

СИНТЕЗ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ НА БАЗІ НЕРЕКУРСИВНИХ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ З ЛІНІЙНОЮ ФАЗОЮ

(Представлено д.т.н., проф. Манойловим В.П.)

У статті розглядається взаємозв'язок між коефіцієнтами трьох цифрових нерекурсивних фільтрів, на базі яких побудований цифровий фільтр симетричних складових. Запропоновано методику розрахунку коефіцієнтів цифрових фільтрів симетричних складових, котра дозволяє знизити витрати обчислювальних ресурсів.

Постановка проблеми. Відсутність засобів контролю якості електроенергії ускладнює створення і використання установок, що регулюють якість електроенергії, а також проведення інших заходів, спрямованих на поліпшення показників якості електроенергії в електричних мережах. Одним з важливих показників є коефіцієнти несиметрії, нормовані ГОСТом [1]. Для одержання величин даних показників використовується метод симетричних складових [2, 3].

Останнім часом спостерігається велике зростання упровадження мікропроцесорних засобів обробки інформації і керування технологічними процесами. Причинами є: універсальність, гнучкість, малі габарити, надійність таких засобів. Застосування сучасних мікропроцесорних пристроїв дозволяє підняти засоби контролю показників якості електроенергії на новий рівень, додавши їм нові функціональні можливості. Однак перенесення методів, призначених для обробки сигналів в аналоговій формі, не дозволяє відчувати всі переваги сучасної елементної бази, тому важливо мати цифрові методи, придатні для реалізації на базі сучасних мікропроцесорних засобів.

Аналіз літературних джерел. У [3, 4] пропонуються варіанти реалізації методу симетричних складових, що дозволяють використовувати мікропроцесорні засоби, однак дані варіанти є окремими випадками варіанта реалізації, запропонованого в [5], тому надалі аналізується тільки даний метод.

Як зазначено в [6], оскільки в багатьох випадках цікавить тільки модуль симетричних складових, то був запропонований модифікований варіант, що дозволяє спростити реалізацію методу симетричних складових.

Формулювання цілей статті. Методи реалізації симетричних складових, запропоновані в [5, 6], побудовані на базі трьох нерекурсивних цифрових фільтрів (ЦФ). Через те, що до даних ЦФ пред'являються вимоги як до амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), так і до фазо-частотної характеристики (ФЧХ), методика синтезу досить трудомістка і вимагає розв'язання трьох систем рівнянь з $N + 1$ невідомими, що мінімізують функціонал [5], де N – порядок ЦФ:

$$\Phi = \int_0^{\omega_{MAX}} \alpha(\omega)(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) d\omega, \quad (1)$$

де $\alpha(\omega)$ – вагова функція;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – помилки дійсної та уявної складових.

Аналіз показав, що всі три ЦФ у смузі пропускання мають однакові АЧХ і час групової затримки, а величини ФЧХ відрізняються на постійну величину. Виникає запитання: чи можливо спростити методику синтезу ЦФ симетричних складових?

Розв'язання задачі. Розглянемо взаємозв'язок між трьома фільтрами для варіанта, запропонованого в [6] (фільтри, що спотворюють фазу симетричних складових). Відповідно до виразів, отриманих в [6], частотна характеристика ЦФ має вигляд:

$$H^n(j\omega) = e^{j\left(-\frac{N}{2}T\omega + \frac{2\pi}{3}n\right)}, \quad (2)$$

де T – період дискретизації;

ω – циклічна частота;

n – один із трьох фільтрів.

Тоді з урахуванням (2) можна виразити $H^{n+1}(j\omega)$ через $H^n(j\omega)$ таким чином:

$$H^{n+1}(j\omega) = H^n(j\omega)e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (3)$$

або з виразу (3) будемо мати:

$$H^1(j\omega) = H^0(j\omega)e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad (4)$$

$$H^2(j\omega) = H^0(j\omega)e^{j\frac{4\pi}{3}} = H^0(j\omega)e^{-j\frac{2\pi}{3}}. \quad (5)$$

Скористаємося формулою Ейлера, тоді вираз (4) набуде вигляду:

$$H^1(j\omega) = H^0(j\omega) \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right). \quad (6)$$

З огляду на те, що частотна характеристика описується формулою [7]:

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{-j\psi(\omega)} = \sum_{l=0}^N h(l)e^{-jl\omega T}, \quad (7)$$

де $A(\omega)$ – АЧХ;

$\psi(\omega)$ – ФЧХ;

$h(l)$ – імпульсна характеристика,

маємо:

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^N h^1(l)e^{-jl\omega T} &= A^0(\omega)e^{-j\varphi^0(\omega)} \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right) = \\ &= -A^0(\omega)e^{-j\varphi^0(\omega)} \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) + jA^0(\omega)e^{-j\varphi^0(\omega)} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \\ &= -A^0(\omega)e^{-j\varphi^0(\omega)} \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) + A^0(\omega)e^{-j\varphi^0(\omega) + \frac{\pi}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \\ &= -H^0(j\omega) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) + H^{0P}(j\omega) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

де $H^{0P}(j\omega)$ – частотна характеристика фільтра з антисиметричною імпульсною характеристикою.

Фільтр $H^{0P}(j\omega)$ є фільтром з антисиметричною імпульсною характеристикою у зв'язку з тим, що, як було показано [6], $H^0(j\omega)$ є фільтром із симетричною імпульсною характеристикою, при цьому їхні ФЧХ відрізняються на величину, рівну $\frac{\pi}{2}$. З огляду на вираз (7), перепишемо вираз (8) таким чином:

$$\sum_{l=0}^N h^1(l)e^{-jl\omega T} = -\sum_{l=0}^N h^0(l)e^{-jl\omega T} \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) + \sum_{l=0}^N h^{0P}(l)e^{-jl\omega T} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right). \quad (9)$$

Спростивши цей вираз, можна записати остаточний результат для знаходження коефіцієнтів фільтра $H^1(j\omega)$:

$$h^1(l) = -h^0(l) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) + h^{0P}(l) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right), \quad (10)$$

де $l = 0, 1 \dots N$.

Аналогічно наведеним вище виразам (6–9) можна провести операції з (5), у результаті одержимо формулу для знаходження коефіцієнтів фільтра $H^2(j\omega)$:

$$h^2(l) = -h^0(l) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) - h^{0P}(l) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right). \quad (11)$$

Таким чином, частотні характеристики фільтрів з лінійною фазою $H^0(j\omega)$, $H^{0P}(j\omega)$ є базисними функціями для реалізації ЦФ симетричних складових. На рис. 1–4 представлені результати синтезу ЦФ.

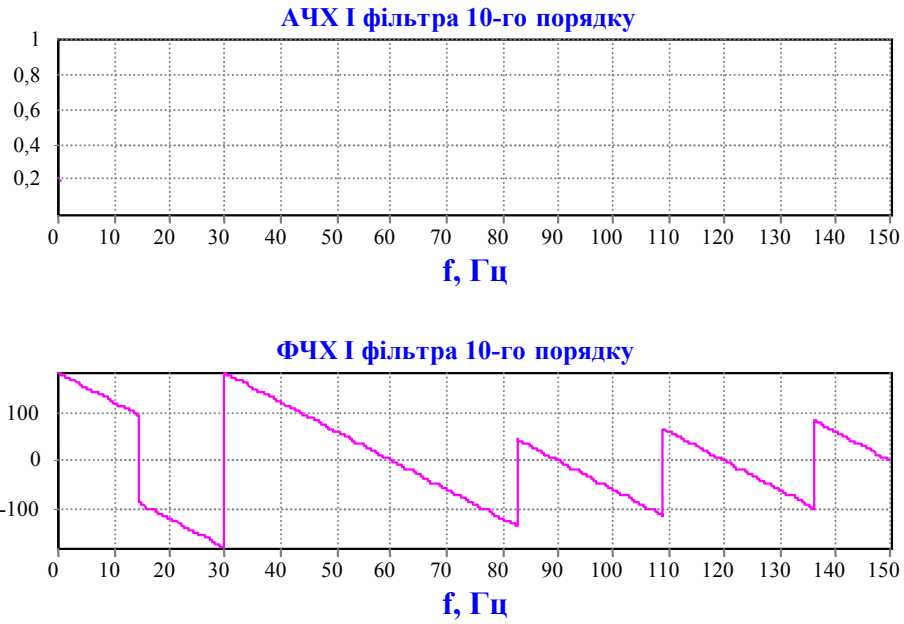


Рис. 1. Апроксимуюча частотна характеристика фільтра із симетричною імпульсною характеристикою і фільтра $H_{(1)}^0$

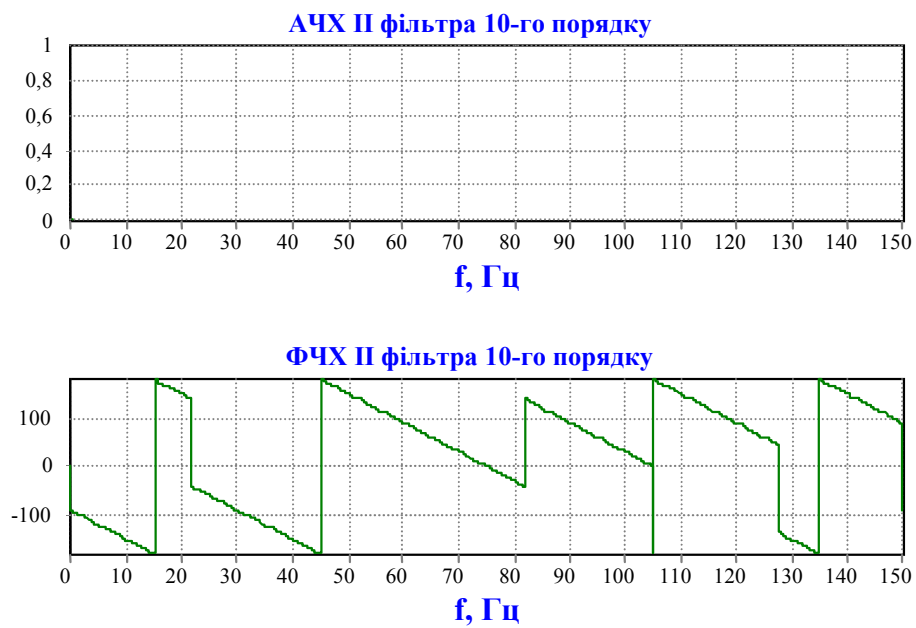
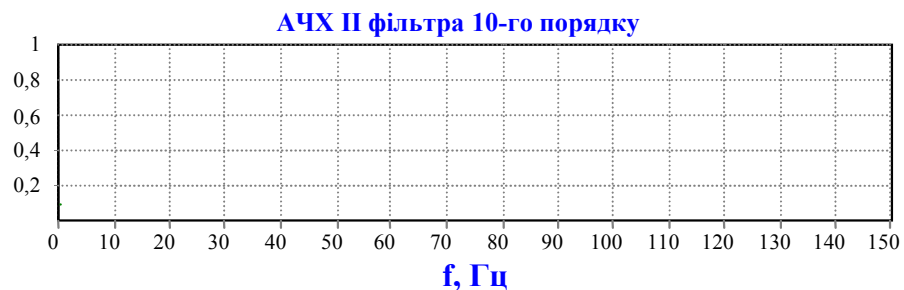


Рис. 2. Апроксимуюча частотна характеристика фільтра з антисиметричною імпульсною характеристикою



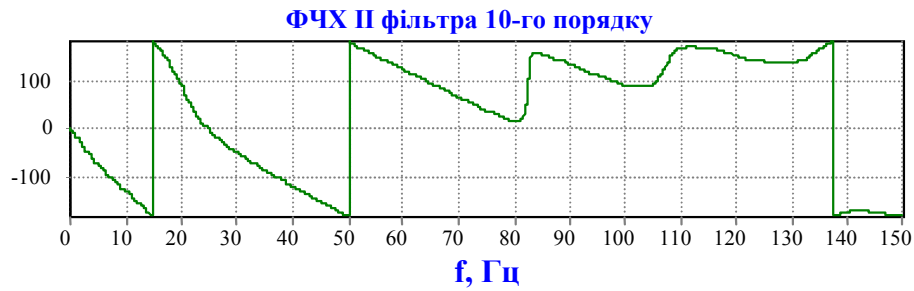


Рис. 3. Апроксимуюча частотна характеристика фільтра $H_{(1)}^1$, що спотворює фазу симетричних складових

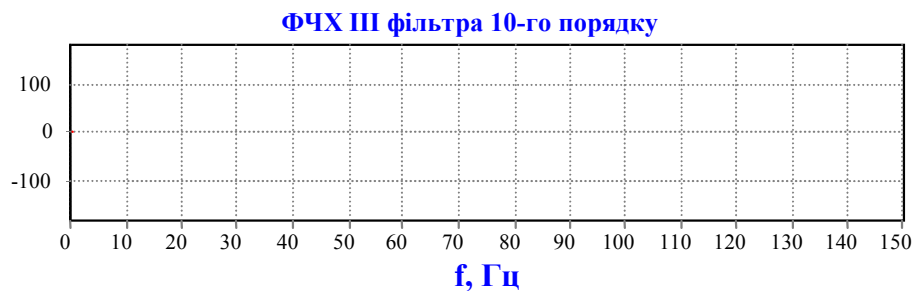
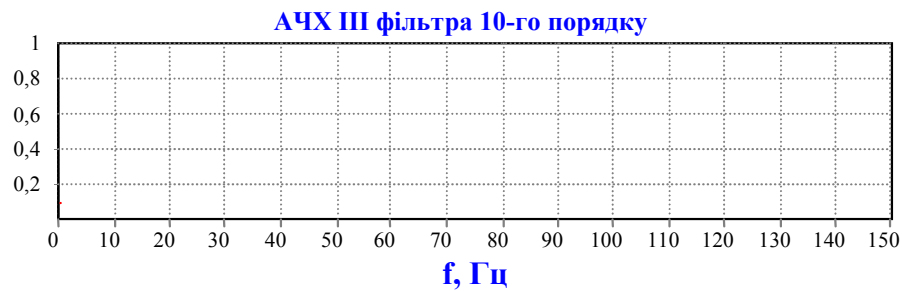


Рис. 4. Апроксимуюча частотна характеристика фільтра $H_{(1)}^2$, що спотворює фазу симетричних складових

У табл. 1 представлені коефіцієнти синтезованих ЦФ.

Таблиця 1

l	$h^0(l)$	h^{0P}	$h^1(l)$	$h^2(l)$
1	2	3	4	5
0	0.02734375	-0.080132722	-0.107476472	0.052788972
1	-0.044921875	-0.115864727	-0.070942852	0.160786602
2	-0.09765625	-0.008245847	0.089410403	0.105902097

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5
3	-0.052978516	0.145253773	0.198232288	-0.092275257
4	0.059936523	0.160054011	0.100117488	-0.219990535
5	0.120605469	0	-0.120605469	-0.120605469
6	0.059936523	-0.160054011	-0.219990535	0.100117488
7	-0.052978516	-0.145253773	-0.092275257	0.198232288
8	-0.09765625	0.008245847	0.105902097	0.089410403
9	-0.044921875	0.115864727	0.160786602	-0.070942852
10	0.02734375	0.080132722	0.052788972	-0.107476472

Для моделювання отриманих результатів була написана програма мовою С++ [8]. Причиною вибору мови С++ є її гнучкість, універсальність і можливість контролювати весь процес розрахунків. Усі використовувані методи, необхідні для створення програми, були реалізовані з використанням чисельних методів [9].

Аналіз показав, що результати, отримані відповідно до виразів, наведених в [6], цілком збіглися з результатами обчислення на підставі виразів (7) і (8).

Висновки. Результати даної роботи показали правильність припущень про взаємозв'язок між коефіцієнтами ЦФ. Підтвердженням тому є отримані співвідношення (7), (8) і результати моделювання. Дані результати дозволяють скоротити обсяг обчислювальних витрат синтезу ЦФ симетричних складових у 2,5–3 рази в порівнянні з методикою, запропонованою в [5], тому що методи синтезу ЦФ із лінійною фазою широко відомі і не викликають складності при розрахунках. Крім того, алгоритм синтезу цих ЦФ закладений у багатьох програмних пакетах математичного аналізу, наприклад, у добре відомому пакеті Matlab.

ЛІТЕРАТУРА:

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.2000. – Минск: Изд-во стандартов, 1999. – 31 с.
2. Шидловский А.К., Музыченко А.Д. Таблицы симметричных составляющих. – К.: Наукова думка, 1976. – 204 с.
3. Автоматизация электроэнергетических систем: Учебное пособие для вузов / О.П. Алексеев, В.Л. Козис, В.В. Кривенков и др.; Под ред. В.П. Морозкина, Д. Энгелане. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 448 с.: ил.
4. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / А.А. Горлач, М.Я. Минц, В.Н. Чинков. – К.: Техніка, 1985. – 151 с., ил. – Библиогр.: С. 147-149.
5. Петросян Р.В. Застосування нерекурсивних цифрових фільтрів для виміру несиметрії у трифазних мережах електроенергії // Вісник ЖІТІ. – 1999. – № 11. – С. 164–168.
6. Петросян Р.В. Застосування нерекурсивних цифрових фільтрів з лінійною фазою для виміру несиметрії у трифазних мережах електроенергії // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 14. – С. 204–205.
7. Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е. Обробка сигналів: Підручник. – К.: Либідь, 1996. – 392 с.
8. Строуструп Б. С++ язык программирования: Пер. с англ. – М.: Наука, 1991. – 315 с.
9. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа / Под ред. Б.П. Демидовича – М.: Физматгиз, 1963. – 400 с., ил.

ПЕТРОСЯН Руслан Валерійович – доцент кафедри автоматики і управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- мікропроцесорна техніка та системне програмування;
 - цифрова обробка сигналів;
 - вимірювальна техніка;
 - теорія автоматичного управління;
 - розробка електронних пристроїв.
- E-mail: e_rvs@ukr.net

Подано 27.03.2007