

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ОСОБЛИВИХ ТОЧОК У ВІДГУКУ ПЕРВИННОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

© Тетерко А. Я., 1999

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

На базі моделі двочастотного відгуку вихрострумowego первинного перетворювача розкривається механізм формування особливих точок, зокрема, так званих "вузлових" і дається його узагальнення щодо багаточастотного та імпульсного збудження первинного перетворювача.

Ефективність застосування засобів неруйнівного контролю щодо діагностики стану матеріалів та різноманітних об'єктів контролю (ОК) залежить від дії заводських параметрів, що утворюють похибку методу. В роботі досліджується механізм компенсації в реальному масштабі часу дії деякого заводського параметра ОК, що полягає у формуванні у відгуку вихрострумowego первинного перетворювача (ВСПП), який збуджують по крайній мірі струмами двох частот ω_1 та $\omega_2 = n \cdot \omega_1$, головних особливих точок (ГОТ) у задані моменти часу, де вплив заданого заводського параметра заглушується [1]. Розкриття механізму формування ГОТ надає можливість проаналізувати ефективність багаточастотного збудження ВСПП, зокрема, імпульсного методу вихрострумowego (ВС) контролю. Використання як інформативних параметрів відгуку ВСПП миттєвих значень сигналу з метою відстроювання від впливу заводських факторів чи селективного контролю параметрів матеріалів та об'єктів є основою імпульсного методу ВС контролю. Притому вимірюють такі параметри сигналу, як максимальні відхилення та відповідні до них часові інтервали, часову координату переходу сигналу через нуль, часову координату та миттєве значення y , так званих, "вузлових" точках та ін. Теоретичні дослідження та розробки засобів ВС контролю імпульсним методом започатковано ще в 50-х роках і вони залишаються актуальними [2-8]. Проте до теперішнього часу не дано інтерпретації формування імпульсного відгуку ВСПП, приміром, у "вузлових" точках, де спостерігається компенсація, зокрема, впливу варіацій зазора між ВСПП та ОК, що обмежує розуміння можливостей та перспектив методу.

Модель двочастотного відгуку ВСПП. У селективному ВС контролі розроблено ряд методів, в яких збудження ВСПП здійснюється одночасно струмами двох частот з метою використання складової сигналу ВСПП на одній з цих частот

для компенсації впливу заводського параметра ОК у складовій сигналу ВСПП на іншій частоті, що є основною і вибирається за умови максимальної чутливості до контрольованого параметра ОК.

На рис. 1 у комплексній площині (Re , Im) внесених параметрів ВСПП (напруги, або повного опору) представлено загальний вид функцій впливу $F(\beta)$ питомої електричної провідності матеріалу ОК, де $\beta = \sqrt{\omega \sigma \mu}$ - узагальнений параметр, R - еквівалентний радіус ВСПП, μ - магнітна проникність матеріалу ОК при сталих значеннях зазора $\alpha = h/R = \text{const}$, та функцій впливу зазора $F(\alpha)$ при $\beta = \text{const}$ у відгуку ВСПП, що взаємодіє з деяким ОК [9]. Із зміною частоти змінюється чутливість по вказаних параметрах, що впливає на фазові співвідношення між функціями впливу. Притому зміна чутливості по різних параметрах із зміною частоти є лінійно незалежною.

Відгук ВСПП на дію вектора параметрів ОК $x = (x_1, \dots, x_m)^T$ в області зміни цих параметрів $x_{jn} < x_{oj} < x_{js}$, $j=1, \dots, m$, де x_{jn} та x_{js} - відповідно нижня та верхня границі зміни параметра, можна представити нелінійною багатопараметровою (НЛБ) моделлю адитивного типу у виді [10]:

$$y_v(x_0) = y_v(x) - y_v(x_n) = \sum_{j=1}^m P_{vj}(x_{oj}) + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i \neq j)}}^m b_{vij} \cdot x_{oi} \cdot x_{oj} + \\ + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i \neq j)}}^m b_{vij} \cdot x_{oi} \cdot x_{oj} \cdot x_{oi} + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i \neq j)}}^m b_{vij} \cdot x_{oi}^2 \cdot x_{oj}; \quad (1) \\ v = 1, \dots, p; \quad x_0 = (x_{o1}, \dots, x_{om})^T; \quad p \geq m$$

В (1) $y_v(x_0)$ - елементи p -вимірному вектора відгуку ВСПП $y = (y_1, \dots, y_p)^T$ у дійсному просторі R^p . Для двочастотного методу, що розглядається, такими елементами є дійсні Re та уявні Im частини або модуль (амплітуда) та аргумент (фазовий кут) відгуку ВСПП на частоті ω_1 та ω_2 . Перший член в (1) є

сумою функцій впливу по кожному з $j = 1, \dots, m$ параметрів системи ВСПП-ОК для ν -тої складової вектора $y(x_0)$ при сталих значеннях усіх інших параметрів.

Функції $P_{vj}(x_{0j})$ у задачах ВС контролю є нелінійними і для їх представлення можуть бути використані наближення різними класами функцій. Визначена таким чином функція впливу параметра $P_{vj}(x_{0j})$ при заданому номінальному значенні усіх інших параметрів розглядається як базова функція впливу. Такими є функції впливу провідності $F(\beta)$ та впливу зазора $F(\alpha)$, що проходять через точку O_1 (рис. 1), яка відповідає відгуку ВСПП при номінальних значеннях параметрів $\alpha_0 = \alpha_{ном}$, $\beta_0 = \beta_{ном}$. Притому функції $F(\alpha)$ та $F(\beta)$ є комплексними

$F(\alpha) = P_1(\alpha) + jP_2(\alpha)$, $F(\beta) = P_1(\beta) + jP_2(\beta)$, (2)
дійсна та уявна частина яких відповідають НЛБ-моделям відгуку ВСПП y_1 та y_2 (1), що побудовані для дійсної та уявної складової відгуку ВСПП, при-
міром, на частоті збудження ω .

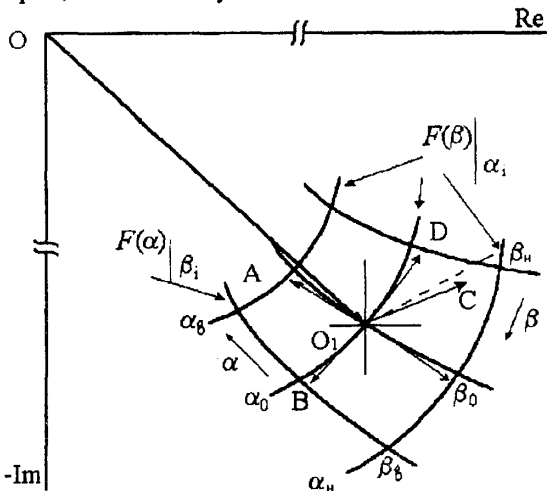


Рис. 1. Загальний вигляд функцій впливу питомої провідності матеріалу ОК $F(\beta)$ та заряду $F(\alpha)$ на параметри ВСПП.

В НЛБ-моделі відгуку ВСПП є важливим той аспект, що вплив складових вектора $x = (x_1, \dots, x_m)^T$ параметрів системи ВСПП-ОК на відгук ВСПП можна представити як суму функцій впливу по цих складових. Задача взаємодії двочастотного відгуку ВСПП розглядається на прикладі функції впливу одного параметра. Двочастотний відгук ВСПП від впливу деякого параметра x_j в залежності від часу t можна представити у виді

$$u(t) = A \cos(\alpha t + \varphi + \varphi_0) + B \cos(n\alpha t + \varphi_n), \quad (3)$$

де A , B - модулі, а φ , φ_n - аргументи комплексної функції впливу відповідно на частоті ω та $n\omega$, φ_0 - початковий зсув фази.

Відомі методи двочастотного ВС контролю з компенсацією впливу завадового фактора передбачають два підходи. Перший полягає у вимірюванні квадратурних компонентів відгуку ВСПП на кожній з частот та їх лінійне перетворення, в результаті якого досягають певного ступеня компенсації впливу завадового фактора [9]. Другий підхід передбачає частотне перетворення складових відгуку з частоти ω та/або $n\omega$ до однієї (проміжної) частоти, на якій відбувається векторне додавання цих складових [11]. Загальна умова компенсації полягає у забезпеченні рівності модулів та протилежності фаз функцій впливу параметра на частотах ω та $n\omega$:

$$\begin{aligned} \text{Mod } F_\omega(x_{0j}) &= \text{Mod } F_{n\omega}(x_{0j}), \\ \arg F_\omega(x_{0j}) &= \arg F_{n\omega}(x_{0j}) = \pm \pi. \end{aligned} \quad (4)$$

Принципово при цих підходах до частот збудження ВСПП ω_1 та ω_2 не накладається умови кратності та синхронізації. Застосування того чи іншого з підходів немає переваг щодо покращення компенсації впливу завадового фактора і стосується в першу чергу ефективності їх апаратурної реалізації з точки зору підвищення надійності та стабільності.

Для двочастотного методу селективного ВС контролю по миттєвих значеннях відгуку ВСПП у головних особливих точках умова синхронізації та кратності частот є обов'язковою, а саме: $\omega_1 = \omega$, $\omega_2 = n\omega$, $n=2,3,\dots$. Умова компенсації впливу завадового фактора (4) для миттєвих значень векторів його частотних складових приймає вид:

$$A = B; \quad \omega t_k + \varphi + \varphi_0 = n\omega t_k + \varphi_n - k\pi, \quad k=1,3,\dots(5)$$

За період T нижньої частоти ω умова протилежності фаз відповідно до (5) виконується у моменти часу

$$t_k = \frac{k}{2(n-1)} T + \frac{\varphi_n - \varphi - \varphi_0}{2\pi(n-1)} T, \quad (6)$$

де коефіцієнт k - таке ціле непарне число, що $t_k \in$ у межах періоду T нижньої частоти ω . Тоді максимальне значення коефіцієнта k дорівнює $k = 2(n-1) - 1 = 2n - 3$, або в цілому k приймає такі значення:

$$k = 1,3,\dots,(2p-3); \quad p = 2,3,\dots,n. \quad (7)$$

Загальне число точок протягом періоду T частоти ω , в яких у моменти часу t_k відбувається компенсація впливу параметра за умов (5), становить $(n-1)$ і вони визначені вище як "вузлові" ГОТ. Притому в моменти часу t_k , що визначаються парними значеннями коефіцієнта k , а саме:

$$k = 0,2,4,\dots,2(p-2), \quad p = 1,\dots,(n-1) \quad (8)$$

миттєві значення векторів частотних складових функції впливу параметрів на частотах ω та $n\omega$ співпадають, і їх дія подвоюється.

Таким чином, при виконанні умови компенсації впливу заданого параметра (5) з урахуванням вибору коефіцієнта k згідно умови (7), а також, врахову-

ючи умову (8), у двочастотному відгуку ВСПП $u(t)$ протягом періоду частоти формується в моменти часу t_k , $2(n-1)$ особливих точок, з яких у $(n-1)$ точках при $k=1,3,\dots,(2n-3)$, тобто непарних, відбувається компенсація дії параметра або утворюються "вузлові" ГОТ, а в $(n-1)$ точках при $k=0,2,\dots,2(n-2)$, тобто парних, вплив цього параметра збільшується. Притому з (3) очевидно, що миттєві значення відгуку в особливих точках не є рівнозначними і змінюються як \cos миттєвої фази.

Момент часу t_0 появи першої ($k=0$) особливої точки, визначається (6) різницею фазових кутів $(\varphi_n - \varphi)$ функцій впливу на частоті ω_n та ω , приймаючи до уваги, що початковий зсув фаз $\varphi_0 = \text{const}$. Далі головні особливі точки формуються через інтервал часу $t = T / (n - 1)$. Момент часу t_0 першої особливої точки при $k=0$ визначається так:

$$t_0 = \frac{\varphi_n - \varphi - \varphi_0}{\pi} \tau, \quad \tau = \frac{T}{2(n-1)} \quad (9)$$

Змінюючи початковий зсув фаз $\varphi_0^* = \text{var}$ між струмами збудження частот ω та $n\omega$ можна формувати спектр з $2(n-1)$ особливих точок від першої у заданий момент часу t_0^* з інтервалом kt .

Процес утворення головних особливих точок у часі представлено на круговій діаграмі, рис. 2 для двох співвідношень частот: $n=3$ та $n=5$. На діаграмах зображено вектори комплексних функцій впливу параметра відповідно до (3) - вектор A (суцільна лінія) з фазовим зсувом $(\varphi + \varphi_0)$ у момент часу $t=0$ та вектор B (пунктирна лінія) з фазовим зсувом φ_n при $t=0$, що обертаються із кутовою швидкістю ω та $n\omega$. Модулі цих векторів згідно умови (4) є рівними: $\text{Mod } A = \text{Mod } B, \quad A = B$.

Так як вектор B обертається в n разів швидше, то за час, рівний періоду T обертання вектора A , у моменти часу t_k , що визначаються за (6) при $k=0;2$ для співвідношення частот $n=3$ та $k=0;2;4;6$ для $n=5$ вектори A та B співпадають, а в моменти часу t_k при $k=1;3$ для $n=3$ та $k=1;3;5;7$ для $n=5$ вони знаходяться у протифазі. На діаграмах положення векторів A_k та B_k у моменти часу t_k позначені з індексами, які вказують на значення k . У дужках на рис.2 позначені положення векторів з непарними індексами, що знаходяться у протифазі, але не відображені графічно (щоб розрізнити їх синфазне положення).

Як відзначено вище, кількість головних особливих точок становить $(n-1)$ для "вузлових" та $(n-1)$, де вплив параметра (видно з діаграм) подвоюється. Притому миттєве значення в останніх пропорційне \cos миттєвого значення фази. Головні особливі точки, як видно з діаграм, формуються симетрично на додатньому та від'ємному півперіодах нижньої частоти ω .

Комплексні функції впливу параметрів ОК $F(x_{oj})$ перш за все відрізняються за фазою. Кут між функціями впливу зазора $F(\alpha)$ та питомої електричної провідності $F(\beta)$ може бути значним і при певних частотах збудження та параметрах ВСПП він становить до 90° [9]. Особливо в широкому діапазоні за фазовим кутом змінюються функції впливу дефектів в залежності від їх глибини та занурення під поверхнею ОК.

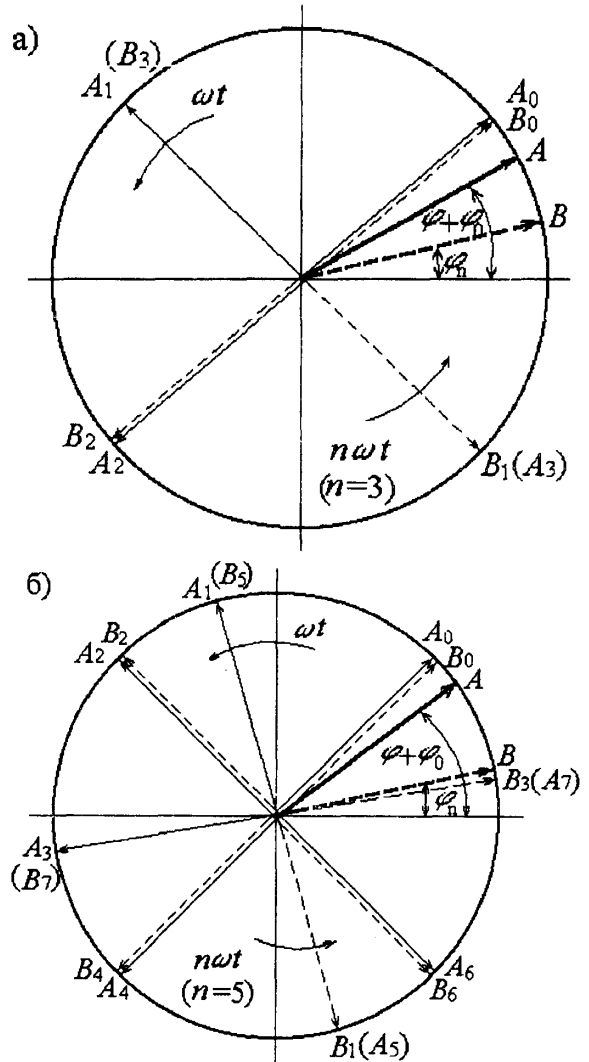


Рис. 2. Процес утворення головних особливих точок для двох частот.

В процесі контролю на формування відгуку ВСПП одночасно впливають декілька параметрів системи ВСПП-ОК. Тому розглянутий вище механізм формування особливих точок у сумарному відгуку ВСПП по деякому з параметрів відбувається на фоні дії інших параметрів. У момент часу t_k компенсації цього параметра внаслідок дії двочастотного

збудження ВСПП миттєве значення $U(t_k)$ залежить від дії всіх інших параметрів. Ця точка на відгуку $U(t_k)$ названа "вузловою" ГОТ щодо вектора компенсованого параметра. Внаслідок різниці фазових кутів функцій впливу параметрів "вузлові" точки по різних параметрах формуються у різні моменти часу. З іншого боку, можуть існувати області, з яких вектори впливу параметрів додаються, утворюючи максимуми (і в рівній мірі - мінімуми) у відгуку $U(t)$. Амплітудно-фазові співвідношення функцій впливу параметрів, як це очевидно, визначають і моменти часу переходу відгуку через нуль $U(t) = 0$.

Сумарний відгук ВСПП $U(t)$ при дії кількох параметрів ОК та частот збудження ВСПП можна дослідити на основі НЛБ-моделі відгуку ВСПП чи її лінійного наближення. Проте принциповим, що розглянуто, є розкриття механізму формування особливих точок у двочастотному і загалом - багаточастотному відгуку ВСПП.

Сума (3) двох гармонійних коливань з частотами ω_1 та $\omega_2 = n \cdot \omega_1$ представляє собою амплітудно-фазо-модульоване коливання з частотою $\omega = \omega_1$, що, як відомо, має наступний вид:

$$u(t) = A \cos(\omega t + \varphi + \varphi_0) + B \cos(n\omega t + \varphi_n) = U_{12} \cos(\omega t + \alpha)$$

$$U_{12}(t) = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos[(n-1)\alpha t + \varphi_n - \varphi - \varphi_0]},$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{A \sin(\varphi + \varphi_0) + B \sin[(n-1)\alpha t + \varphi_n]}{A \cos(\varphi + \varphi_0) + B \cos[(n-1)\alpha t + \varphi_n]} \quad (10).$$

Додаючи до збудження ВСПП ще один струм з частотою ω_3 , що є гармонікою частоти ω_1 (при $\omega_3 \neq \omega_2$), тричастотний відгук ВСПП з урахуванням представлення (10) можна розглядати у виді, аналогічному до виду двочастотного відгуку, а саме:

$$U(t) = A \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_0) + B \cdot \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + C \cdot \cos(\omega_3 t + \varphi_3 + \varphi_{03}) = U_{12} \cdot \cos(\omega_1 t + \alpha) + C \cdot \cos(\omega_3 t + \varphi_3 + \varphi_{03}),$$

де φ_{03} початкова фаза, якою можна керувати, $\varphi_{03} = \text{var}$. Таким чином, щодо тричастотного відгуку ВСПП (11) можна провести аналіз, подібний до аналізу двочастотного відгуку, і представити його також через модульований відгук частоти $\omega = \omega_1$. Притому постановка задачі компенсації впливу заданого параметра на частоті ω_1 відгуками двох частот (ω_2 та ω_3) ускладнює аналіз. Проте принциповим залишається те, що час t_k формування особливих точок, визначений для двочастотного відгуку, може бути прийнятий за базовий для подальшого аналізу.

Для компенсації впливу заданого параметра у складовій відгуку ВСПП на основній частоті ω_1 складовими інших частот $\omega_2, \omega_3, \dots, \omega_m$ необхідно, щоб виконувалась умова:

$\operatorname{Mod} F_{\omega_1}(x_{0j}) = \sum a_j \operatorname{Mod} F_{\omega_1}(x_{0j})$,
де a_j - вагові коефіцієнти. Вибором коефіцієнтів a_j можна мінімізувати $U(t_k)$, тобто зменшити похибку компенсації параметра x_j у порівнянні з двочастотним відгуком в інтервалі його зміни ($x_{j\min}; x_{j\max}$). Проте принциповим підходом щодо зменшення похибки від впливу заводських параметрів є нелінійна обробка частотних складових у відгуку ВСПП. Тому можна вважати недоцільним значне збільшення частот у методі відбору інформації за миттєвими значеннями в особливих точках, що реалізує лінійні перетворення над складовими відгуку. Імпульсне збудження ВСПП, яке в основному реалізують періодичними прямокутними (чи іншої форми) імпульсами струму, на основі розкладу Фур'є розглядається як варіант багаточастотного збудження ВСПП, при якому амплітудно-фазові співвідношення складових спектру струму збудження у певній мірі можуть бути змінені за рахунок періодичності, тривалості та форми імпульсу [12]. Останнє широко використовують з метою зменшення похибки, що обумовлена заводськими факторами. Проте, як свідчать результати розробок [7,8], це дійсно не засвідчило переваг імпульсного методу щодо точності перед відомими методами обробки гармонійних сигналів, але вони проявляються та можуть бути розвинуті в питаннях схемотехнічної реалізації засобів ВС контролю. При імпульсному збудженні основний внесок у формуванні відгуку ВСПП дають перші два - три члени його розкладу по гармоніках. Із скороченням тривалості імпульсу відносно періоду кількості гармонік, що необхідно враховувати, збільшується. Це робить громіздким аналіз відгуку ВСПП, однак механізм формування особливих точок, що розглянутий вище, для лінійної системи, якою є система ВСПП-ОК, залишається тим же самим.

Особливі точки компенсації впливу параметра, або "вузлові" у двочастотному відгуку ВСПП, для яких момент часу формування t_k відповідає умові (5), визначені як головні особливі точки. На відміну від ГОТ "вузлові" точки формуються також при виконанні умови компенсації проєкцій миттєвих значень векторів A та B на вісь OX . Так, для векторів A_1 та B_1 , рис.2а після моменту часу t_1 (вектори у протифазі) аргумент вектора B_1 зростає з більшою швидкістю і у деякий момент часу $t_{11} = t_1 + \Delta t$ до наступної ГОТ проєкції миттєвих значень векторів A_{11} та B_{11} стануть рівними та протилежними за знаком. На основі умови для аргументів визначається момент часу t_{11} формування додаткової до ГОТ при t_1 "вузлової" точки:

$$\pi - \arg A_{11} = \arg B_{11}; \quad \text{при } A = B.$$

Тоді

$$\Delta t_1 = \frac{2(\pi - \arg A_1)}{(n+1)\omega},$$

де $\arg z$ - головне значення $\text{Arg } z$; $-\pi < \arg z < \pi$.

Аналогічно формуються "вузлові" точки у моменти часу $t_{kk} = t_k + \Delta t_k$, де $k = 2(p-1)$, $p = 1; (n-1)$ є парним, після ГОТ суми. В результаті компенсації проєкцій миттєвих значень векторів A та B у відгуку ВСПП $u(t)$, окрім ГОТ, утворюються додаткові до них "вузлові" точки. З останнього випливає також висновок, що "вузлові" точки формуються і без виконання умови рівності модулів $A = B$ за умови рівності проєкцій миттєвих значень векторів A та B у деякі моменти часу (протягом періода нижньої частоти), що є функцією амплітуд, початкових фаз та співвідношення частот цих векторів.

Висновки. Відгук ВСПП $U(t)$ при багаточастотному та імпульсному збудженні формується як векторна сума миттєвих значень векторів функцій впливу параметрів системи ВСПП-ОК по частотах спектру, утворюючи при цьому точки максимального відхилення в моменти часу, коли сумарний вектор стає найбільшим за модулем, а також множину головних "вузлових" та додаткових до них "вузлових" точок, в яких відбувається компенсація впливу по окремих параметрах системи ВСПП-ОК. Важливим притому є те, що, окрім загального пошуку часу спостереження особливої точки, особливу точку можна сформулювати у заданий момент часу t_k шляхом зміни розбіжності початкових фаз струмів збудження ВСПП.

Глибина компенсації впливу завадового параметра у "вузловій" точці залежить від амплітудних та фазових співвідношень спектральних складових струму збудження ВСПП. Найбільш просто оптимальні співвідношення формуються при багаточастотному збудженні. Проте в зв'язку з нелінійністю функцій впливу параметрів компенсація у "вузловій" точці не може бути повною принципово. Останнє обґрунтовує розмитість "вузлової" точки, що спостерігають в експериментальних дослідженнях, та обмеження імпульсного методу щодо точності.

Завдяки тому, що миттєве значення відгуку ВСПП формується як сума миттєвих значень векторів функцій впливу на різних частотах і в результаті утворює різні їх співвідношення у різні моменти часу, методу відбору інформації по миттєвих значеннях відгуку в особливих точках та в деякі задані моменти часу (за інших умов співвідношення функцій впливу) властиві широкі інформативні можливості. Без додаткових перетворень дані вимірювань можуть використовуватись для подальшої цифрової обробки. Процедури, що стосуються встановлення

амплітудних та фазових співвідношень між складовими частотного спектра, при необхідності можуть бути здійснені відповідним формуванням струму збудження ВСПП при імпульсному чи багаточастотному збудженні. Все це впливає на спрощення схемотехнічних рішень, підвищення точності та надійності їх апаратної реалізації. Притому мета побудови систем прецизійного селективного та багатопараметрового ВС контролю ставить задачі обробки результатів вимірювань з урахуванням нелінійного та взаємозалежного впливу параметрів системи ВСПП-ОК.

1. Тетерко А. Я. Метод миттєвих значень з формуванням особливих точок при селективному вихрострумовому контролі. - *Матеріали II Української наук.-техн. конфер. "Неруйнівний контроль та технічна діагностика"*. Дніпропетровськ. 1997. - С. 102.
2. Waidelich D. L. Coating Thickness Measurements Using Pulsed Eddy Currents, *Proc. Nat. Electron. Conf.* 1954., 10, P. 231-236.
3. Waidelich D. L. Reducting of Probe-Spacing Effect in Pulsed Eddy Current Testing, 1958, *ASTM, Special Techn. Publ.*, № 223, *Sump. On Non-Destructive Testing in the Field of Nuclear Energy*, P. 191-200.
4. Русскевич Ю.Н. Применение импульсного вихревого метода контроля толщины покрытий // *Дефектоскопия*. - 1968. - № 1. - С. 74-78.
5. Ступура А. П. Расчет нестационарного электромагнитного поля в многослойном цилиндре // *Дефектоскопия*. - 1969. - № 4. - С. 59-64.
6. Бондаренко Н. Л., Шкарлет Ю. М., Чуб А. Ф. Отражение и экранирование нестационарного поля витка проводящей средой // *Дефектоскопия*. - 1973. - № 4. - С. 118-124.
7. Сапунов В. М., Беда П. И. Расчет поля вихревых токов в ферромагнитной пластине со сквозным дефектом при импульсном возбуждении // *Неразрушающие методы контроля; Научно-техн. сборник*. - М.: ВИАМ, 1987. - № 5. - С. 34-37.
8. Дмитриев В. С., Бузов В. Н. Особенности построения импульсных вихретоковых средств контроля // *Дефектоскопия*. - 1989. - № 5. - С. 59-62.
9. *Неразрушающий контроль*. В 5-ти кн. Кн. 3: *Электромагнитный контроль* / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. - М.: Высш. шк., 1992.
10. Тетерко А. Я. Створення нелінійної моделі відгуку первинного перетворювача для селективного електромагнітного контролю // *ФХММ*. - 1996. - № 6. - С. 93-103.
11. Тетерко А. Я., Учинин В. Н., Зыбов В. Н. Устройство для двухчастотного вихретокового контроля. - *Авт. свид. № 1188635*. - *Бюл. изобр.*, 1984, № 40.
12. *Радиотехнические цепи и сигналы* / Под ред. К. А. Самойло. - М.: Радио и связь, 1982.