УДК 621.317

Гордєєв Б.М., Грєшнов А.Ю.

КОРЕКЦІЯ АПАРАТНОЇ ФУНКЦІЇ ТА РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОЛІМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ

Розглянута можливість підвищення точності поліметричних інформаційних систем, шляхом коригування апаратної функції та роздільної здатності.

Ключові слова: *апаратна функція, поліметрична система, роздільна здатність.*

Рассмотрена возможность повышения точности полиметрических информационных систем путем коррекции аппаратной функции и разрешающей способности.

Ключевые слова: *аппаратная функция, полиметрическая система, разрешающая способность.*

The possibility of increasing the accuracy for polymetric information systems through the correction of hardware function and system resolution is considered.

Key words: *hardware function, polymetric system, resolution.*

ВСТУП

Апаратна функція (АФ) поліметричної системи (ПМС) дорівнює згортці зондуючого сигналу і імпульсної характеристики (ІХ) стробоскопічного перетворювача, визначає роздільну здатність і потенційні можливості ПМС. АФ ПМС може спостерігатися експериментально на екрані індикатора в режимі холостого ходу або короткого замикання входу. Ідеалізована АФ ПМС є функцією Хевісайда. У реальних умовах реалізувати АФ у вигляді функції Хевісайда неможливо, оскільки ПМС має кінцеву тривалість фронту зондуючого сигналу і обмежену смугу пропускання стробоскопічного перетворювача. Роздільна здатність ПМС і точність виміру тим більше, чим ближче значення АФ до значень функції Хевісайда.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Можливості поліпшення технічних характеристик ПМС обмежені використовуваною елементною базою, тому слід розглянути можливість корекції АФ за допомогою обробки інформації на ЕОМ.

Мета роботи – дослідження можливості корекції АФ і роздільної здатності з метою підвищення точності ПМС.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Під корекцією АФ розумітимемо таку обробку, яка дозволить отримувати АФ, найбільш близьку до функції Хевісайда.

Корекція апаратної функції ПМС

Метод корекції включає наступні операції:

1. За допомогою алгоритму ШПФ обчислюється оцінка спектру зміряної АФ:

$$G(\omega) = F[g(t)], \text{ де F – операція ШПФ.}$$

2. Обчислюється оцінка спектру відбитого сигналу:

$$U_0(\omega) = F[u_0(t)].$$

3. У смузі частот, де вплив шумів незначний, виконується ділення спектру відбитого сигналу на спектр зондуючого сигналу:

$$K(\omega)=\frac{U_0(\omega)}{G(\omega)}\cdot A(\omega),$$

де $A(\omega)$ – вагове вікно, яке визначає смугу частот і зменшує рівень шумових складових у значеннях функції $K(\omega)$. Смуга пропускання вікна визначається співвідношенням спектральної щільності шуму і сигналу.

4. За допомогою операції зворотного ШПФ F^{-1} знаходиться скоригована IХ досліджуваного об'єкту: $K(t)=F^{-1}[K(\omega)]$. IХ інтегрується: $h(t)=\int_0^t k(t)dt$.

Якщо замість відбитого сигналу $u_0(t)$ використовувати зондуючий сигнал, що реєструється стробоскопічним перетворювачем, то $h(t)$ і буде цією АФ. Ця задача широко поширена і відноситься до класу некоректних задач. Некоректність виявляється в тому, що по мірі розширення діапазону частот корекції все більше збільшується внесок шумових складових зміряних сигналів [1]. Форма і тривалість сигналу, що пройшов по чутливому елементу (ЧЕ), визначається формою і тривалістю початкового сигналу і характеристикою ЧЕ.

Корекція роздільної здатності ПМС

З теорії синтезу електричних кіл відомо, що при певних властивостях кола (наприклад, чотириполюсника) у завдання корекції входить визначення вхідної дії $U_1(t)$ для забезпечення необхідного вихідного сигналу $U_2(t)$ [2]. Ця задача розглядається зазвичай у формі визначення добавки до тієї або іншої функції $U_1(t)$, необхідної для того, щоб скоригувати небажані спотворення, що вносяться чотириполюсником.

У задачі коригування параметрів зондуючого імпульсу слід позначити: $U_2(t)=U(t)_{ОИ}$ – відбитий імпульс; $U_1(t)=U(t)_{ЗИ}$ – зондуючий імпульс.

Чотириполюсник – ЧЕ – характеризується коефіцієнтом передачі в частотній області $K(\omega)$ і перехідною характеристикою в функції часу $h(t)$. Приймемо для зручності аналізу коефіцієнт відбиття рівним одиниці. На підставі спектрального представлення імпульсних сигналів:

$$\left.\begin{aligned} S(\omega)_{ОИ} &= S(\omega)_{ЗИ}\cdot e^{-2\alpha(\omega)l} \\ S(\omega)_{ЗИ} &= S(\omega)_{ОИ}\cdot e^{2\alpha(\omega)l} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

де – $e^{-2\alpha(\omega)l}$ коефіцієнт передачі ЧЕ для подвійного пробігу сигналом ділянки завдовжки l по хвильовому каналу з коефіцієнтом загасання $\alpha(\omega)$.

Задамося формою відбитого сигналу і його тривалістю. Нехай відбитий імпульс – по формі гаусовий, а його тривалість складає: $\tau_{ОИ}=t_{\min}$.

Огинаюча такого імпульсу описується виразом:

$$U(t)_{ОИ}=A_{ОИ}\cdot e^{-\frac{t^2}{2a^2}} \text{ при } -\infty<t<\infty .$$

Спектральна функція імпульсу гауса має вигляд:

$$S(\omega)_{ОИ}=A_{ОИ}\sqrt{2\pi}\cdot a\cdot e^{-\frac{a^2\omega^2}{2}}=Be^{-\frac{\omega^2}{2b^2}}$$

Імпульс та його спектральна функція показані на рис. 1 а, б, де $a=\frac{1}{2}\tau_{ОИ}$ – половина тривалості імпульсу, що визначається на рівні $e^{-\frac{1}{2}}=0{,}606$.

$$B=\sqrt{2\pi}a\cdot A_{ОИ}=\sqrt{2\pi}\frac{1}{2}\tau_{ОИ}\cdot A_{ОИ};\ b=\frac{1}{a}=\frac{2}{\tau_{ОИ}};\ b^2=\frac{4}{\tau_{ОИ}^2}.$$

Спектральна функція зондуючого імпульсу, що задовольняє заданим умовам, згідно (1), має бути:

$$S(\omega)_{ЗИ} = B\cdot e^{-\frac{\omega^2}{2b^2}} \cdot e^{2\alpha(\omega)l} = B\cdot e^{2\alpha(\omega)l-\frac{\omega^2}{2b^2}} \tag{2}$$

Коефіцієнт затухання – лінійна функція частоти

$$\alpha(\omega) = \psi \cdot \omega$$

де ψ – коефіцієнт пропорційності.

При прийнятому визначенні спектральна функція зондуючого сигналу матиме вигляд:

$$S(\omega)_{ЗИ} = B\cdot e^{2\psi\omega l-\frac{\omega^2}{2b^2}} = B\cdot e^{2\psi\omega l-\frac{\omega^2\tau_{ОИ}^2}{8}}$$

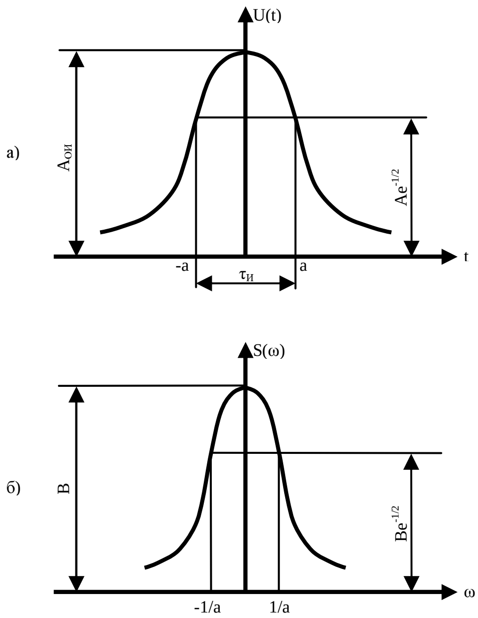

Рис. 1

Оскільки коефіцієнт передачі ЧЕ має явно виражений спад в області високих частот, то слід чекати, що функція (2) в цій області частот повинна мати екстремум.

Досліджуємо функцію (2) на екстремум.

$$S'(\omega)_{ЗИ} = \left(B\cdot e^{2\psi\omega l-\frac{\omega^2}{2b^2}}\right)' = B\left(2\psi l-\frac{\omega}{b^2}\right)\cdot e^{2\psi\omega l-\frac{\omega^2}{2b^2}}$$

Похідна спектральної функції перетворюється на нуль при:

$$2\psi l - \frac{\omega}{b^2} = 0 \tag{3}$$

$$\omega_{\max} = 2\psi l b^2 = 2\psi l\frac{4}{\tau_{ОИ}^2} = \frac{8\psi l}{\tau_{ОИ}^2}$$

На цій частоті – максимум спектральної функції, оскільки

при $\omega < 2\psi l b^2$ $\quad S'(\omega)_{ЗИ} > 0$;

при $\omega > 2\psi l b^2$ $\quad S'(\omega)_{ЗИ} < 0$.

Знайдемо характерні точки спектральної функції (2):

$$S(\omega = 0)_{ЗИ} = B = \sqrt{2}\pi \cdot A_{ОИ}\cdot\frac{\tau_{ОИ}}{2} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}A_{ОИ}\tau_{ОИ}$$

$$S_{\max}\left(\omega_{\max}=2\psi lb^2\right)_{ЗИ}=\sqrt{2}\pi\frac{1}{2}\tau_{ОИ}A_{ОИ}e^{2\psi l\omega-\frac{\omega^2}{2b^2}}=$$
$$=\sqrt{\frac{\pi}{2}}A_{ОИ}\tau_{ОИ}e^{\frac{8\psi^2 l^2}{\tau_{ОИ}^2}}$$

При $\omega\to\infty$:

$$S(\omega)_{ЗИ}=\sqrt{2}\pi\frac{\tau_{ОИ}}{2}A_{ОИ}e^{2\psi l\omega-\frac{\omega^2}{2b^2}}=$$
$$=\sqrt{\frac{\pi}{2}}A_{ОИ}\tau_{ОИ}e^{2\psi l\omega-\frac{\omega^2\tau_{ОИ}^2}{8}}\to 0$$

де $A_{ОИ}$ – амплітуда відбитого імпульсу, $\tau_{ОИ}$ – тривалість відбитого імпульсу на рівні $0{,}606A_{ОИ}$.

Функція (2) безперервна в діапазоні частот $\omega=0...\infty$ має екстремум, при $\omega\to\infty$ прагне до нуля і визначається трьома чинниками: тривалістю, формою відбитого імпульсу, частотними властивостями ЧЕ. Цілком можна передбачити, що не існує сигналу, що задовольняє будь-якому поєднанню перерахованих чинників. Найбільшу подібність функції (2) має спектральна функція сигналу, що описується виразом:

$$f(t)=\begin{cases}e^{-\alpha t}\sin\omega_1 t & при \quad t>0\\ 0 & при \quad t<0\end{cases}$$

де ω_1 – власна частота коливання.

Модуль спектральної функції сигналу (4) дорівнює:

$$\left|S(j\omega)\right|=\frac{\omega_1}{\sqrt{\left(\alpha^2+\omega_1^2-\omega^2\right)^2+4\alpha^2\omega^2}} \tag{5}$$

де α – коефіцієнт загасання.

Функція (4) має характерні точки:

$$S(\omega=0)=\frac{\omega_1}{\alpha^2+\omega_1^2};\ \omega_{\max}=\sqrt{\omega_1^2-\alpha^2},\ S(\omega_{\max})=\frac{1}{2\alpha}.$$

На підставі аналізу функції (4) визначимо граничні умови, при яких можлива подібність функції (2) спектральній функції реально існуючого сигналу.

Позначемо: $\omega_1=\frac{2\pi}{T}=\frac{2\pi}{2\tau_{ЗИ}}=\frac{\pi}{\tau_{ЗИ}}$. Для наочності виразимо α через співвідношення амплітудних значень напівперіодів протилежної полярності $A'_{ЗИ}$ і $A''_{ЗИ}$ одного періоду коливань зондуючого сигналу:

$$A'_{ЗИ}=e^{-\frac{\alpha\tau_{ЗИ}}{2}}=\frac{1}{e^{\frac{\alpha\tau_{ЗИ}}{2}}};\ A''_{ЗИ}=\frac{1}{e^{\frac{3\alpha\tau_{ЗИ}}{2}}};$$

$$n=\frac{A''_{ЗИ}}{A'_{ЗИ}}=\frac{e^{\frac{\alpha\tau_{ЗИ}}{2}}}{e^{\frac{3\alpha\tau_{ЗИ}}{2}}}=e^{-\alpha\tau_{ЗИ}};\ \alpha=\frac{\ln\frac{1}{n}}{\tau_{ЗИ}}.$$

Тоді $\omega_{\max}$ через коефіцієнт n визначається:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\omega_1^2 - \alpha^2} = \sqrt{\frac{\pi^2}{\tau_{ЗИ}^2} - \frac{\left(\ln\frac{1}{n}\right)^2}{\tau_{ЗИ}^2}} =$$

$$= \frac{\pi}{\tau_{ЗИ}} \sqrt{1 - \left(\frac{\ln\frac{1}{n}}{\pi}\right)^2},$$

при $n = 1$, $\omega_{\max} = \frac{\pi}{\tau_{ЗИ}} = \omega_1$;

при $n = 0{,}1$, $\omega_{\max} = \frac{1}{\tau_{ЗИ}}\sqrt{10 - 5{,}3} = 0{,}7\omega_1$;

при $n = 0{,}5$, $\omega_{\max} = \frac{1}{\tau_{ЗИ}}\sqrt{10 - 0{,}48} = 0{,}8\omega_1$;

при $n > 0{,}5$, $\omega_{\max} \to \frac{\pi}{\tau_{ЗИ}}$.

Співвідношення між тривалістю зондуючого і відбитого імпульсів визначимо з виразу (3). При $n > 0{,}5$:

$$\frac{\pi}{\tau_{ЗИ}} = \frac{8\psi l}{\tau_{ОИ}^2}, \ \tau_{ЗИ} = \frac{\pi}{8}\frac{\tau_{ОИ}^2}{\psi l}. \tag{6}$$

А для проміжних значень n існуватиме залежність:

$$\frac{\pi}{\tau_{ЗИ}} \sqrt{1 - \left(\frac{\ln\frac{1}{n}}{\pi}\right)^2} = \frac{8\psi l}{\tau_{ОИ}^2}; \tau_{ЗИ} = \frac{\pi}{8}\frac{\tau_{ОИ}^2}{\psi l} \sqrt{1 - \left(\frac{\ln\frac{1}{n}}{\pi}\right)^2}.$$

Задамося обмеженнями, заснованими на тому, що значення функцій (2) і (5) збігаються на частотах $\omega = 0$ і $\omega = \omega_{\max}$.

Тоді:

$$\frac{\omega_1}{\alpha^2 + \omega_1^2} = B \qquad \text{при } \omega = 0;$$

$$\frac{1}{2\alpha} = B \cdot e^{2\psi\omega l - \frac{\omega^2 \tau_{ОИ}^2}{8}} \qquad \text{при } \omega = \frac{8\psi l}{\tau_{ОИ}^2};$$

$$\frac{1}{2\alpha} = B \cdot e^{\frac{8(\psi l)^2}{\tau_{ОИ}^2}}; \alpha = \frac{1}{2}\frac{\alpha^2 + \omega_1^2}{\omega_1} e^{-\frac{8(\psi l)^2}{\tau_{ОИ}^2}} \qquad \text{або}$$

$$\exp 8\frac{(\psi l)^2}{\tau_{ОИ}^2} = \frac{1}{2\alpha}\frac{\alpha^2 + \omega_1^2}{\omega_1}.$$

Виразимо α через період коливань генератора зондуючих сигналів: $\alpha = \frac{1}{\tau_{ЗИ} \cdot K}$, де К = 2, 4, 6, 8… $K \to \infty$ при $\alpha \to \infty$.

Найбільш цікавим є випадок, коли $\alpha \to 0$. При цьому слід чекати максимальний зсув екстремуму спектральної функції зондуючого сигналу в область високих частот і забезпечення при цьому максимальної роздільної здатності, тобто

$$\frac{\alpha^2 + \omega_1^2}{\omega_1^2} \approx \omega_1, \text{ тоді}$$

$$\exp 8\frac{(\psi l)^2}{\tau_{ОИ}^2} = \frac{1}{2\alpha}\omega_1 = \frac{\pi\tau_{ЗИ}\cdot K}{\tau_{ЗИ}\cdot 2} = \frac{\pi\cdot K}{2} = 1{,}57K\,,$$

$$8\frac{(\psi l)^2}{\tau_{ОИ}^2} = \ln(1.57K).$$

Мінімальна тривалість відбитого імпульсу, що формується системою «генератор зондуючих імпульсів – ЧЕ», при вибраних співвідношеннях буде:

$$\tau_{ОИ} = \frac{2{,}8\psi l}{\sqrt{\ln(1{,}57K)}}\ .$$

З виразу (6) визначимо потрібну для забезпечення $\tau_{ОИ}$ тривалість зондуючого імпульсу:

$$\tau_{ЗИ} = \frac{3{,}14}{8\psi l}\tau_{ОИ}^2 = \frac{3{,}148(\psi l)^2}{8\psi l\cdot\ln(1{,}57K)} = \frac{3{,}14\psi l}{\ln(1{,}57K)}$$

При збільшенні K, тобто при $n \to 1$, $\tau_{ЗИ} \to \psi l$ і з достатньою для практики точністю настає рівність:

$$\tau_{ЗИ} = \tau_{ОИ}\ .$$

ВИСНОВОК

Якщо зондувати ЧЕ зондуючим сигналом, огинаюча спектральної функції якого має явно виражений максимум, можна при поліметричних вимірах у певних межах компенсувати підвищене загасання сигналу в ЧЕ в області високих частот і, тим самим, поліпшити роздільну здатність, а отже і точність вимірів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов. – М.: Сов. Радио, 1979.
2. Зиновьев А.Л., Филиппов Л.И. Введение в теорию сигналов и цепей. – М.: «Высшая школа», 1975.

Рецензенти: д.т.н., професор Жуков Ю.Д.;
к.т.н., доцент Обрубов А.В.

 Стаття надійшла до редколегії 03.05.2010 р.