

УДК 681.518.5

Віктор Вікторович Вишнівський,
Микола Геннадійович Ніколайчук

ОБҐРУНТУВАННЯ ЧАСТОТНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ ОБ'ЄКТІВ РЕЗО

Вступ. Об'єкти радіоелектронних засобів озброєнь (РЕЗО) представляють собою складні технічні системи. Головним їх завданням є забезпечення виконання задач функціонального використання. При цьому на етапі їх проектування питанням розробки системи технічного контролю та формування сукупностей діагностичних параметрів не приділяється належної уваги.

Радіоелектронні засоби озброєння у своєму складі мають окремий клас найважливіших елементів — цифрові пристрої. Для побудови сучасних засобів діагностування для цифрових пристроїв пропонується метод частотний енергетичний метод отримання та обробки діагностичної інформації про їх технічний стан (ТС) [1].

Постановка задачі. У даній статті вирішуються завдання вибору діагностичного параметра (ДП) за умови використання пачок енергодинамічних імпульсів (ЕДІ), що виникають у шині живлення цифрових пристроїв в якості діагностичної інформації. Це дозволяє проводити контроль ТС цифрових пристроїв із заданою вірогідністю. Для цього пропонується проводити їх аналіз в частотній області. Для рішення вищезначеного завдання:

- будується модель енергодинамічного процесу в частотній області;
- визначається практична ширина спектра сигналу;
- аналізується вплив часових параметрів на форму амплітудно-частотного спектра (АЧС).

Виклад основного матеріалу. Перехід від звичайної, просторово-часової форми її подання до частотно-спектральної форми приводить до більш тонкого механізму аналізу сигналів [2]. Підвищення вірогідності в цьому випадку обумовлене тим, що кожна лінія спектра містить інформацію про функцію на всьому періоді її зміни.

Нехай на вхід послідовного логічного ланцюга, що складається з N елементів, надходить прямокутний імпульс $U(t) = U_m[1(t) - 1(t - \tau)]$, з амплітудою $U_m = U^1$. Тривалість імпульсу τ_i повинна задовольняти умові

$$\tau_i \geq NT_i, \quad (1)$$

де T_i — період повторення імпульсів у межах пачки.

Шпаруватість $q=2$. Прийmemo N парним. При цьому детермінована модель сигналу в ланцюзі живлення в часовій області має вигляд:

$$U(t) = U_0 \sum_{k=0}^{\frac{n}{2}-1} \left\{ e^{-[\alpha(t-t_{m-kT})]^2} + e^{-[\alpha(t-t_{m-\tau-kT})]^2} \right\}.$$

Така модель сигналу в ланцюзі живлення в часовій області задовольняє умовам Дирихле й умові абсолютної інтегруємості. Отже, спектральна щільність $S(j\omega)$ обчислюється прямим перетворенням Фур'є:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt.$$

На підставі властивості лінійності перетворень Фур'є спектральна щільність пачки імпульсів визначається як

$$S_n(j\omega) = S_{n1}(j\omega) + S_{n2}(j\omega)$$

де $S_{n1}(j\omega)$ — спектральна щільність пачки імпульсів, що виникають у ланцюзі живлення при впливі фронту вхідного імпульсу; $S_{n2}(j\omega)$ — спектральна щільність пачки імпульсів, що виникають при впливі зрізу вхідного імпульсу.

Для першої пачки імпульсів

$$\begin{aligned} S_{n1}(j\omega) &= S_1(j\omega) + S_2(j\omega) + \dots + S_{n/2}(j\omega) = \\ &= S_1(j\omega) \left[1 + e^{-j\omega T} + \dots + e^{-j(\frac{n}{2}-1)\omega T} \right] \end{aligned}$$

де $S_1(j\omega)$ — спектр одного імпульсу; $n/2$ — число імпульсів у першій пачці.

У квадратних дужках геометрична прогресія зі знаменником $q = e^{-j(\frac{n}{2}-1)\omega T}$. Відомо, що сума геометричної прогресії визначається дробом $\frac{a_1 - a_n q}{1 - q}$, де a_1 й a_n , перший і останній члени прогресії відповідно. Звідси

$$\frac{a_1 - a_2 q}{1 - q} = \frac{1 - e^{-j(\frac{n}{2}-1)\omega T_3} e^{-j\omega T_3}}{1 - e^{-j\omega T_3}} =$$

$$= \frac{1 - e^{-j\frac{n}{2}\omega T_3}}{1 - e^{-j\omega T_3}} = \frac{\sin \frac{n}{2} \omega T_3}{\sin \frac{\omega T_3}{2}} e^{-j(\frac{n}{2}-1)\omega \frac{T_3}{2}}$$

Отже,

$$S_m(j\omega) = S_1(j\omega) \frac{\sin \frac{n\omega T_3}{2}}{\sin \frac{\omega T_3}{2}} e^{-j(\frac{n}{2}-1)\omega \frac{T_3}{2}}$$

Для другої складової пачки імпульсів

$$S_{m2}(j\omega) = S_1(j\omega) \frac{\sin \frac{n\omega T_3}{2}}{\sin \frac{\omega T_3}{2}} e^{-j(\frac{n}{2}-1)\omega \frac{T_3}{2}} e^{-j\omega \tau}$$

У цілому спектральна щільність пачки імпульсів буде мати вигляд

$$S_n(j\omega) = S_1(j\omega) \frac{\sin \frac{n\omega T_3}{2}}{\sin \frac{\omega T_3}{2}} e^{-j(\frac{n}{2}-1)\omega \frac{T_3}{2}} (1 - e^{-j\omega \tau}) \quad (2)$$

Апроксимація енергодинамічного імпульсу імпульсом дзвонової форми приводить до наступного виразу для спектра $S_1(j\omega)$ одного імпульсу:

$$S_1(j\omega) = \frac{U_0 \sqrt{\pi}}{\alpha} e^{-\frac{\omega^2}{4\alpha^2}}, \quad (3)$$

де U_0 — амплітуда імпульсу; α — коефіцієнт форми.

У цілому, з урахуванням (2) і (3), частотна детермінована модель енергодинамічного процесу в ланцюзі живлення ІС прийме вигляд:

$$S_n(j\omega) = \frac{U_0 \sqrt{\pi}}{\alpha} e^{-\frac{\omega^2}{4\alpha^2}} \frac{\sin \frac{n\omega T_3}{2}}{\sin \frac{\omega T_3}{2}} \times$$

$$\times e^{-j(\frac{n}{2}-1)\omega \frac{T_3}{2}} (1 - e^{-j\omega \tau}) \quad (4)$$

Таким чином, спектр пачки ЕДІ являє собою складну функцію

$$S_n(j\omega) = F[T_3, \tau, \alpha, \omega].$$

У виразі (4) можна виділити три характерних співмножники:

$$S_n(j\omega) = A(j\omega)B(j\omega)C(j\omega).$$

де $A(j\omega) = S_1(j\omega) = \frac{U_0 \sqrt{\pi}}{\alpha} e^{-\frac{\omega^2}{4\alpha^2}}$ — спектр одного імпульсу пачки (фактор форми спектра);

$$B(j\omega) = \frac{\sin \frac{n\omega T_3}{2}}{\sin \frac{\omega T_3}{2}} e^{-j(\frac{n}{2}-1)\omega \frac{T_3}{2}} \text{ — частотно-частот-}$$

но-залежний множник, що визначає форму внутрішнього заповнення спектра, ступінь його позрізаності (фактор складності форми); $C(j\omega) = 1 + e^{-j\omega \tau}$ — частотно-частотно-залежний множник, що впливає на форму спектра (фактор повторення).

Фактор форми $A(j\omega)$, являючись найбільш повільно мінливою функцією частоти, визначає форму огинаючої спектра. У випадку, якщо пачка складається з імпульсів дзвонової форми, її огинаюча також має дзвонову форму. Фактор форми визначає ширину спектра.

Найбільший інтерес представляє складова $B(j\omega)$ — фактор складності форми. Цей множник є функцією частоти, числа елементів послідовного ланцюга й періоду проходження імпульсів у пачці. При $\omega T_3 / 2 = \pi k$, $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$, чисельник і знаменник одночасно обертаються в нуль. При цьому утворюється невизначеність, розкриваючи яку за правилом Лопітала, одержуємо, що $B(j\omega) = \pi / 2$.

Функція $|A(j\omega)B(j\omega)|$ залежно від частоти має пелюсткову структуру. Максимуми функції розташовані на частотах $\omega T_3 / 2 = \pi k$, $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$. Амплітуди великих пелюстків визначаються добутком $\frac{\pi}{2} |A(j\omega)|$. Ширина

малих пелюстків однакова, великі пелюстки вдвічі ширше малих. Положення максимумів на осі частот в залежності від кількості імпульсів в пачці не змінюється, відстань між серединами великих пелюстків визначається частотою повторення імпульсів у пачці Ω .

Частотно-залежний множник, що враховує другий компонент пачки ЕДІ, перетворимо до вигляду:

$$|C(j\omega)| = |1 + e^{-j\omega \tau}| = 2 + 2 \cos \omega \tau \quad (5)$$

Множник $|C(j\omega)|$ змінюється в межах від 0 до 2 з періодом $2\pi / \tau$.

Таким чином, попередній аналіз отриманої моделі пачки ЕДІ в частотній області дозволяє зробити висновок про те, що спектри таких сигналів можуть бути використані як діагностична інформація при енергодинамічному методі перевірки працездатності цифрових пристроїв.

Кожна пачка енергодинамічних імпульсів має кінцеву тривалість і, отже, має нескінченний спектр. Практично всі пристрої виділення діагностичної інформації мають обмежену смугу пропускання. Тому при виділенні сигналу може бути отримана лише частина його частотного спектра, при цьому необхідно забезпечити виділення найбільш істотної, з погляду наявності діагностичної інформації, частини спектра.

Вибір практичної ширини спектра сигналу визначається двома критеріями: енергетич-

ним критерієм і критерієм припустимих спотворювань сигналу. У більшості випадків за практичну ширину спектра сигналу приймають діапазон частот, у межах якого міститься 90% енергії сигналу. Тому скористаємося енергетичним критерієм вибору практичної ширини спектра.

Аналіз виразу (4), що описує спектр пачки ЕДІ, показує, що обгинаюча АЧС пачки визначається формою спектра одного імпульсу. Енергія сигналу, зосереджена в смузі частот від 0 до ω_1 може бути виражена через спектральну щільність у такий спосіб:

$$W = \left(\frac{U_0}{\alpha}\right)^2 \int_0^{\omega_1} e^{-2\frac{w}{2\alpha}} dw. \quad (6)$$

Повна енергія одиночного дзвоного відеоімпульсу, відповідно до рівності Парсевалля:

$$W_0 = \int_{-\infty}^{\infty} [u(t)]^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left[U_0^2 e^{-(\sqrt{2}\alpha t)^2} \right] dt = \frac{U_0^2}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

Тоді функція $\psi(\omega_1) = W / W_0$ характеризує частину енергії одиночного дзвоного імпульсу, що зосереджена в смузі частот від 0 до ω_1 . Одержимо $\psi(\omega_1)$:

$$\begin{aligned} \psi(\omega_1) &= \frac{\left(\frac{U_0}{\alpha}\right)^2 \int_0^{\omega_1} e^{-2\left(\frac{w}{2\alpha}\right)} dw}{\frac{U_0^2}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{2}}} = \\ &= \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\omega_1} e^{-2\left(\frac{w}{2\alpha}\right)} dw \end{aligned}$$

Проведемо заміну змінних: $w / \alpha = z, w = z\alpha, dw = \alpha dz$.

Тоді

$$\begin{aligned} \psi(\omega_1) &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\omega_1/\alpha} e^{-z^2} dz = \\ &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\omega_1/\alpha} e^{-z^2} dz = 2\Phi(\omega_1 / \alpha), \end{aligned} \quad (7)$$

де $\Phi(\omega_1 / \alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\omega_1/\alpha} e^{-z^2} dz$ — функція Лапласа.

Відомо, що якщо визначити тривалість дзвоного імпульсу на рівні, що відповідає 90% енергії імпульсу, то коефіцієнт форми виражається через тривалість імпульсу як $\alpha = 1,65 / \tau_3$. Для нашого випадку $\alpha = 4,42 \cdot 10^8$.

Отже, ширина спектра пачки ЕДІ не залежить від числа імпульсів, їх розташування в межах пачки, наявності імпульсів кратного спрацьовування. Практична ширина пачки енергодинамічних імпульсів визначається шириною спектра одного імпульсу й становить величину порядку 120 Мгц.

Відомо, що форма й параметри спектра сигналу визначаються формою й параметрами сигналу. Так, з аналізу виразу (4) можна зробити висновок про те, що число імпульсів у пачці впливає на ступінь порізаності спектра; період повторення імпульсів у пачці, ви-

значає положення головних максимумів модуля спектральної щільності на осі частот; тривалість одного імпульсу пачки впливає на ширину спектра сигналу в цілому.

Проаналізуємо вплив можливих флуктуацій часових параметрів сигналу на параметри амплітудно-частотного спектра (АЧС).

У межах однієї пачки ЕДІ ідуть із періодом T_3 . Число імпульсів n залежить від числа елементів послідовного ланцюга N й у випадку, якщо всі логічні елементи справні, виконується $n = N$. Проаналізуємо залежність АЧС пачки ЕДІ від числа імпульсів n з урахуванням фактора повторення $C(j\omega)$.

У чисельник виразу (5), що визначає фактор складності форми $B(j\omega)$, входить число n , що визначає кількість імпульсів у пачці ЕДІ. Зміна n приводить до зміни періоду повторення функції $\sin(n\omega T_3 / 4)$. При цьому форма спектра істотно змінюється. В спектрі ЕДІ існують частоти, на яких значення модулів спектральних щільностей однозначно залежать від числа імпульсів у пачці. Спектральні складові з такими частотами є носіями діагностичної інформації.

Розглянемо вплив тривалості імпульсу на АЧС. Тривалість одного імпульсу пачки визначає практичну ширину спектра пачки ЕДІ. Якісний аналіз АЧС дзвоного відеоімпульсу показує, що при збільшенні τ_3 спектральна щільність при $\omega = 0$ зростає й ширина спектра зменшується. При зменшенні τ_3 спектральна щільність при $\omega = 0$ зменшується й ширина спектра збільшується. Однак в околиці точки ω' існує діапазон частот $\omega'' - \omega'''$, у межах якого зміни спектральної щільності залежно від зміни τ_3 незначні й не перевищують деякого наперед заданого значення. Визначимо, як виражається ширина $\omega'' - \omega'''$ зони квазістаціонарності спектра залежно від відносної зміни модуля спектральної щільності.

Знайдемо частоту ω' , на якій перетинаються обгинаючі спектрів пачок імпульсів із тривалістю τ_3 й τ_3 ($\tau_3, \tau_3 < \tau_3$). Для цього у вираз (3) введемо тривалість імпульсу за умови, що вимірювання проводиться на рівні $U_0 / 2$. При цьому масштабний коефіцієнт α і тривалість імпульсу пов'язані співвідношенням $\alpha = 2 / \tau_3$. Вираз (3) прийме вигляд:

$$S_1(j\omega) = \frac{U_0 \sqrt{\pi} \tau_3 e^{-\frac{\omega^2 \tau_3^2}{16}}}{2}. \quad (8)$$

Для частоти ω' виконується

$$\frac{U_0 \sqrt{\pi} \tau_{3_1} e^{-\frac{\omega'^2 \tau_{3_1}^2}{16}}}{2} = \frac{U_0 \sqrt{\pi} \tau_{3_2} e^{-\frac{\omega'^2 \tau_{3_2}^2}{16}}}{2}$$

Провівши аналітичні перетворення отримаємо:

$$\omega''' - \omega'' = \sqrt{\omega'^2 + 16 \frac{\ln\left(\frac{2-\eta}{2+\eta}\right)^{\pm 1}}{\tau_{3_2}^2 - \tau_{3_1}^2}} \quad (9)$$

$$\eta = 2 \frac{\tau_{12} e^{-\frac{\omega^2 \tau_{12}^2}{16}} - \tau_{11} e^{-\frac{\omega^2 \tau_{11}^2}{16}}}{\tau_{12} e^{-\frac{\omega^2 \tau_{12}^2}{16}} + \tau_{11} e^{-\frac{\omega^2 \tau_{11}^2}{16}}}$$

Для знаходження w'' показник ступеня в другому доданку підкореневого вираження дорівнює +1, для знаходження w''' показник дорівнює -1.

Вираз (9) дозволяє оцінити діапазон частот $w''' - w''$, у межах якого зміна тривалості імпульсу від τ_{11} до τ_{12} приведе до відносної зміни модуля спектральної щільності на задане число відсотків.

Період проходження імпульсів пачки визначається сумою часу затримки поширення сигналу при включенні $t_{сп}^{1,0}$ й часі затримки поширення сигналу при вимиканні $t_{сп}^{0,1}$ цифрової мікросхеми. Величини $t_{сп}^{1,0}$ й $t_{сп}^{0,1}$ обумовлені процесами перезаряду ємностей (паразитного навантаження, переходів транзисторів) і розсосування надлишкового заряду. Час розсосування заряду практично від ІС до ІС не змінюється, тому що дуже точно витримується легування планарних транзисторів. Для стандартних ТТЛ схем при температурі 25°C, $K_{раз} = 10$ і $C_n = 15$ пФ типові значення часу затримки поширення $t_{сп}^{1,0} = 8$ нс при включенні й вимиканні відповідно становлять $t_{сп}^{0,1} = 12$ нс.

Для мікросхем серії ЕЗЛ що найбільший вплив на затримку розповсюдження надають зміни напруги живлення, зсуву рівня й збільшення ємнісного навантаження. Ці величини для даного типу ТЕЗ являють собою константи, а зміна часу затримки від температури не перевищує 5% у діапазоні від 0 до 60°C.

Інтегральні схеми базису КМДП мають найбільші значення величин часу затримки. Так для ІС серії 176 $t_{сп}^{1,0}$ і $t_{сп}^{0,1}$ становить величину 200 нс. Одночасно відзначається висока стабільність цих величин.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що в спектрі пачки ЕДІ розташування головних максимумів модуля спектральної щільності, що обумовлене частотами, кратними $2\pi/T_3$, для ІС даного логічного базису є постійним.

Вплив амплітуди імпульсів незначно позначається на формі амплітудно-частотного спектра пачки ЕДІ. Вираз (4) однозначно визначає пряму пропорційну залежність спектральної щільності від амплітуди енергодинамічного імпульсу. У той же час аналіз

фактора форми $B(j\omega)$ (5) дозволяє зробити висновок про те, що положення на осі частот точок, що відповідають максимумам і мінімумам модуля спектральної щільності, не залежить від коливань амплітуди імпульсу.

Проте аналіз впливу параметрів пачки енергодинамічних імпульсів на амплітудно-частотний спектр показав, що існують такі діапазони частот, у межах яких відмінність спектрів за рахунок числа імпульсів у пачці виражено набагато сильніше, ніж від розкиду часових параметрів. Максимуми й мінімуми спектральної щільності на таких інформативних частотах можуть бути використані як діагностична інформація.

Висновки:

1. Отримано модель пачки ЕДІ в частотній області, що дозволяє використовувати спектр таких сигналів в якості діагностичної інформації при енергодинамічному методі перевірки працездатності цифрових пристроїв.
2. Проведений аналіз впливу параметрів цифрових пристроїв на АЧС пачки ЕДІ показав:
 - ширина спектра пачки ЕДІ не залежить від числа імпульсів, їх розташування в межах пачки, наявності імпульсів кратного спрацьовування. Практична ширина пачки енергодинамічних імпульсів визначається шириною спектра одного імпульсу;
 - в спектрі ЕДІ існують частоти, на яких значення модулів спектральних щільностей однозначно залежать від числа імпульсів у пачці. Спектральні складові з такими частотами є носіями діагностичної інформації;
 - визначено діапазон частот у межах якого зміна тривалості імпульсу від τ_{11} до τ_{12} приведе до відносної зміни модуля спектральної щільності;
 - в спектрі пачки ЕДІ розташування головних максимумів модуля спектральної щільності, що обумовлене частотами, кратними $2\pi/T_3$, для ІС даного логічного базису являється постійним.

Література

1. Діагностика цифрових та аналогових пристроїв радіоелектронної техніки : Монографія / В. В. Вишнівський, М. К. Жердев, С. В. Ленков, В. О. Проценко; під редакцією М. К. Жердева, С. В. Ленкова. — К. : Знання України, 2009. — 220 с. 2. Теорія радіолокаційних систем : підручник. — Вид. друге / В. В. Вишнівський, Б. Ф. Бондаренко, В. П. Долгушин та ін.; за заг. ред. С. В. Ленкова. — К. : ВПЦ "Київський університет", 2011. — 383 с.

Рассматривается частотный энергетический метод контроля технического состояния цифровых устройств объектов радиоэлектронных средств вооружений. Данный метод позволяет использовать спектр энергодинамических импульсов, которые возникают в шине питания цифровых устройств для проверки их работоспособности.

Ключевые слова: диагностический параметра, средства вооружений РЕЗО, энергодинамические импульсы.

The frequency power method of control of the technical state of digital devices of ob'ektiv of radio electronic facilities of armaments is examined. This method allows to use the spectrum of energydynamic impulses which arise up in the tire of feed of digital devices for verification of their capacity.

Key words: diagnostic parameter, facilities of armaments of REZO, energydynamic impulses.