

УДК 681.128.82

## РЕОЛОГІЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМОВОГО СИГНАЛУ В НАПРУЖЕНІСТЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО ХВИЛЕВОДУ

Шаповалов О. І.

## RHEOLOGICAL CONVERSION OF ELECTRICAL CURRENT SIGNAL TO THE ELECTROMAGNETIC FIELD STRENGTH MAGNETOSTRICTIVE WAVEGUIDE

Shapovalov A. I.

*Показано, що фізичні процеси в магнітострикційному хвилеводі при перенесенні електричного струмового імпульсу (ЕСІ) протікають за рахунок реологічних переходів і можуть бути описані нелінійними інтегро-диференціальними рівняннями енергоперенесення. Кожний перехід має зону реологічного перетворення, яка являє собою інтегральну імпульсну дельта-функцію Дірака. Описуються принципи перетворення ЕСІ в інші форми енергоперенесення за рахунок процесів перетворення електромагнітної енергії, яка створюється у хвилеводі. Показано, що такі процеси супроводжуються перенесенням магнітного потоку, а також кількості руху.*

**Ключові слова:** хвилевод, магнітострикція, модель, функція, струм, ультразвук, реологія.

**Вступ.** Рівень відноситься до одних з основних параметрів, який підлягає вимірюванню контролю з метою забезпечення загального матеріального балансу рідинних середовищ (РС) у різноманітних технологічних процесах хімічних, нафтопереробних, харчових та інших виробництв, а також складських резервуарах і ємкостях. Вимірювальний контроль рівня (ВКР) засновано на різних фізичних явищах речовин [1, 3-5]. Технічні засоби ВКР повинні бути нечутливими до дії зовнішніх впливів. Для ВКР РС широке розповсюдження отримали безконтактні засоби, з яких найбільш високонадійними й простими в експлуатації є магнітострикційні. До сучасних магнітострикційних засобів ВКР висуваються високі вимоги щодо точності й діапазону вимірювального контролю (ДВК), його вірогідності, а також лінійності статичних характеристик, оскільки вони найчастіше використовуються в госпрозрахункових системах управління обрахунку кількості рідин на складах, сховищах тощо [6-10]. Аналіз науково-технічної та патентної літератури показує, що широкий ДВК у магнітострикційних рівнемірах можна досягти за рахунок використання хвилеводів,

котрі дозволяють отримувати порівняно низьку ультразвукову частоту. З іншої сторони, вказується, що використання таких хвилеводів призводить до зменшення точності ВКР. З метою її підвищення необхідно збільшувати амплітуду ЕСІ. Але її підвищення призводить до збільшення нелінійності статичної характеристики, що погіршує точність ВКР за рахунок появи значних нелінійних складових похибок. Такі фактори звужують область використання магнітострикційних рівнемірів. До основних недоліків також відноситься залежність точності контролю таких засобів від зміни параметрів газового та рідинного середовищ. Як правило, магнітострикційні засоби контролю рівня (МСЗК) РС, які серійно випускаються промисловістю, будуються за одним і тим же принципом, суть якого полягає в тому, що в них вимірюється час перетворення ЕСІ в ультразвуковий сигнал (УЗС) електромагнітним перетворювачем, який плаває на поверхні РС.

**Аналіз досліджень.** Магнітострикційний метод вимірювання рівня є одним з напрямків ультразвукового методу контролю рівня РС. Відомі магнітострикційні засоби контролю (МСЗК) рівня РС, які працюють за принципом вимірювання часу проходження УЗС відстані від поверхні РС до приймача УЗС та визначення рівня за часом проходження цього сигналу. Теоретичних та експериментальних досліджень МСЗК рівня в зарубіжній і вітчизняній науковій РС надзвичайно мало. В основному вони стосуються дослідження деяких магнітострикційних параметрів, як наприклад: коефіцієнт магніто механічного зв'язку  $k$ , динамічної магнітострикційної сталої  $a$ , відносної магнітної проникності  $\mu$ , магнітострикційного насичення  $\lambda_s$ . Магнітострикційні перетворювачі (МСП) широко використовуються на підприємствах різних галузей народного господарства для неруйнівного контролю

виробів, у дефектоскопії, а також для контролю рівня РС. Вказується [8, 9], що магніострикційні рівнеміри можуть використовуватися при температурах від мінус  $40^{\circ}\text{C}$  до плюс  $120^{\circ}\text{C}$ . Як правило, МСЗК випускаються зарубіжними фірмами для контролю рівня рідин в резервуарах, трубах та інших технологічних апаратах, які працюють при температурі від  $-4^{\circ}\text{C}$  до  $120^{\circ}\text{C}$ , для вимірювання рівня різноманітних органічних рідинних середовищ і води. Враховуючи достатньо високу рекламну точність вимірювання рівня РС і нечутливість до зміни хімічного складу рідинного й газового середовищ, МСЗК рівня РС та системи стали широко використовуватися на вітчизняних підприємствах. Особливо широке використання вони отримали для контролю рівня нафтопродуктів як на нафтопереробних заводах, так і на заправних станціях.

Явище магніострикції полягає в тому, що при зміні стану намагніченості тіла його об'єм і лінійні розміри змінюються. Зміна форми тіла може виявлятися, наприклад, в розтягуванні, стискуванні, зміні об'єму, що залежить як від магнітного поля, так і від кристалічної структури тіла. Найбільші зміни розмірів відбуваються у сильномагнітних матеріалів. Їх відносно подовження  $\Delta L/L$  змінюється в межах  $10^{-5} \dots 10^{-2}$ . Як видно з наведених вище даних, відносна величина магніострикції у більшості феромагнітних матеріалів є достатньо малою. Але відомі рідкоземельні матеріали та їх сполуки, котрі володіють великими коефіцієнтами магніострикції, наприклад нікель, перміндіур та інші. Як правило, залежність відносної магнітної проникності  $\mu$  від відносного подовження хвилеводу є нелінійною. При подачі у хвилевід ЕСІ створюється поздовжній електромагнітний імпульс (ЕМІ), котрий рухається одночасно з ЕСІ. У результаті взаємодії ЕМІ з поперечним магнітним полем постійного магніту у місці розташування останнього проходить відхилення доменів магніострикційного матеріалу від їх нормального стану. Після проходження ЕМІ цього місця домени (за аналогією пружного елемента) починають коливатися з ультразвуковою частотою (УЗЧ). Так як домени є провідниковими елементами, то, перетинаючи силові магнітні лінії постійного магніту, створюють електрорушійну силу (ЕРС) з такою ж УЗЧ. Створена ЕРС згідно з законом правої руки відштовхується від магнітного поля постійного магніту і рухається у вигляді УЗІ до початку хвилеводу (місця подачі ЕСІ), де розташовується вихідний перетворювач, котрий перетворює цей УЗІ в електричний сигнал з такою ж УЗЧ. Таким чином, аналізуючи принцип роботи МСП, можна відмітити наступні реологічні перетворення:

1. Електричного струмового імпульсу в електромагнітне поле (ЕМП) хвилеводу.

2. ЕМП хвилеводу у лінійне відхилення доменів магніострикційного матеріалу.

3. Лінійне відхилення доменів у вільні механічні їх коливання.

4. Вільних механічних коливань доменів у силовому магнітному полі постійного магніту в змінну ЕРС з такою ж частотою.

5. Змінної ЕРС в електричний УЗС, котрий сприймається електричною вимірювальною схемою.

**Фізичні моделі реологічних переходів ЕСІ у хвилеводі.** У хвилеводі протікають електромагнітні процеси, котрі супроводжуються перетвореннями електричної енергії в механічну та навпаки [11-14]. Нехай у деякій розглядуваній області хвилеводу існує неоднорідне фізичне тіло (домени, які формуються у вигляді мембрани круглої форми). Неоднорідність розподілення потенціалу перенесення електричної енергії ЕСІ приводить до створення ЕМП напруженістю  $H(\vec{r}, \theta)$ , що приводить до відхилення від стану рівноваги і є причиною виникнення потоків перенесення. У цій області має місце механічний рух доменів, який характеризується полем швидкостей  $v(\vec{r}, \vartheta)$ , де  $\vec{r}$  - вектор напрямку руху доменів;  $\vartheta$  - час перенесення механічної енергії доменів. Джерела, або стоки потенціалу перенесення  $\gamma$ , визначаються напруженістю електричного поля  $E(\vec{r}, \vartheta)$  хвилеводу. Перенесення потенціалу  $\varphi$  визначається електромагнітним потоком перенесення  $\vec{Q}$ . Таким чином, електромагнітний потік  $\vec{Q}$ , який створюється ЕСІ, витрачається на механічний рух доменів зі швидкістю  $\vec{v}$  і дорівнює

$$\vec{Q} = \vec{\varphi} \cdot \vec{v} + \vec{q}. \quad (1)$$

В інтегральній формі умова зберігання електричного потенціалу для даного об'єму  $V$  має наступну форму

$$\int_V \frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} dV = \oint_S Q d\vec{f} + \int_V \gamma dV, \quad (2)$$

де  $S$  - поверхня об'єму, охопленого ЕСІ;  $d\vec{f} = \vec{n} d\zeta$  - елемент поверхні;  $\vec{n}$  - одиничний вектор елемента  $d\zeta$ .

Для довільного об'єму рівняння (2) приймає наступну форму

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} + \text{div} Q - \gamma = 0. \quad (3)$$

де  $\gamma$  - джерело перенесення ЕМП ЕСІ.

Стік напруженості ЕМП обумовлений вторинними механічними коливаннями доменів. Тому його можна розділити на дві частини: стік  $\gamma_M$ , який обумовлений тертям доменів при його механічному русі, і стік  $\gamma_E$ , який обумовлений гальмуючою дією створеної в цьому елементі ЕРС. З врахуванням сказаного отримуємо

$$\frac{\partial \varphi}{\partial g} + \operatorname{div}(\varphi, \vec{v}) = -\operatorname{div} \vec{q} + \gamma_M + \gamma_E. \quad (4)$$

Якщо в розглядуваному об'ємі має місце перетворення електричної енергії ЕСІ в ЕМП, то, позначивши  $H(\vec{r}, g)$  - напруженість ЕМП,  $v_i(\vec{r}, g)$  - швидкість зміни ЕМП і  $\gamma_M(\vec{r}, t)$  - інтенсивність стоку механічної енергії в одиницю об'єму за одиницю часу  $t$ ,  $\gamma_E(\vec{r}, t)$  - інтенсивність стоку електромагнітної енергії (ЕМЕ) в одиницю об'єму за одиницю часу  $t$ , рівняння перенесення напруженості ЕМП приймає наступну форму

$$\frac{\partial H}{\partial g} + \operatorname{div}(H, \vec{v}) = \operatorname{div}(D_H \nabla H) + \gamma_M(\vec{r}, t) + \gamma_E(\vec{r}, t), \quad (5)$$

де  $D_H$  - коефіцієнт перенесення ЕМЕ.

Нехай механічний рух доменів в ЕМП незначно відрізняється від зміни ЕМП, створеним їх механічними коливаннями. Тоді можна прийняти, що різниця зміни швидкості механічного руху та зміни ЕМП дорівнює нулю. При такому припущенні рівняння перенесення напруженості ЕМП в хвилеводі приймає наступну форму

$$\frac{\partial H}{\partial g} = \operatorname{div}(D_H \nabla H) + \gamma_E(\vec{r}, t). \quad (6)$$

Якщо параметр  $D_H$  мало залежить від процесу перенесення, то рівняння (6) спрощується і приймає наступну форму

$$\frac{\partial H}{\partial g} = D_H \nabla^2 H + \gamma_E. \quad (7)$$

Припустимо, що в деякому елементарному об'ємі хвилеводу знаходяться домени, котрі в момент часу  $t > 0$  пов'язуються ЕМП напруженістю  $H_0$ . При часі  $t \rightarrow \infty$  перехідний процес перенесення електричної енергії закінчується. Так як параметр  $\gamma_E$  є пропорційним напруженості  $H$  ЕМП, тобто  $\gamma_E = k_H H$ , то його зміна в часі може мати тільки дві форми. Першою формою є механічна енергія, яка створювана ЕСІ, а другою формою є ЕМЕ, яка створюється рухом доменів. Враховуючи, що хвилевід є електропровідним та характеризується активним опором, індуктивністю та ємністю, і по ньому протікає електричний струм  $I$ , то вільна складова перехідного процесу, яка характеризує втрату електричної потужності, має вигляд

$$\tau_{2\pi}^2 \frac{d^2 i}{d\theta^2} + \tau_{1\pi} \frac{di}{d\theta} + i = 0, \quad (8)$$

де  $\tau_{2\pi}$ ,  $\tau_{1\pi}$  - сталі часу перехідного процесу, котрі при вище прийнятих припущеннях дорівнюють сталим часу механічного коливання доменів.

Нехай напруженість ЕМП в активній ділянці хвилеводу (АДХ) довжиною ЕСІ  $H_{\pi} = k_{\pi} i$ , де  $k_{\pi}$  -

стала. Підставимо це рівняння у (8). У результаті маємо

$$\tau_{2\pi}^2 \frac{d^2 H_{\pi}}{d\theta^2} + \tau_{1\pi} \frac{dH_{\pi}}{d\theta} + H_{\pi} = 0, \quad (9)$$

де  $\tau_{1\pi} = k_{\pi} \tau_{1\pi}$ ,  $\tau_{2\pi} = k_{\pi} \tau_{2\pi}$ .

Якщо рахувати, що напруженість ЕМП в області АДХ повністю передається хвилеводу, то повинна виконуватися умова

$$H_{\pi}(\theta) = \Psi \frac{\partial H}{\partial g}, \quad (10)$$

де  $\Psi$  - стала часу процесу перенесення.

Знайдемо похідну лівої та правої частини рівняння (10) за  $\theta$ . У результаті отримуємо

$$\frac{\partial H_{\pi}}{\partial \theta} = \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial g \partial \theta}. \quad (11)$$

З врахуванням (10) і (11) рівняння (7) приймає наступну форму.

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} + \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial g \partial \theta} = D_H \nabla^2 H + \gamma_E. \quad (12)$$

Якщо стала  $\Psi \rightarrow \infty$ , а  $\theta \approx g$ , то  $\partial^2 H / \partial g^2 \rightarrow 0$ . У цьому випадку перенесення напруженості ЕМП в АДХ відсутнє. При  $\Psi = \tau_{\pi}$  і  $\theta = g$  рівняння (12) приймає наступну форму

$$\tau_{\pi} \frac{\partial^2 H_{\pi}}{\partial g^2} + \frac{\partial H_{\pi}}{\partial g} = D \nabla^2 H + \gamma_E. \quad (13)$$

Після переходу від повної похідної до часткової рівняння (13) приймає вигляд

$$\tau_{2\pi}^2 \frac{d^3 H_{\pi}}{dg^3} + \tau_{1\pi} \frac{d^2 H_{\pi}}{dg^2} + \frac{dH_{\pi}}{dg} = D \nabla^2 H + \gamma_E. \quad (14)$$

Ліва частина рівняння (14) характеризує зміну напруженості ЕМП АДХ, яка викликає механічну дію доменів, а права - зміну напруженості цього поля при випромінюванні доменами УЗК. Так як в АДХ мають місце втрати напруженості ЕМП, то, приймаючи, що  $\gamma_E = \partial H / \partial t$ , де  $t$  - час стоку ЕМЕ, рівняння (14) набуває такого вигляду

$$\tau_{2\pi}^2 \frac{d^3 H_{\pi}}{dg^3} + \tau_{1\pi} \frac{d^2 H_{\pi}}{dg^2} + \frac{dH_{\pi}}{dg} = -D \nabla^2 H - \frac{\partial H}{\partial \theta}. \quad (15)$$

ЕСІ формується генератором імпульсів з амплітудою  $I_0$  тривалістю  $t_I$ . У процесі активізації АДХ енергія ЕСІ, яка передається хвилеводу, зменшується, а енергія, яка накопичена цим елементом, зростає до деякого максимального значення. Взаємодія двох енергій згідно із законом Ампера створює електродинамічне зусилля (ЕДЗ), яке приводить до переміщення доменів на відстань  $x_0 = k_I I_0$ . Графіки незворотних реологічних переходів для перетворення ЕСІ в напруженість ЕМП АДХ показані на рис. 1.

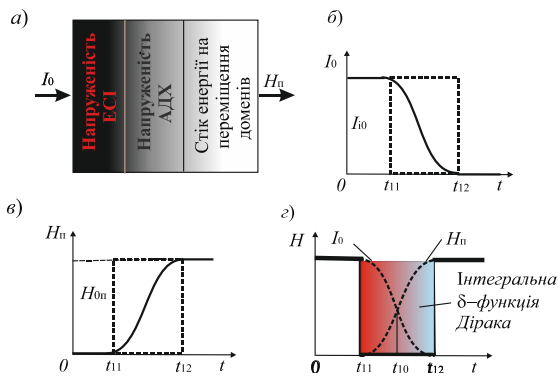


Рис. 1. Фізична модель (а) і графіки незворотних реологічних перетворень: б) графік незворотного реологічного перетворення ЕСІ; в) графік незворотного реологічного накопичення напруженості ЕМП АДХ; г) графік інтегральної імпульсної  $\delta$ -функції Дірака для першого реологічного переходу

Таким чином, електромагнітний процес, який протікає в хвилеводі, описується нелінійним диференціальним рівнянням. Знак «мінус» у рівнянні (15) показує, що має місце зменшення ЕМЕ, а відповідно й зменшення її за довжиною хвилеводу. Так як на вхід хвилеводу подається електричний сигнал імпульсної форми, то всі електромагнітні процеси в ньому теж будуть імпульсної форми, та описуються інтегральною імпульсною дельта-функцією Дірака. Тому, приймаючи до уваги метод нульового градієнта [14], рівняння (15) розділяється на систему наступних диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial H(x, \vartheta)}{\partial \vartheta} + D_E \frac{\partial^2 H(x, \vartheta)}{\partial x^2} = 0; \quad (16)$$

$$\tau_{2K}^2 \frac{d^2 H_C}{d\vartheta^2} + \tau_{1K} \frac{dH_C}{d\vartheta} + H_C = H(x, \vartheta). \quad (17)$$

При граничних умовах:  $x = 0 \quad H(0, \vartheta) = H_0$ , а при  $\vartheta = \infty \quad \frac{\partial H(x, \infty)}{\partial \vartheta} = 0$  рішенням (16) буде

$$H(x, \vartheta) = H_0 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_E \vartheta}}\right). \quad (18)$$

Початковими умовами для рівняння (17) будуть:  $\vartheta = t = 0 \quad H(0) = H(x, \vartheta)$ , а при  $\vartheta = \infty \quad \frac{dH(\infty)}{d\vartheta} = 0$ . Приймаючи до уваги, що відношення сталих часу  $\tau_{1K} / \tau_{2K} > 2$ , маємо

$$H(\vartheta) = H(x, \vartheta) \left[ \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp(-\vartheta p_1) + \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp(-\vartheta p_2) \right], \quad (19)$$

де  $p_{1,2} = -\frac{\tau_{1K}}{2\tau_{2K}^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\tau_{1K}}{2\tau_{2K}^2}\right)^2 - \frac{1}{\tau_{2K}^2}}$  - корені

характеристичного рівняння.

Підставивши (18) у рівняння (19), отримуємо

$$H(\vartheta) = H_0 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_E \vartheta}}\right) \left[ \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp(-\vartheta p_1) + \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp(-\vartheta p_2) \right]. \quad (20)$$

Якщо  $p_1 \ll p_2$ , то рівняння (20) приводиться до вигляду, який описує критичний режим перенесення ЕМЕ, тобто

$$H(\vartheta) \approx H_0 \left[ \left(1 + \frac{\vartheta}{\tau_{1K}}\right) \exp\left(-\frac{\vartheta}{\tau_{2K}}\right) \right] \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_E \vartheta}}\right). \quad (21)$$

Так як швидкість розповсюдження ЕСІ  $v = x / \vartheta = -\Re_x / \sqrt{L_0 C_0}$ , де  $\Re_x$  - довжина хвилеводу, то відстань  $x = vt = \vartheta / \sqrt{L_0 C_0}$ . Враховуючи, що  $\tau_{1K} = K_C L_0 / R_0$ , а  $\tau_{2K} = K_C \sqrt{L_0 C_0}$ , рівняння (21) приймає наступний вигляд

$$H(\vartheta) \approx H_0 \left[ \left(1 + \frac{R_0 C v^2}{\Re_x K_C} \vartheta\right) \exp\left(-\frac{v}{\Re_x K_C} \vartheta\right) \right] * \operatorname{erf}\left(\frac{v}{2\sqrt{D_E \vartheta}} \vartheta\right). \quad (22)$$

Приймаючи до уваги, що  $x = vt$ , рівняння (22) приймає таку форму

$$H(x) \approx H_0 \left[ \left(1 + \frac{R_0 C v}{\Re_x K_C} x\right) \exp\left(-\frac{x}{\Re_x K_C}\right) \right] * \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_E \vartheta}}\right). \quad (23)$$

Рівняння (23) є математичною моделлю реологічного переходу і показує, як змінюється напруженість ЕМП в хвилеводі за його довжиною. Враховуючи, що напруженість  $H(x)$  у хвилеводі створює магнітну індукцію  $B(x) = \mu_a H(x)$ , де  $\mu_a$  - магнітна проникливість магнітострикційного матеріалу, а остання в площині  $S$  поперечного перетину магнітного поля створює магнітний потік  $\Phi(x) = \pi B(x) r_C^2$ , де  $r_C$  - радіус хвилеводу, то напруженість ЕМП, яку створює ЕСІ амплітудою  $I_0$  у хвилеводі в момент його подачі,  $H_0 = I_0 / \Pi$ , де  $\Pi = 2\pi r_C$  - периметр хвилеводу. Підставляючи вирази для  $H(x)$  і  $H_0$  у рівняння (23), отримуємо рівняння для магнітного поля АДХ у такому вигляді

$$\Phi(x) \approx 2\mu_a r_C I_0 \left[ \left(1 + \frac{R_0 C v}{\Re_x K_C} x\right) \exp\left(-\frac{x}{\Re_x K_C}\right) \right] * \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_E \vartheta}}\right). \quad (24)$$

Так як відрізок  $x$  хвилеводу являє собою відстань від поверхні РС до місця розташування приймача УЗС МСП, а фактично - товщину газового середовища в технологічному апараті, то

позначивши цю відстань  $x = \Omega_{\Gamma}(x)$ , а вимірювальний рівень  $l_p = l_{p0} - \Omega_{\Gamma}(x)$ , де  $l_{p0}$  - товщина рідини, отримуємо математичну модель АДХ у такій формі

$$\Phi(l_p) = 2\mu_a r_c I_0 \left[ \left( 1 + \frac{R_0 C_V}{\Re_x K_C} \Delta l \right) \exp \left( - \frac{\Delta l}{\Re_x K_C} \right) \right] * \operatorname{erf} \left( \frac{\Delta l}{2\sqrt{D_E \theta}} \right) \quad (25)$$

де  $\Delta l = l_{0p} - l_p$  - зміна вимірювального рівня.

Магнітне поле  $\Phi(l_p)$ , котре формується на певній відстані  $x$  хвилеводу згідно з рівнянням (25), при його досягненні магнітного поля постійного магніту, який знаходиться в поплавку, взаємодіють між собою, викликаючи відповідні механічні дії. Як показують теоретичні та експериментальні дослідження МЗКР, довжина, на яку розповсюджується ЕМП хвилеводу, є достатньо обмеженою. Аналіз МЗКР показує, що такі засоби використовуються для ВКР висотою не більшою 18 метрів. Це свідчить про те, що загасання магнітного поля в хвилеводі є достатньо суттєвим. ЕМП хвилеводу в першу чергу визначається магнітною проникливістю матеріалу, його діаметром, амплітудою ЕСІ і залежить від його електричних параметрів. Якщо припустити, що активний опір хвилеводу є незначним, котрим можна знехтувати, то ЕМП хвилеводу описуватиметься наступним рівнянням

$$\Phi(l_p) = 2\mu_a r_c I_0 \left[ \exp \left( - \frac{\Delta l}{\Re_x K_C} \right) \right] \operatorname{erf} \left( \frac{\Delta l}{2\sqrt{D_E \theta}} \right) \quad (26)$$

**Результати досліджень.** Експериментальними дослідженнями підтверджено, що ЕМП АДХ зменшується за законом близьким до експоненціального зі зменшенням рівня РС. Тому у першому наближенні можна припустити, що множник  $\operatorname{erf} \left( \frac{\Delta l}{2\sqrt{D_E \theta}} \right)$  є незначним і для практичних розрахунків АДХ та його ЕМП ним можна знехтувати. Тоді математична модель зміни ЕМП спрощується. З рівняння (26) видно, що для досягнення необхідного ЕМП потрібно збільшувати амплітуду ЕСІ. Але, як показали результати експериментів, при підвищенні амплітуди ЕСІ у хвилеводі збільшуються вторинні ЕМП, котрі приймають форму стоячих електромагнітних хвиль, що призводить до хаотичної зміни доменів в АДХ, а відповідно, до появи вторинних УЗК. Установлено, що нехтувати активним опором хвилеводу можна тільки при достатньо невеликій його довжині та значному поперечному перетині.

**Висновки.** Результати досліджень можна використовувати при розробці нових магнітострикційних засобів контролю рівня рідинних середовищ, а також при ремонтних роботах, коли необхідно робити заміну хвилеводу з

іншого магнітострикційного матеріалу. Для попереднього розрахунку необхідної робочої довжини хвилеводу, його форми, а також амплітуди ЕСІ та ЕМП необхідно експериментально визначити його електричні параметри.

### Література

1. Дж. Фрайден. Современные датчики: справочник / Фрайден Дж. ; пер. с англ. Ю.А. Заболотной; под ред. Е.Л. Свинцова. – Москва: Техносфера, 2006. – 592 с.
2. Жданкин В.К. Приборы для измерения уровня / В.К. Жданкин // Современные технологии автоматизации. – 2002. - № 2. – С. 6-19.
3. Уровнемеры. Тематический каталог № 5. Выпуск 6 / ПГ «Метран». – Челябинск, 2007. – 206 с.
4. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев ; отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.
5. Siemens. Контрольно-измерительные приборы. Уровень: Каталог FI 01 / SiemensAG. – 2007. – 188 с.
6. ЗАО «Альбатрос». Устройства уровнемерии и средства автоматизации: каталог / ЗАО «Альбатрос». – М.: 2000. – 162 с.
7. Измерение в промышленности: справочное пособие: пер. с нем. / под ред. Профоса. – М.: Металлургия, 1980. – 648 с.
8. Каталог компании EmersonProcessManagement и Промышленной группы «Метран». Выпуск 10 «Уровнемеры». – М.: Изд-во каталогов, 2011. – 206 с.
9. Каталог FI 01 фирмы Siemens. Контрольно-измерительные приборы. Уровень. 2007. – 188 с.
10. Гораздовський Т.Я. Наукові основи реології: монографія / Т.Я. Гораздовський – Луганськ: Вид.-во Східноукр.- нац. ун-ту ім. В. Даля, 2012. – 775 с.
11. Стенцель Й. І. Аналіз магнітострикційних засобів контролю рівня рідинних середовищ / Й. І. Стенцель, А. В. Томсон, О. І. Шаповалов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 3/5 (45) – С. 53-56.
12. Стенцель Й. І. Експериментальні дослідження ультразвукових сигналів магнітострикційного засобу контролю рівня рідинних середовищ / Й. І. Стенцель, О. І. Шаповалов // Вісник національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць «Електроенергетика і перетворювальна техніка». – 2011. – № 12 – С. 15-21.
13. Основи теорії магнітострикційного засобу контролю рівня рідинних середовищ / Й. І. Стенцель, О. І. Шаповалов, А. В. Томсон, А. С. Янішина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – 2011. – № 41 – С. 18-23.
14. Шаповалов О. І. Фізичні моделі перетворень електричного імпульсу в магнітострикційному перетворювачі / О. І. Шаповалов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – 2014. – № 41 – С. 18-23.

### References

1. Dzh. Frajden. Sovremennyye datchiki: spravochnik / Frajden Dzh. ; per. s angl. Ju.A. Zabolotnoj; pod red. E.L. Svincova. – Moskva: Tehnosfera, 2006. – 592 s.

2. Zhdankin V.K. Pribory dlja izmerenija urovnja / V.K. Zhdankin // *Sovremennye tehnologii avtomatizacii*. – 2002. – № 2. – S. 6-19.
3. Urovnemery. Tematicheskij katalog № 5. Vypusk 6 / PG «Metran». – Cheljabinsk, 2007. – 206 s.
4. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / V.E. Kuz'michev ; otv. red. V.K. Tartakovskij. – K.: Nauk. dumka, 1989. – 864 s.
5. Siemens. Kontrol'no-izmeritel'nye pribory. Uroven': Katalog FI 01 / SiemensAG. – 2007. – 188 s.
6. ZAO «Al'batros». Ustrojstva urovnemetrii i sredstva avtomatizacii: katalog / ZAO «Al'batros». – M.: 2000. – 162 s.
7. Izmerenie v promyshlennosti: spravocnoe posobie: per. s nem. / pod red. Profosa. – M.: Metallurgija, 1980. – 648 s.
8. Katalog kompanii EmersonProcessManagement i Promyshlennoj grupy «Metran». Vypusk 10 «Urovneme-ry» – M.: Izd-vo katalogov, 2011. – 206 s.
9. Katalog FI 01 firmy Siemens. Kontrol'no-izmeritel'nye pribory. Uroven'. 2007. – 188 s.
10. Gorazdovs'kij T.Ja. Naukovi osnovi reologii: monografija / T.Ja. Gorazdovs'kij – Lugans'k: Vid.-vo Shidnoukr.- nac. un-tu im. V. Dalja, 2012. – 775 s.
11. Stencil' J. I. Analiz magnitostrikcijnih zasobiv kontrolju rivnja ridinnih seredovishh / J. I. Stencil', A. V. Tomson, O. I. Shapovalov // *Shidno-Evrops'kij zhurnal peredovih tehnologij*. – 2010. – № 3/5 (45) – S. 53-56.
12. Stencil' J. I. Eksperimental'ni doslidzhennja ul'trazvukovih signaliv magnitostrikcijnogo zasobu kontrolju rivnja ridinnih seredovishh / J. I. Stencil', O. I. Shapovalov // *Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI»*. Zbirnik naukovih prac' «Elektroenergetika i peretvorjuval'na tehnika». – 2010. – № 12 – S. 15-21.
13. Osnovi teorii magnitostrikcijnogo zasobu kontrolju rivnja ridinnih seredovishh / J. I. Stencil', O. I. Shapovalov, A. V. Tomson, A. S. Janishina // *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut»*. Zbirnik naukovih prac'. «Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika». – 2011. – № 41 – S. 18-23.
14. Shapovalov O. I. Fizichni modeli peretvoren' elektrichnogo impul'su v magnitostrikcijnomu peretvorjuvachi / O. I. Shapovalov // *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut»*. Zbirnik naukovih prac'. «Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika». – 2014. – № 41 – S. 18-23.

**Шапвалов А. И. Реологические превращения электрического токового сигнала в напряженность электромагнитного поля магнитоотрицательного волновода.**

*Показано, что физические процессы в магнитоотрицательном волноводе при переносе электрического токового импульса (ЭТИ) протекают за счет реологических переходов и могут быть описаны нелинейными интегро-дифференциальными уравнениями энергопереноса. Каждый переход имеет зону реологического преобразования, которая представляет собой интегральную импульсную дельта-функцию Дирака. Описываются принципы преобразования ЭТИ в другие формы энергопереноса за счет процессов преобразования электромагнитной энергии, которая образуется в волноводе. Показано, что такие процессы сопровождаются переносом магнитного потока, а также количества движения.*

**Ключевые слова:** волновод, магнитоотрицательная модель, функция, ток, ультразвук, реология.

**Shapovalov A. I. Rheological conversion of electrical current signal to the electromagnetic field strength magnetostrictive waveguide.**

*It is shown that the physical processes in the magnetostrictive waveguide when carrying electric current pulse flowing through rheological transitions and can be described by nonlinear integro-differential equations of energy transfer. Each transition zone has a rheological transformation which represents an integral pulse Dirac delta function. Describes the principles converting an electric current pulse in other forms of energy transfer through the processes of conversion of electromagnetic energy that is generated in the waveguide. It is shown that such processes are accompanied by the transfer of magnetic flux, and the amount of movement. A physical model for the transformation of the current pulse in the electromagnetic field strength and shows graphics of irreversible rheological transitions. The mathematical model for the rheological converting electrical current pulse in the electromagnetic field strength and the magnetic flux of the waveguide.*

**Keywords:** waveguide, magnetostriction, model, function, current, ultrasound, rheology.

**Шаповалов Олександр Іванович** – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Технологічний інститут Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) [stencil@sti.lg.ua](mailto:stencil@sti.lg.ua)

*Рецензент: Суворін О. В.* - д.т.н., доцент

Стаття подана 06.10.2014