

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НА БАЗЕ НЕРЕКУРСИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ С ЛИНЕЙНОЙ ФАЗОЙ

Петросян Р. В.

Житомирский государственный технологический университет

e_rvs@ukr.net

In article the correlation between coefficients of three digital nonrecursive filters is considered, on the basis of which the digital filter of symmetric components is constructed. The technique of calculation of coefficients of digital filters of symmetric components is offered which allows lowering expenditures of computing resources.

Постановка проблемы. Отсутствие средств контроля качества электроэнергии затрудняет создание и использование установок, регулирующих качество электроэнергии, и проведение других мероприятий, направленных на улучшение показателей качества электроэнергии в электрических сетях. Одним из важных показателей являются коэффициенты несимметрии, нормируемые ГОСТом [1]. Для получения величин данных показателей используется метод симметричных составляющих [2, 3].

В последнее время наблюдается большой рост внедрения микропроцессорных средств обработки информации и управления технологическими процессами. Причинами является: универсальность, гибкость, малые габариты, надежность таких средств. Применение современных микропроцессорных средств позволяет средства контроля показателей качества электроэнергии поднять на новый уровень, придав им новые функциональные возможности. Однако перенос методов, предназначенных для обработки сигналов в аналоговой форме, не позволяет ощутить все преимущества современной элементной базы, поэтому важно иметь цифровые методы, пригодные для реализации на базе современных микропроцессорных средств.

Анализ литературных источников. В [3, 4] предлагаются варианты реализации метода симметричных составляющих, позволяющие использовать микропроцессорные средства, однако данные варианты являются частными случаями варианта реализации, предложенного в [5], поэтому в дальнейшем анализируется только данный метод.

Как указано в [6], ввиду того, что во многих случаях интересует только модуль симметричных составляющих, то был предложен модифицированный вариант, позволяющий упростить реализацию метода симметричных составляющих.

Цель исследований. Методы реализации симметричных составляющих, предложенные в [5, 6], построены на базе трёх нерекурсивных цифровых фильтров (ЦФ). Ввиду того, что к данным ЦФ предъявляются требования как к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), так и к фазо-частотной характеристике (ФЧХ), методика синтеза достаточно трудоёмка и требует решения трёх систем уравнения с $N+1$ неизвестными, где N - порядок ЦФ, минимизирующих функционал [5]

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

где $\alpha(\omega)$ - весовая функция,

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - ошибки действительной и мнимой составляющих.

Анализ показал, что все три ЦФ в полосе пропускания имеют одинаковые АЧХ и время групповой задержки, а величины ФЧХ отличаются на постоянную величину. Возникает вопрос: нельзя ли упростить методику синтеза ЦФ симметричных составляющих?

Решение задачи. Рассмотрим взаимосвязь между тремя фильтрами для варианта, предложенного в [6] (фильтры, искажающие фазу симметричных составляющих). В соответствии с выражениями, полученными в [6], частотная характеристика ЦФ имеет вид:

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

где T - период дискретизации,

ω - циклическая частота,

n - один из трёх фильтров.

Тогда с учетом (2) можно выразить $H^{n+1}(j\omega)$ через $H^n(j\omega)$ следующим образом:

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

или

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

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

Воспользуемся формулой Эйлера, тогда выражение (3) примет вид:

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

Учитывая, что частотная характеристика описывается выражением [7]

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{-j\psi(\omega)} = \sum_{l=0}^N h(l)e^{-jl\omega T}, \quad (5)$$

где $A(\omega)$ - АЧХ,

$\psi(\omega)$ - ФЧХ,

$h(l)$ - импульсная характеристика,

имеем:

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

где $H^{0P}(j\omega)$ – частотная характеристика фильтра с антисимметричной импульсной характеристикой.

Фильтр $H^{0P}(j\omega)$ является фильтром с антисимметричной импульсной характеристикой в связи с тем, что, как было показано [6], $H^0(j\omega)$ является фильтром с симметричной импульсной характеристикой, при этом их ФЧХ отличаются на величину равную $\frac{\pi}{2}$. Учитывая выражение (5), перепишем выражение (6) следующим образом:

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

Упростив выражение, можно записать окончательное выражение для нахождения коэффициентов фильтра $H^1(j\omega)$:

$$h^1(l) = -h^0(l) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) + h^{0P}(l) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (7)$$

где $l=0, 1 \dots N$.

Аналогично приведенным выше выражениям можно провести операции с выражением (4), в результате получим выражение для нахождения коэффициентов фильтра $H^2(j\omega)$:

$$h^2(l) = -h^0(l) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) - h^{0P}(l) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (8)$$

Таким образом, частотные характеристики фильтров с линейной фазой $H^0(j\omega)$, $H^{0P}(j\omega)$ являются базисными функциями для ЦФ, используемых для реализации ЦФ симметричных составляющих. На рис. 1-рис. 4 представлены результаты синтеза ЦФ.

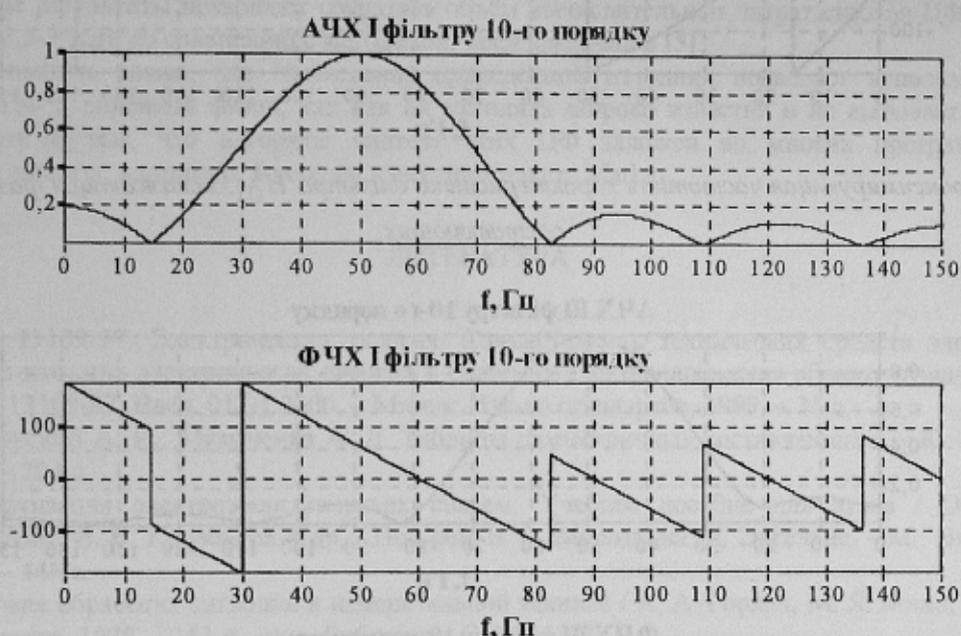


Рисунок 1 - Аппроксимирующая частотная характеристика фильтра с симметричной импульсной характеристикой и фильтра $H_{(1)}^0$

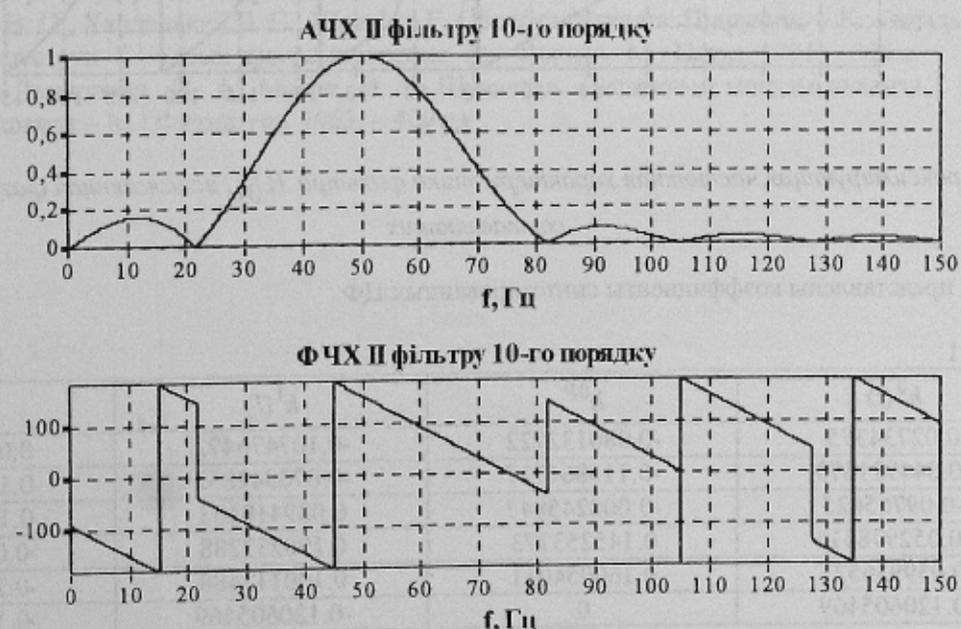


Рисунок 2 - Аппроксимирующая частотная характеристика фильтра с антисимметричной импульсной характеристикой

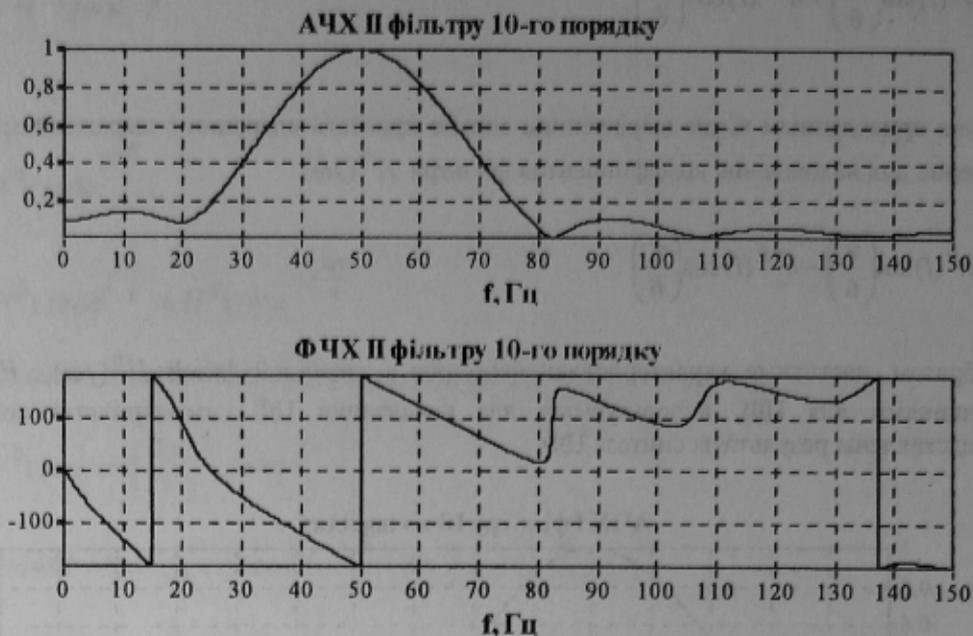


Рисунок 3 - Аппроксимирующая частотная характеристика фильтра $H_{(1)}^1$, искажающая фазу симметричных составляющих

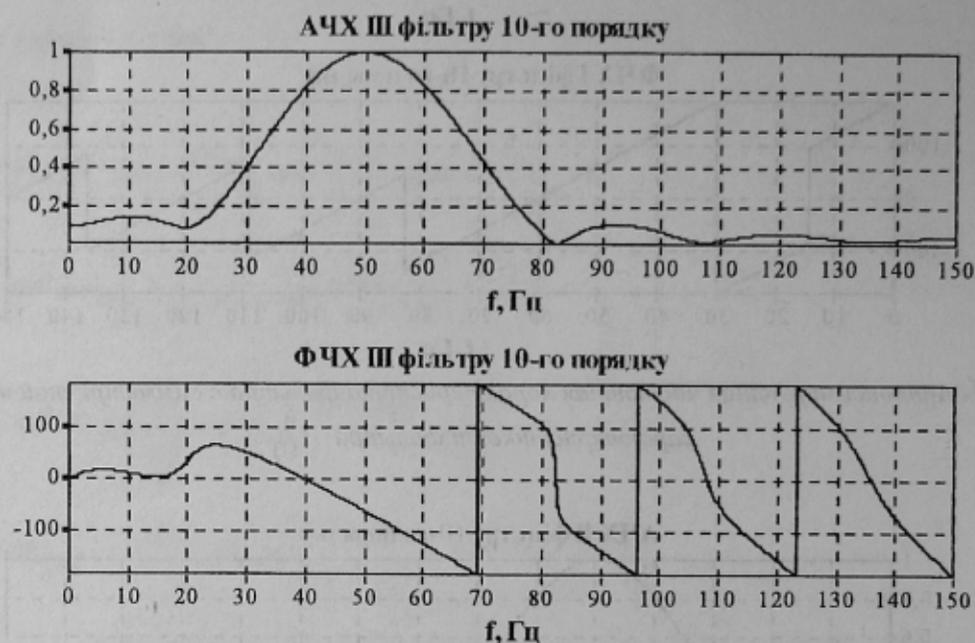


Рисунок 4 - Аппроксимирующая частотная характеристика фильтра $H_{(1)}^2$, искажающая фазу симметричных составляющих

В табл. 1 представлены коэффициенты синтезированных ЦФ.

Таблица 1

l	$h^0(l)$	h^{0P}	$h^1(l)$	$h^2(l)$
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
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 моделирования полученных результатов была написана программа на языке С++ [8]. Причиной выбора языка С++ является его гибкость, универсальность и возможность контролировать весь процесс расчетов. Все используемые методы, необходимые для создания программы, были реализованы с использованием численных методов [9].

Анализ показал, что результаты, полученные в соответствии с выражениями, приведенными в [6], полностью совпали с результатами вычисления на основании выражений (7) и (8).

Выводы. Результаты данной работы показали правильность предположений о взаимосвязи между коэффициентами ЦФ. Подтверждением тому являются полученные соотношения (7) и (8) и результаты моделирования.

Полученные результаты позволяют сократить объем вычислительных затрат синтеза ЦФ симметричных составляющих в 2,5-3 раза по сравнению с методикой, предложенной в [5].

Следует отметить также, что применение приведенной методики позволяет использовать и другие методы синтеза ЦФ с линейной фазой, так как их методика широко известна и не вызывает сложности при расчетах, в связи с тем, что алгоритм синтеза этих ЦФ заложен во многих программных пакетах математического анализа, например, в хорошо известном пакете Matlab.

ЛИТЕРАТУРА

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.
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. Б. Строуструп. С++ язык программирования: пер. с англ. – М.: Наука, 1991. – 315 с.
9. Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. Численные методы анализа / Под ред. Б. П. Демидовича – М.: Физматгиз, 1963. – 400 с.