

Р.В. Петросян, асист.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

ВИМІР КВАДРАТУРНИХ СКЛАДОВИХ НАПРУГ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ

(Представлено д.т.н., проф. Самотокіним Б.Б.)

Пропонується цифровий метод виміру квадратурних складових напруги на базі цифрових фільтрів, що дозволяє побудувати вимірювач якості електричної енергії в 3-х фазній мережі (коефіцієнти несиметрії) з використанням сучасної елементної бази.

Як було показано в [1, 2], найбільш раціонально одержувати симетричні складові з виразів:

$$3\dot{U}_{1(1)} = \dot{U}_{A(1)} + a\dot{U}_{B(1)} + a^2\dot{U}_{C(1)}; \tag{1}$$

$$3\dot{U}_{2(1)} = \dot{U}_{A(1)} + a^2\dot{U}_{B(1)} + a\dot{U}_{C(1)}; \tag{2}$$

$$3\dot{U}_{0(1)} = \dot{U}_{A(1)} + \dot{U}_{B(1)} + \dot{U}_{C(1)}, \tag{3}$$

де $U_{A(1)}$ – комплексне значення напруги фази *A* основної частоти;

$U_{B(1)}$ – комплексне значення напруги фази *B* основної частоти;

$U_{C(1)}$ – комплексне значення напруги фази *C* основної частоти;

$U_{1(1)}$ – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти;

$U_{2(1)}$ – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти;

$U_{0(1)}$ – діюче значення напруги нульової послідовності;

$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ – оператор повороту.

У [2] відзначається, що реалізація вимірювача несиметрії трифазної системи на базі формул (1)–(3) призводить до складної апаратної реалізації, тому пропонується для її спрощення використовувати вимір квадратурних складових напруги й обчислення за ними симетричних складових. Під квадратурними складовими напруги розуміється пара відліків напруги, обмірюваних з різницею у чверть періоду. Суть методу полягає в наступному:

1. Перехід від комплексних значень виразів (1)–(3) до миттєвих значень:

$$3u_{1(1)}(\omega t) = u_{A(1)}(\omega t) + u_{B(1)}(\omega t + 2\pi / 3) + u_{C(1)}(\omega t - 2\pi / 3); \tag{4}$$

$$3u_{2(1)}(\omega t) = u_{A(1)}(\omega t) + u_{B(1)}(\omega t - 2\pi / 3) + u_{C(1)}(\omega t + 2\pi / 3); \tag{5}$$

$$3u_{0(1)}(\omega t) = u_{A(1)}(\omega t) + u_{B(1)}(\omega t) + u_{C(1)}(\omega t). \tag{6}$$

2. Вимір квадратурних складових фазних напруг відповідно до таблиці 1.

Таблиця 1

Симетричні складові		Моменти дискретизації фазних напруг		
		$u_{A(1)}$	$u_{B(1)}$	$u_{C(1)}$
Пряма послідовність	$U_{1(1)y}$	0	$2\pi / 3$	$4\pi / 3$
	$U_{1(1)x}$	$\pi / 2$	$\pi / 2 + 2\pi / 3$	$\pi / 2 + 4\pi / 3$
Зворотна послідовність	$U_{2(1)y}$	0	$4\pi / 3$	$2\pi / 3$
	$U_{2(1)x}$	$\pi / 2$	$\pi / 2 + 4\pi / 3$	$\pi / 2 + 2\pi / 3$
Нульова послідовність	$U_{0(1)y}$	0	0	0
	$U_{0(1)x}$	$\pi / 2$	$\pi / 2$	$\pi / 2$

3. Обчислення квадратурних складових симетричних складових за «вибірковими» миттєви-ми значеннями фазних напруг при $\omega t = 0$:

$$3U_{1(1)y} = U_{A(1)y} + U_{1B(1)y} + U_{1C(1)y}; \tag{7}$$

$$3U_{2(1)y} = U_{A(1)y} + U_{2B(1)y} + U_{2C(1)y}; \tag{8}$$

$$3U_{0(1)y} = U_{A(1)y} + U_{B(1)y} + U_{C(1)y}, \tag{9}$$

і при $\omega t = \pi / 2$:

$$3U_{1(1)x} = U_{A(1)x} + U_{1B(1)x} + U_{1C(1)x}; \quad (10)$$

$$3U_{2(1)x} = U_{A(1)x} + U_{2B(1)x} + U_{2C(1)x}; \quad (11)$$

$$3U_{0(1)x} = U_{A(1)x} + U_{B(1)x} + U_{C(1)x}, \quad (12)$$

де $U_{1(1)y}$, $U_{1(1)x}$ – квадратурні складові прямої послідовності;

$U_{2(1)y}$, $U_{2(1)x}$ – квадратурні складові зворотної послідовності;

$U_{0(1)y}$, $U_{0(1)x}$ – квадратурні складові нульової послідовності;

$U_{A(1)y}$, $U_{A(1)x}$ – квадратурні складові напруги $u_{A(1)}$;

$U_{B(1)y}$, $U_{B(1)x}$ – квадратурні складові напруги $u_{B(1)}$;

$U_{C(1)y}$, $U_{C(1)x}$ – квадратурні складові напруги $u_{C(1)}$;

$U_{1B(1)y}$, $U_{1B(1)x}$ – квадратурні складові напруги $u_{B(1)}$, зсунуті на $2\pi / 3$;

$U_{1C(1)y}$, $U_{1C(1)x}$ – квадратурні складові напруги $u_{C(1)}$, зсунуті на $4\pi / 3$;

$U_{2B(1)y}$, $U_{2B(1)x}$ – квадратурні складові напруги $u_{B(1)}$, зсунуті на $4\pi / 3$;

$U_{2C(1)y}$, $U_{2C(1)x}$ – квадратурні складові напруги $u_{C(1)}$, зсунуті на $2\pi / 3$.

4. Обчислення діючих значень прямої, зворотної, нульової послідовностей.

Як відзначається в [2], основний недолік методу – низька завадостійкість, тому необхідно застосовувати усереднення на визначеному проміжку часу або використовувати кореляційний метод виміру квадратурних складових. Це дозволить підвищити завадостійкість, але не усувається ще один недолік, властивий й іншим методам [3] – чутливість до зміни частоти мережі. Як відзначається в [4], причина в тому, що зсув фази розглядається як затримка в часі, що призводить до зміни зсуву фази при зміні частоти, а це створює помилку при вимірюванні симетричних складових. Тому дані методи будуть нормально функціонувати лише при введенні зворотного зв'язку за частотою, що призведе до ускладнення апаратної (програмної) реалізації.

Застосування кореляційного методу більш переважно, тому що він забезпечує кращу якість результату, але в той же час він вимагає значних апаратних (великий об'єм пам'яті та значної швидкодії обчислювальних засобів) і програмних (складна реалізація алгоритму) витрат. Хоча на сьогоднішній день застосування обчислювальних засобів з великим об'ємом пам'яті і швидкодією не є критичним, але на собівартості кінцевого пристрою це все ж таки позначиться. Для зменшення обчислювальних витрат застосовують різні способи оптимізації обчислювальних процедур. Як відомо [5], Т.Стокхем ще в 1968 р. показав, що для точок $N \geq 26$ обчислення кореляційної функції за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) виявляється більш швидкодіючим, ніж стандартний. При цьому ефективність методу зростає з збільшенням числа точок. Тому при застосуванні ШПФ для обчислення кореляційної функції складність реалізації і якість результату будуть також залежати від методу реалізації ШПФ [6].

Застосування усереднення поліпшує якість результатів і має більш простий алгоритм обробки даних, ніж кореляційний метод, але для значного поліпшення потрібно збільшувати передвиборку. Об'єм передвиборки для даного алгоритму більший, ніж у кореляційному методі, тому об'єм оперативної запам'ятовуючої пам'яті (ОЗУ) у першому випадку потрібен більший, ніж у другому випадку, а постійної запам'ятовуючої пам'яті (ПЗУ) менше, тому що немає необхідності зберігати набір дискретизованих констант косинуса (синуса).

Алгоритм усереднення для обробки обмірюваних величин гірший за кореляційний метод, але він більш простий у реалізації та застосовується при наявності незначних завад у сигналі. Але даний метод можна поліпшити, якщо застосувати підхід, викладений у [7]. В алгоритмі усереднення якість вихідних даних оцінюють, використовуючи ймовірнісний підхід, тобто накладають обмеження на розроблювальний вимірювальний пристрій лише в часовій області. Але алгоритм усереднення становить не що інше, як цифровий нерекурсивний фільтр з коефіцієнтами, які дорівнюють одиниці; інакше, такий фільтр називається однорідним [8]. Тому вимагаючи зменшення рівня завади, застосовуючи ймовірнісний підхід, доводиться збільшувати об'єм передвиборки чи, застосовуючи термінологію цифрової фільтрації, робити збільшення порядку однородного цифрового фільтра. Таким чином, маємо, що алгоритм усереднення є частковим випадком цифрового нерекурсивного фільтра; тому, якщо використовувати, по суті, той же алгоритм усереднення, але з різними ваговими коефіцієнтами, можна зменшити об'єм передвиборки чи, те ж саме, порядок цифрового нерекурсивного фільтра. Коефіцієнти фільтра визначаються, виходячи з необхідної частотної характеристики, тобто обмеження на розроблювальний вимірювальний пристрій накладаються в частотній області. Переваги частотної області очевидні: легко задати необхідне співвідношення сигнал/шум, необхідний рівень вихідного сигналу, необхідний фазовий зсув. У разі потреби можна накласти обмеження на цифровий фільтр і в часовій

області. Модифікований у такий спосіб алгоритм усереднення за апаратними витратами стає порівнянний з кореляційним методом: необхідна наявність ПЗУ для збереження констант (коефіцієнти фільтра), ОЗУ, а також швидкодіючий обчислювальний пристрій. Виникає питання в необхідності застосування алгоритму усереднення в такому вигляді, власне кажучи, такий алгоритм підвищує заводозахищеність, як і кореляційний метод. Справа в тім, як уже відзначалося, що при роботі з цифровими фільтрами можна накласти обмеження на фазочастотну характеристику, а це дозволить, застосувавши по два цифрових фільтра для кожної фази мережі, виділяти квадратурні складові. Таким чином, немає необхідності знімати відліки лише в точках, відповідних таблиці 1. Алгоритм вимірювання квадратурних складових працездатний для будь-яких моментів вхідного сигналу. Причина зняття значень лише в точках, заданих таблицею 1, визначається тим, що дуже просто, використовуючи нуль-орган, можна зафіксувати момент переходу через нуль і щодо цієї точки провести визначення квадратурних складових, що дозволяє спростити вимірювальний пристрій. Але як було вище сказано, за простоту доводиться платити низькою заводостійкістю, а застосовуючи алгоритм усереднення доводиться задіяти кілька періодів вхідного сигналу, що збільшує час визначення квадратурних складових. Для визначення значень в інші моменти часу необхідно від моменту спрацьовування нуль-органа робити запуск таймера і по закінченні заданого проміжку часу робити вимірювання другої квадратурної складової, тому, щоб усунути помилку, обумовлену зміною частоти мережі, необхідно робити підстроювання таймера. Застосовуючи ж цифрові фільтри і задавши відповідні АЧХ і ФЧХ у смузі зміни частоти мережі, можна зменшити похибку вимірювання квадратурних складових.

З огляду на усе вищевикладене і, використовуючи підхід, викладений у [4] і [9], була написана програма мовою С++ синтезу цифрових нерекурсивних фільтрів для виділення квадратурних складових усіх трьох фаз.

Таблиця 2

F, Гц		Фаза А		Фаза В		Фаза С	
		I фільтр	II фільтр	I фільтр	II фільтр	I фільтр	II фільтр
49	Амплітуда, Дб	0.01793	0.01985	0.01937	0.01841	0.01937	0.01841
	Фаза	36.93	126.93	156.93	-113.05	-83.05	6.93
50	Амплітуда, Дб	0.02788	0.03156	0.03064	0.02880	0.03064	0.02880
	Фаза	30.99	120.99	150.98	-118.99	-88.99	0.98

На рис. 1 і рис. 2 представлені АЧХ і ФЧХ цифрових фільтрів квадратурних складових 11 порядку для фази А, а на рис. 3, рис. 4 та рис. 5, рис. 6 представлені АЧХ і ФЧХ цифрових фільтрів квадратурних складових для фази В і С відповідно. З частотних характеристик фільтрів видно, що фазовий зсув між фільтрами квадратурних складових дорівнює 90° , а між відповідними фільтрами різних фаз фазовий зсув дорівнює 120° . Точні значення представлені в таблиці 2 для двох частот, щоб продемонструвати працездатність пристрою при зміні мережної частоти без введення частотної корекції.

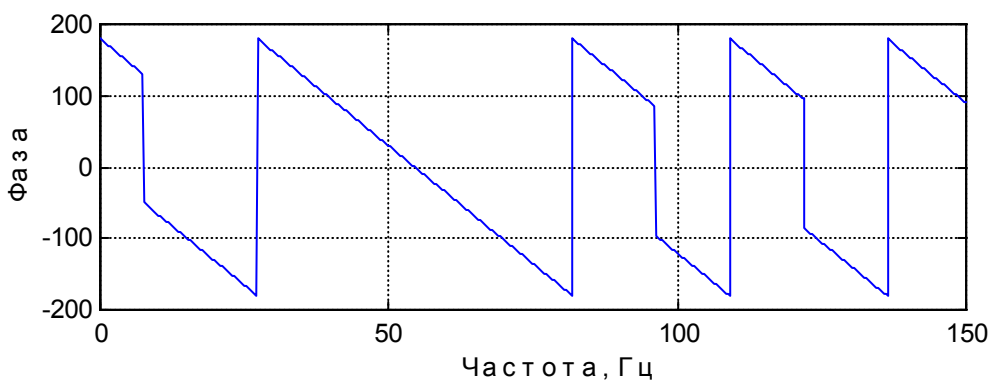
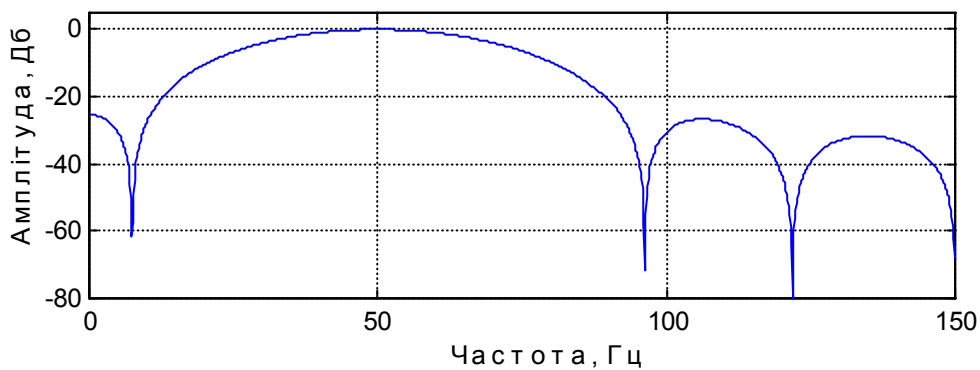


Рис. 1

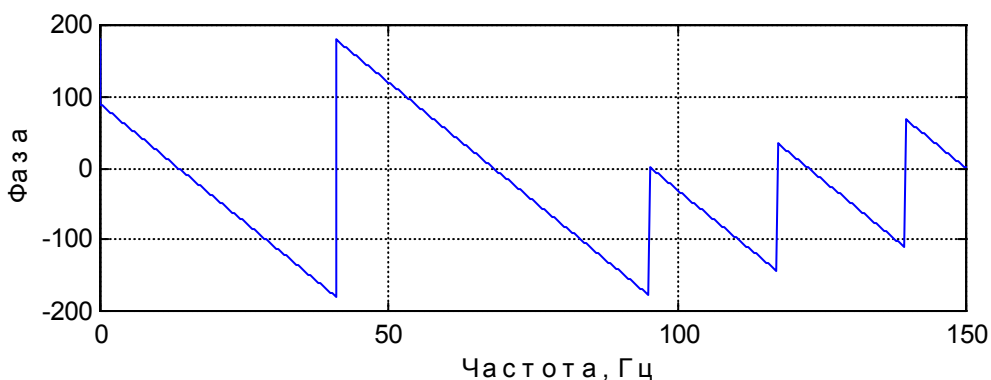
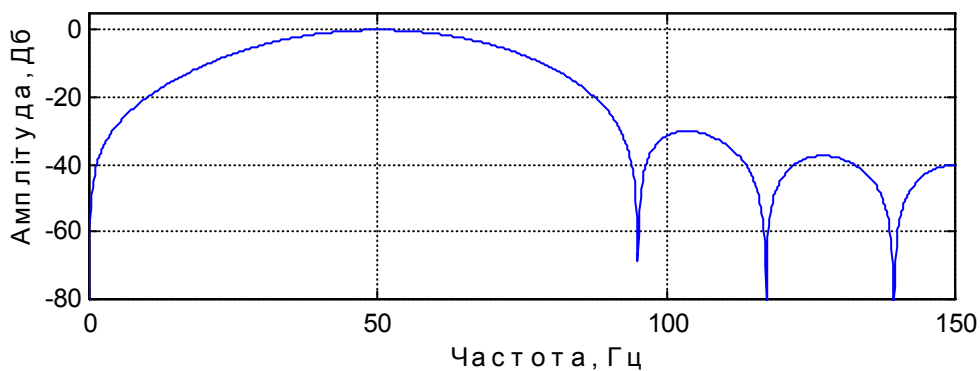


Рис. 2

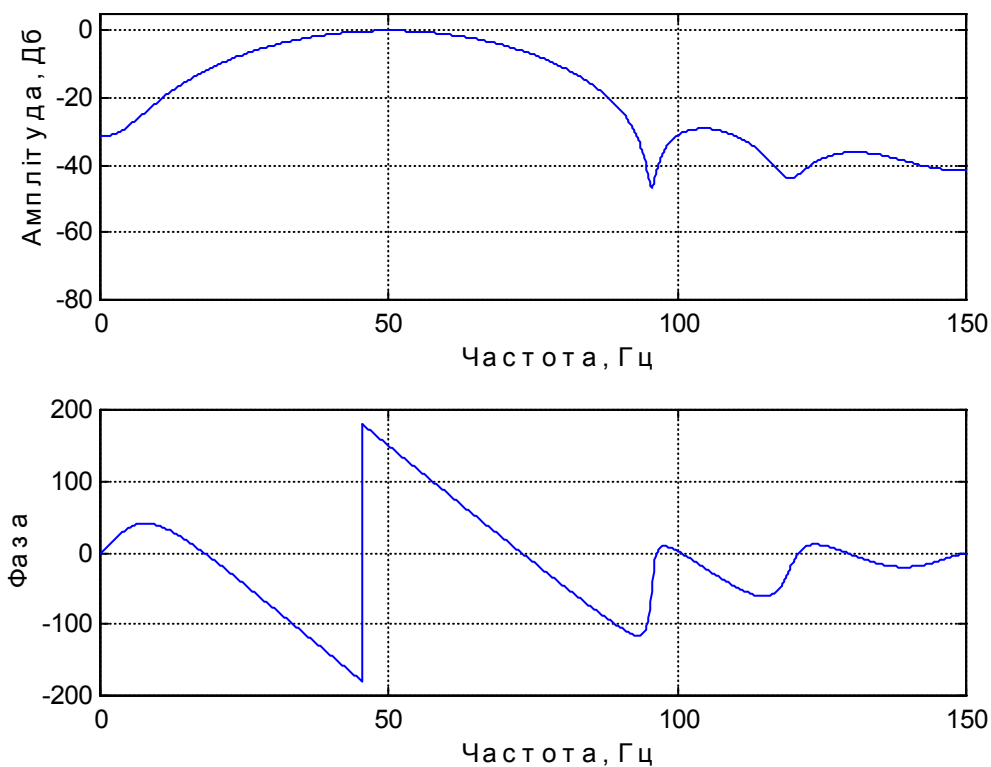


Рис. 3

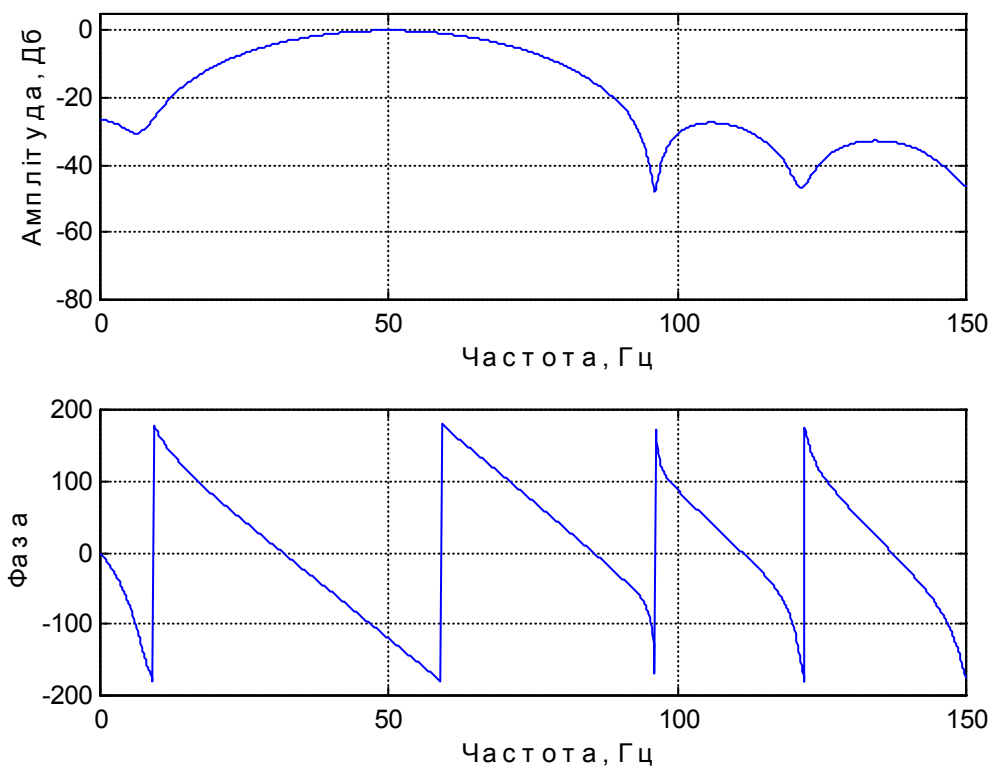


Рис. 4

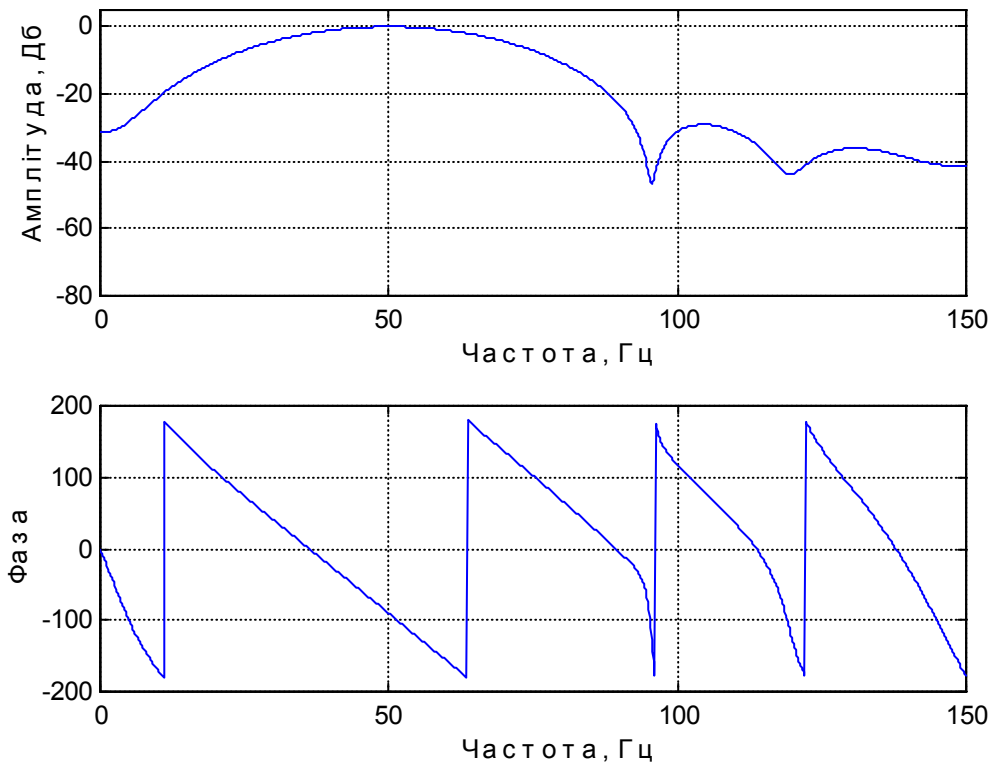


Рис. 5

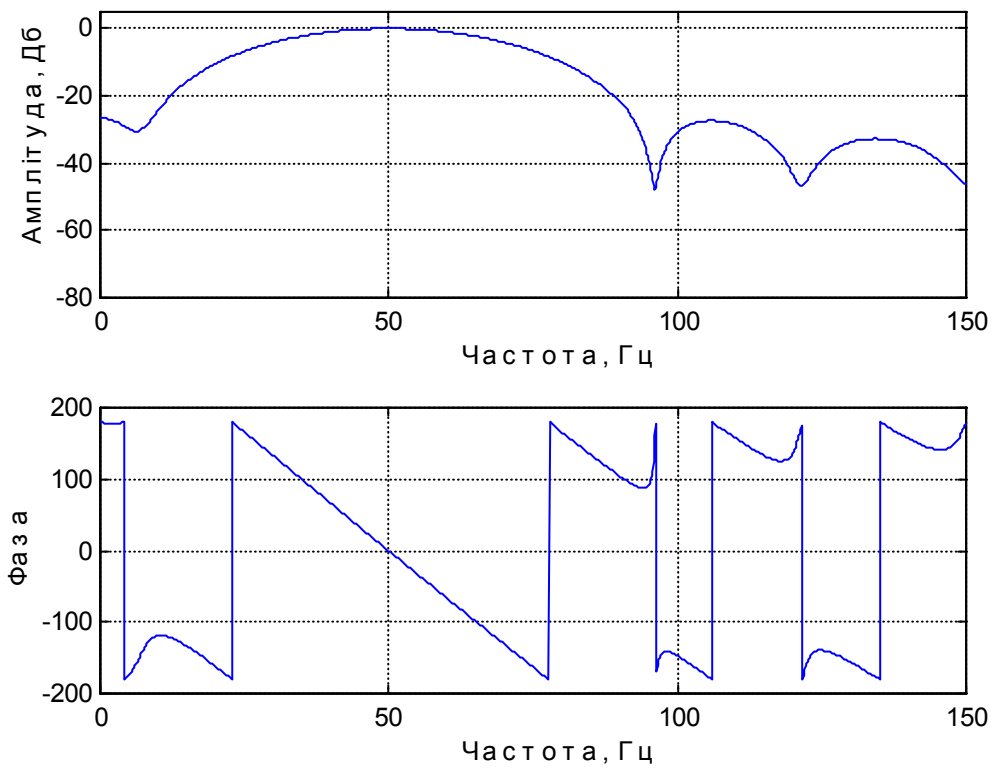


Рис. 6

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шидловский А.К., Музыченко А.Д. Таблицы симметричных составляющих. – К.: Науко-ва думка, 1976. – 204 с.
2. Горлач А.А., Минц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. – К.: Техніка, 1985. – 151 с., ил. – Библиогр.: с. 147–149.
3. Автоматизация электроэнергетических систем: Учебное пособие для вузов /О.П. Алек-сеев, В.А. Козис, В.В. Кривенко и др. Под ред. В.П. Морозкина и Д.Энгелаге. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 448 с.: ил.
4. Петросян Р.В. Застосування нерекурсивних цифрових фільтрів для виміру несиметрії у трифазних мережах електроенергії // Вісник ЖІТІ. – 1999. – № 11. – С. 164–168.
5. Задирака В.К., Мельникова С.С. Цифровая обработка сигналов. – К.: Наукова думка, 1993. – 294 с.
6. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 248 с.: ил.
7. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Трахтмана. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с.: ил.
8. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: Справочник. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
9. Петросян Р.В. Застосування нерекурсивних цифрових фільтрів з лінійною фазою для виміру несиметрії у трифазних мережах електроенергії // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 14. – С. 204–205.

ПЕТРОСЯН Руслан Валерійович – асистент кафедри автоматики і управління в технічних системах Житомирського інженерно-технологічного інституту.

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 15.10.2002

Петросян Р.В. Измерение квадратурных составляющих напряжений с использованием цифровых фильтров для оценки симметричных составляющих.

Предлагается цифровой метод измерения квадратурных составляющих напряжения на базе цифровых фильтров, что позволяет построить измеритель качества электрической энергии в 3х фазной сети (коэффициенты несимметрии) с использованием современной элементной базы.

Petrosyan R.V. Measurement of quadrature components of voltages with usage of digital filters for an estimation of symmetric components.

The digital method of measurement of quadrature components of a voltage is offered on the basis of digital filters, that allows to construct a measuring set of quality of electric power in three-phase of a phase network (coefficients of an insymmetry) with usage of modern element base.