості діагностичної ознаки інтенсивності  $\lambda$  сигналів АЕ.

1. *Андрейкив А.Е., Лысак Н.В.* Метод акустической эмиссии в исследованиях процессов разрушения. – К.: Наук. 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. *Васецкий Ю.М.* Асимптотические методы решения задач электродинамики в системах с массивными криволинейными проводниками. – К.: Наук. думка, 2010. – 271 с.
4. *Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л.* Параметры электромагнитных и тепловых процессов для приближенных математических моделей высокочастотного индукционного нагрева электропроводных лент // Техн. электродинамика. – 2010. – № 5. – С. 10–17.
5. *Дробот Ю.Б., Лазарев А.М.* Неразрушающий контроль акустико-эмиссионным методом. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.

6. *Марченко Б.Г.* Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике. – К.: Наук. думка, 1973. – 192 с.
7. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Белые шумы в колебательных системах – Киев, 1989. – 42 с. (Препр. / НАН Украины, Ин-т электродинамики; № 599).
8. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. – К.: Наук. думка, 1992. – 195 с.
9. *Марченко Б.Г., Щербак Л.Н.* Линейные случайные процессы и их приложения. – К.: Наук. думка, 1975. – 143 с.
10. *Мыслович М.В., Улитко А.В.* Модели усталостных дефектов в узлах электротехнического оборудования и их использование при создании акустико-эмиссионных информационно-измерительных систем диагностики // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2002. – Ч. 4. – С. 114–119.
11. *Мыслович М.В., Улитко А.В.* Обоснование диагностических признаков для использования в акустико-эмиссионных системах диагностики авиационного оборудования // Мат. V Міжнар. наук.-техн. конф. «АВІА 2003». – К.: НАУ, 2003. – Ч. 11. – С. 91–95.
12. *Федий В.С., Соболев В.Н.* Электромагнитные процессы в последовательном  $RLC$ -контуре с коммутатором в цепи емкости (индуктивности) // Электричество. – 1996. – № 9. – С. 67–71.
13. *Шидловская Н.А.* Исследование  $RLC$ -цепи синусоидального напряжения с управляемым реверсированием индуктивного элемента // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 3–10.
14. *Шидловская Н.А.* Процессы в  $RLC$ -цепи синусоидального напряжения с управляемым реверсированием емкости // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 3–11.
15. *Шидловский А.К., Федий В.С.* Частотно-регулируемые источники реактивной мощности. – К.: Наук. думка, 1980. – 304 с.
16. *Mazurenko I., Vasetsky Y.* Electromagnetic and thermal parameters of high-frequency induction heating of metal strip // Proceedings of the Intern. Workshop: Computation Problems of Electrical Engineering CPEE 2010. Lazne Kynzvar, Czech Republic, September 13-16, 2010. – Abstract. – P. 8.
17. *Nondestructive testing handbook. Vol.5.* Accoustic emission testing. ASME, 1987. – 603 p.

УДК 621.3.011+621.3.013+621.313:62-799

**Н.А. Шидловская**<sup>1</sup>, чл.-корр. НАН Украины, **Ю.М. Васецкий**<sup>2</sup>, докт. техн. наук, **М.В. Мыслович**<sup>3</sup>, докт. техн. наук  
1–3 – Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, 03680, Киев-57, Украина

#### **Основные творческие достижения отдела теоретической электротехники Института электродинамики НАН Украины в 2010 году**

*Излагаются основные научные результаты, полученные в отделе теоретической электротехники Института электродинамики НАН Украины на протяжении 2010 года.* Библ. 17, рис. 5, таблица.

**Ключевые слова:** электрическая цепь, переключение, переходный процесс, индукционный нагрев, упрощенная математическая модель, акустическая эмиссия, имитационное моделирование

**N.A. Shydlovska**<sup>1</sup>, **Yu.M. Vasetsky**<sup>2</sup>, **M.V. Myslovych**<sup>3</sup>

1–3 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **The main results of the department of theoretical electrical engineering of the Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine in year 2010**

*The main scientific results are discussed which were obtained in the department of theoretical electrical engineering of the Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine in year 2010.* References 17, figures 5, table.

**Key words:** electrical circuit, switching, transient process, induction heating, simplified mathematical model, acoustic emission, simulation.

Надійшла 05.03.2011

Received 05.03.2011