

УДК 004.02

DOI: 10.18372/2073-4751.78.18963

Петросян Р.В.,
orcid.org/0000-0002-0388-8821,
e-mail: e_rvs@ukr.net

АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕННЯ ЧАСТОТИ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ КВАДРАТУРНИХ СКЛАДОВИХ

Державний університет "Житомирська політехніка"

Вступ

Частота напруги електромережі є одним із найважливіших показників якості електроенергії, тому її контроль і вимірювання має важливе значення, оскільки це дає змогу забезпечити надійність і стабільність роботи енергетичних об'єктів: гідро-генераторів і турбогенераторів, силових підстанцій, ліній електропередач загального призначення, систем автоматики, а також іншої низки електромеханічних систем.

Тривала робота обладнання при значному відхиленні частоти напруги від номінального значення призводить до його підвищеного зносу та передчасного виходу з ладу. Також невідповідність частоти номінальному значенню може бути причиною до виникнення додаткових похибок під час вимірювання інших параметрів енергетичних об'єктів. У зв'язку з цим вимірювання та контроль частоти напруги електромережі є актуальним завданням, що підтверджується безліччю публікацій, присвячених удосконаленню методів і засобів вимірювання частоти електромережі [1-7]. Особливо цьому сприяє розвиток цифрових методів і комп'ютеризованих систем, що в свою чергу призводить до підвищення якості та стабільності електропостачання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор

Забезпечення належної якості електричної енергії у системах електропостачання загального призначення визначаються стандартами [8, 9]. В них визначено основні терміни, показники якості електричної енергії та їхні значення. Один з таких параметрів – це відхилення частоти основної гармоніки напруги в електричній

мережі. Для її обчислення, необхідно визначити поточне значення частоти.

Як вже згадувалося, у науковій літературі є велика кількість різних алгоритмів визначення частоти змінної напруги. Усі алгоритми можна умовно поділити на два види: алгоритми обчислення частоти в частотній області, алгоритми обчислення частоти в часовій області.

До першого виду можна віднести алгоритми, які базуються на дискретному перетворенні Фур'є або його модифікаціях [3, 4]. До переваг даного виду алгоритмів можна віднести: відносно невелику кількість відліків, простоту обчислень, а також їх умовно можна віднести до швидких алгоритмів. До недоліків цього виду алгоритмів можна віднести ефект «розтікання спектра», який частково можна зменшити з використанням віконних функцій.

До другого виду можна віднести алгоритми, засновані на лінійному передбаченні вибірок напруги [7] та вимірюванні частоти, з використанням виявлення нульових переходів напруги [4, 5]. Основна їхня перевага – висока швидкодія. До недоліків даних алгоритмів можна віднести: чутливість до завад, низька точність через вплив гармонійних складових. Зменшити вплив даних факторів можна за допомогою попередньої фільтрації [4, 5, 7]. Також до другого виду належить алгоритм, що базується на цифровій фільтрації [6]. Перевагою цього алгоритму є: висока швидкодія; низька чутливість до завад. Недоліком даного алгоритму є низька точність в околиці точки нульового переходу.

Мета статті

Метою роботи є розробка алгоритму обчислення частоти напруги в електромережі для підвищення точності за рахунок

виділення квадратурних складових з використанням цифрових фільтрів. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі завдання:

- провести аналіз цифрових фільтрів;
- запропонувати типи фільтрів для отримання квадратурних складових;
- синтезувати цифрові фільтри;
- зробити висновки з отриманих результатів.

Основна частина

Перераховані раніше недоліки усуваються у розробленому новому алгоритмі обчислення частоти напруги в електромережі. По суті, цей алгоритм є вдосконалим варіантом методу запропонованого в роботі [6].

Алгоритми, які проводять обчислення в часовій області, використовують додатково фільтрацію сигналу для усунення залежності від завад і гармонійних складових. У роботі [6] операції фільтрації та обчислення частоти суміщені в цифрових фільтрах. Принцип дії вказаного методу має наступний вигляд (рис. 1).

ДФ та ФЗ реалізуються на базі цифрових фільтрів (ЦФ) з кінцевою імпульсною характеристикою (КИХ). Особливістю сигналу, що використовується у методі, є його форма, яка близька до гармонійної моделі (1). Це означає, що сигнал має періодичний характер і може бути описаний за допомогою синусоїдальних функцій. Гармонійна модель сигналів значно спрощує їх аналіз та обробку.

$$u(n) = U_m \sin(\omega \cdot n \cdot \Delta t + \varphi), \quad (1)$$

де U_m – амплітуда сигналу; n – номер відліку; ω – циклічна частота сигналу; Δt – крок дискретизації; φ – початкова фаза.

Використовуючи диференціатор, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) якого показана на рис. 2, можна отримати значення частоти (амплітуда вихідного сигналу залежить від частоти).

Використання широкосмугового диференціатора призводить до збільшення рівня завад, тому диференціатор повинен бути вузькосмуговим. Смуга пропускання

залежить від розв'язуваної задачі і знаходиться в околиці частоти 50 Гц (рис. 3).

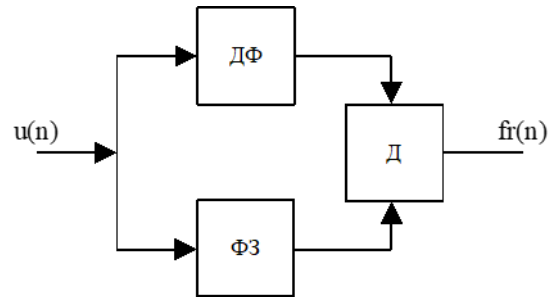


Рис. 1. Структурна схема обчислення частоти напруги: ДФ – диференціатор, ФЗ – фазозсувач, Д – дільник

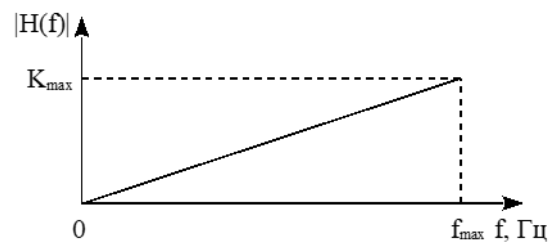


Рис. 2. АЧХ широкосмугового диференціатора

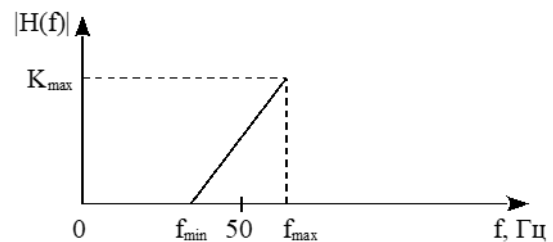


Рис. 3. АЧХ вузькосмугового диференціатора

ФЗ призначений для виконання двох функцій: синхронізації фази сигналу з сигналом на виході диференціатора; нормування сигналу на виході (рис. 1). Його АЧХ відповідає смуговому фільтру. Абсолютне значення частоти після цифрової обробки можна отримати за виразом (2):

$$f_a(n) = \left(\frac{(f_{max} - f_{min}) f_r(n)}{K_{max}} + f_{min} \right) \quad (2)$$

Значення K_{max} доцільно обрати з множини $\{1; f_{max} - f_{min}\}$.

Основна проблема в алгоритмі – це невизначеність, яка виникає в околиці точки нульового переходу сигналу, що призводить до підвищеної похибки в даній околиці. Даний інтервал невеликий, тому

один із варіантів вирішення проблеми – пропускати обчислення, якщо такий підхід припустимий при використанні даного методу. Інший підхід полягає у тому, щоб виділяти квадратурні складові сигналу. Реалізувати їх виділення можна з використанням КІХ-фільтра. Варіант удосконаленого методу показано на рис. 4.

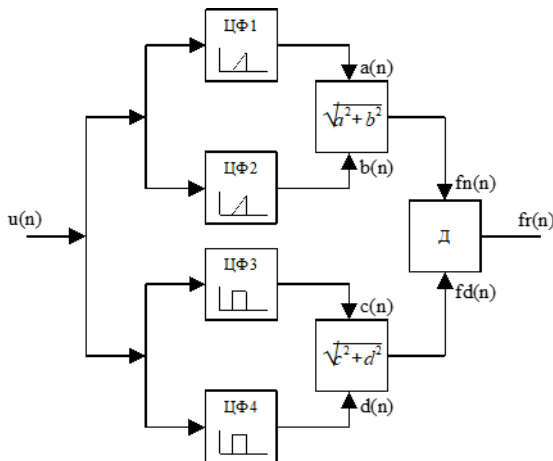


Рис. 4. Структурна схема удосконаленого методу обчислення частоти напруги

ЦФ1 і ЦФ2 мають АЧХ диференціатора, проте відрізняються фазо-частотною характеристикою на $\pi/2$, що при проходженні сигналу через дані фільтри дозволяє отримати його квадратурні складові.

ЦФ3 та ЦФ4 виконують функції аналогічні Ф3 (рис. 1), та їхня АЧХ відповідає смуговому фільтру, проте відрізняються фазо-частотною характеристикою на $\pi/2$.

Щоб реалізувати алгоритм, необхідно синтезувати всі чотири КІХ-фільтри. У загальному випадку КІХ-фільтр описується таким виразом (3):

$$y(n) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot x(n - k). \quad (3)$$

де, $h(k)$ – імпульсна характеристика КІХ-фільтра; $x(n), y(n)$ – вхідний та вихідний сигнал; K – кількість коефіцієнтів фільтра $h(k)$.

АЧХ даного фільтра матиме такий вигляд (4):

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot e^{-j\omega n}. \quad (4)$$

Для того, щоб КІХ-фільтри були з лінійною фазою, необхідно, щоб імпульсна характеристика була симетричною або

антисиметричною [10]. В даному випадку можливі чотири типи КІХ-фільтрів.

Перший тип фільтра має непарну кількість коефіцієнтів, симетричну імпульсну характеристику та АЧХ описується виразом:

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{(K-1)/2} a(k) \cdot \cos(\omega k), \quad (5)$$

де $a(0) = h\left(\frac{K-1}{2}\right)$, $a(k) = 2h\left(\frac{K-1}{2} - k\right)$ для $k = 1, 2, 3, \dots, \frac{K-1}{2}$.

Другий тип фільтра має парну кількість коефіцієнтів, симетричну імпульсну характеристику та АЧХ описується виразом:

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^{K/2} b(k) \cdot \cos(\omega(k - 1/2)), \quad (6)$$

де $b(k) = 2h\left(\frac{K}{2} - k\right)$ для $k = 1, 2, 3, \dots, \frac{K}{2}$.

Третій тип фільтра має непарну кількість коефіцієнтів, антисиметричну імпульсну характеристику та АЧХ описується виразом:

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^{(K-1)/2} c(k) \cdot \sin(\omega k), \quad (7)$$

де $c(0) = 0$, $c(k) = 2h\left(\frac{K-1}{2} - k\right)$ для $k = 1, 2, 3, \dots, \frac{K-1}{2}$.

Четвертий тип фільтра має парну кількість коефіцієнтів, антисиметричну імпульсну характеристику та АЧХ описується виразом:

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^{K/2} d(k) \cdot \sin(\omega(k - 1/2)), \quad (8)$$

де $d(k) = 2h\left(\frac{K}{2} - k\right)$ для $k = 1, 2, 3, \dots, \frac{K}{2}$.

Третій та четвертий типи фільтрів мають антисиметричну імпульсну характеристику, тому забезпечують зсув фази на $\pi/2$. Їх рекомендується використовувати, наприклад, для реалізації диференціаторів. Виходячи з вище сказаного, слідує, що ЦФ1 має бути реалізований з використанням третього або четвертого типу КІХ-фільтра, а отже, аналогічного типу має бути ЦФ3. Щоб отримати квадратурні складові, необхідно для ЦФ2 та ЦФ4 використовувати фільтри першого або другого типу, причому, якщо ЦФ1 та ЦФ2 реалізуються з використанням фільтра третього

типу, то ЦФ2 та ЦФ4 реалізуються з використанням фільтра першого типу.

Для синтезу ЦФ (3) будемо використовувати метод найменших квадратів (МНК), який мінімізуватиме відхилення АЧХ проєктованого фільтра від прототипу відповідно до виразу (9):

$$e = \sqrt{\int W(\omega)(H(\omega) - \hat{H}(\omega))^2 d\omega}, \quad (9)$$

де $H(\omega)$, $\hat{H}(\omega)$ – АЧХ фільтрів, що проєктується та його прототипу відповідно.

Синтез ЦФ проводився за допомогою мови програмування *Python* та додаткових пакетів: *numpy*, *matplotlib* тощо. Для розрахунку коефіцієнтів ЦФ необхідно задати вхідні параметри. Основний параметр для поставленого завдання – це діапазон відхилення частоти напруги електромережі. Відповідно до стандарту ДСТУ EN 50160:2023 [8] значення відповідає діапазону 42.5-57.5 Гц, а отже даний параметр буде вказувати смугу пропускання ЦФ1, ЦФ2, ЦФ3, ЦФ4. У зв'язку з тим, що на краю смуги пропускання фільтрів похибка різко збільшується, діапазон смуги пропускання фільтрів трохи розширено і відповідає значенню 40-60 Гц. Порядок фільтра (кількість коефіцієнтів) впливає на точність апроксимації фільтра, що проєктується. У нашому випадку кількість коефіцієнтів обрано 21 (порядок – 20), а максимальний коефіцієнт передачі фільтрів буде $K_{max} = 1$. Результати синтезу ЦФ показано на рис. 5-8. Похибка даних фільтрів у смузі відхилення вхідного сигналу показана на рис. 9-12.

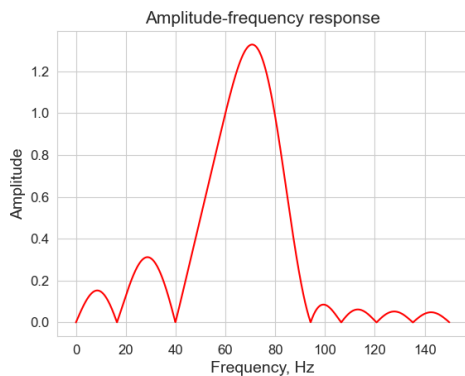


Рис. 5. Амплітудно-частотна характеристика ЦФ1

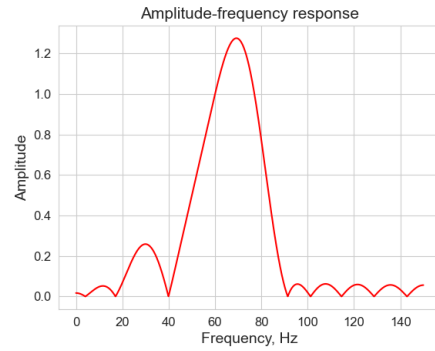


Рис. 6. Амплітудно-частотна характеристика ЦФ2

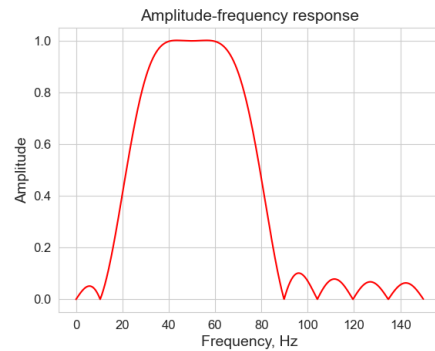


Рис. 7. Амплітудно-частотна характеристика ЦФ3

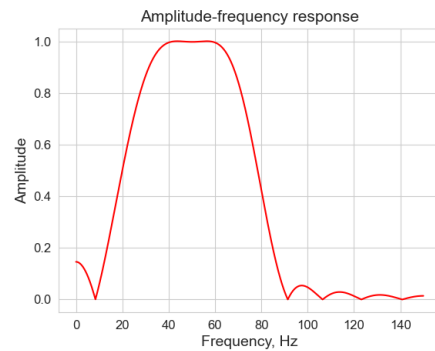


Рис. 8. Амплітудно-частотна характеристика ЦФ4

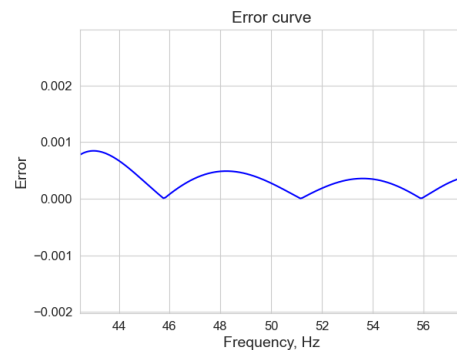


Рис. 9. Модуль відхилення амплітудно-частотної характеристики ЦФ1 від прототипу

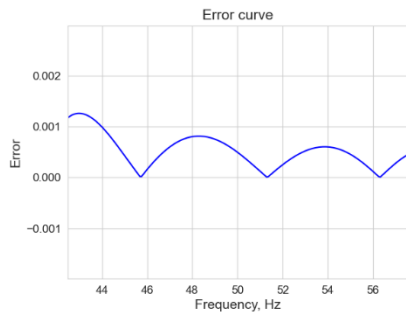


Рис. 10. Модуль відхилення амплітудно-частотної характеристики ЦФ2 від прототипу

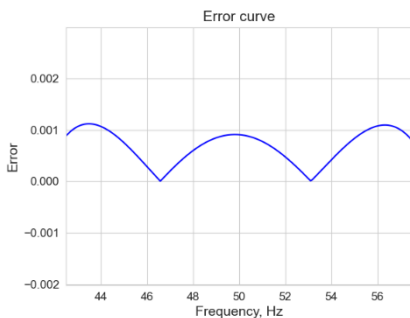


Рис. 11. Модуль відхилення амплітудно-частотної характеристики ЦФ3 від прототипу

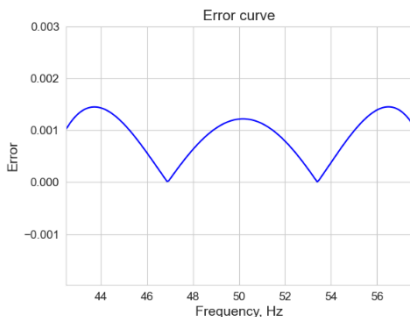


Рис. 12. Модуль відхилення амплітудно-частотної характеристики ЦФ4 від прототипу

Коефіцієнти синтезованих ЦФ представлені у табл. 1-4.

Таблиця 1. Коефіцієнти ЦФ1

Коефіцієнти	Значення
$h(0), -h(20)$	-0.005899641131215779
$h(1), -h(19)$	0.04721174199566604
$h(2), -h(18)$	0.013036019855851583
$h(3), -h(17)$	-0.015236953120172212
$h(4), -h(16)$	0.081932471496852
$h(5), -h(15)$	0.10749208952493226
$h(6), -h(14)$	-0.10456580458764544
$h(7), -h(13)$	-0.21462201251236238
$h(8), -h(12)$	0.04525985076040471
$h(9), -h(11)$	0.24280084666949164
$h(10)$	0

Таблиця 2. Коефіцієнти ЦФ2

Коефіцієнти	Значення
$h(0), h(20)$	-0.0405885234696352
$h(1), h(19)$	0.005377058049048299
$h(2), h(18)$	0.015888192599879898
$h(3), h(17)$	-0.0479921275067895
$h(4), h(16)$	-0.0365210204634607
$h(5), h(15)$	0.11698264776090017
$h(6), h(14)$	0.14503453044622516
$h(7), h(13)$	-0.0888508042743061
$h(8), h(12)$	-0.21271730367224892
$h(9), h(11)$	0.024241246773026234
$h(10)$	0.22097634581193223

Таблиця 3. Коефіцієнти ЦФ3

Коефіцієнти	Значення
$h(0), -h(20)$	-0.015355291457327992
$h(1), -h(19)$	0.01376139747888994
$h(2), -h(18)$	-0.03818239990185278
$h(3), -h(17)$	-0.04911103880577776
$h(4), -h(16)$	0.0013069209399312047
$h(5), -h(15)$	-0.014895141650517588
$h(6), -h(14)$	-0.08810570654754074
$h(7), -h(13)$	-0.004289355719757813
$h(8), -h(12)$	0.2436582650819525
$h(9), -h(11)$	0.3021068865763987
$h(10)$	0

Таблиця 4. Коефіцієнти ЦФ4

Коефіцієнти	Значення
$h(0), h(20)$	-0.0030836630997939014
$h(1), h(19)$	0.004362954515542184
$h(2), h(18)$	0.013239527033445015
$h(3), h(17)$	-0.032830485347529664
$h(4), h(16)$	-0.03967478809778292
$h(5), h(15)$	0.0031639130321169475
$h(6), h(14)$	-0.05239167725580754
$h(7), h(13)$	-0.19206398225330373
$h(8), h(12)$	-0.13833843125663645
$h(9), h(11)$	0.17728595514942164
$h(10)$	0.37453567845679225

Відповідно до вимог АЧХ ЦФ1 та ЦФ2 однакові:

$$|H_1(\omega)| = |H_2(\omega)| = K_1(f) \quad (10)$$

Це також стосується АЧХ ЦФ3 та ЦФ4:

$$|H_3(\omega)| = |H_4(\omega)| = K_3(f) \quad (11)$$

Тому можна записати, що значення на виході цифрового блоку обробки буде відповідати виразу (12):

$$f_r(n) = \frac{K_1(f)}{K_3(f)} \quad (12)$$

Абсолютне значення частоти буде розраховуватися за виразом (2).

Розрахуємо максимальну методичну похибку розробленого методу. Значення частоти з похибкою у відповідності до виразів (2) та (12) буде:

$$f_a(n) + \Delta f_a = \left(\frac{(f_{max} - f_{min})(K_1(f) + \Delta K_1)}{K_{max}(K_3(f) + \Delta K_3)} + f_{min} \right) \quad (13)$$

де $\Delta K_1 = \max\{|\Delta|H_1(\omega)|, |\Delta|H_2(\omega)|\}$, $\Delta K_3 = \max\{|\Delta|H_3(\omega)|, |\Delta|H_4(\omega)|\}$.

Виконуючи прості перетворення та враховуючи вхідні дані, отримаємо вираз для максимальної методичної похибки.

$$\Delta f_a = 20(\Delta K_1 + \Delta K_3) \quad (14)$$

Відповідно похибкам АЧХ фільтрів на рис. 9-12 методична похибка обчислення частоти буде складати не більше $\Delta f_a \approx 0.05$ Гц.

Результати перевірки методу при моделюванні підтверджують, що в інтервалі частот 42.5-57.5 Гц похибка не перевищує розраховане значення і складає 0.03 Гц (рис. 13).

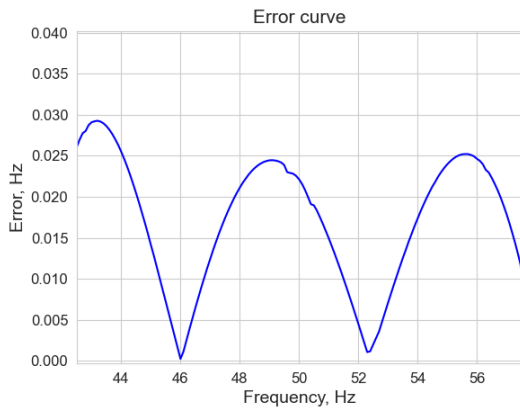


Рис. 13. Методична похибка обчислення частоти напруги

Після того, як зроблені всі попередні розрахунки запишемо алгоритм обчислення частоти напруги в електричній мережі, використовуючи словесну форму:

1. Ініціалізувати:

Вектор-рядок вхідних відліків сигналу: $\bar{U}(n) = [u(n), u(n-1), \dots, u(n-K+1)]$. На початку ініціалізується нульовими значеннями.

Вектор-рядок коефіцієнтів ЦФ1 розрахованих в табл. 1:

$$\bar{H}_1(n) = [h_1(0), h_1(1), \dots, h_1(K-1)].$$

Вектор-рядок коефіцієнтів ЦФ2 розрахованих в табл. 2:

$$\bar{H}_2(n) = [h_2(0), h_2(1), \dots, h_2(K-1)].$$

Вектор-рядок коефіцієнтів ЦФ3 розрахованих в табл. 3:

$$\bar{H}_3(n) = [h_3(0), h_3(1), \dots, h_3(K-1)].$$

Вектор-рядок коефіцієнтів ЦФ4 розрахованих в табл. 4:

$$\bar{H}_4(n) = [h_4(0), h_4(1), \dots, h_4(K-1)].$$

$\bar{U}(n), \bar{H}_1(n), \bar{H}_2(n), \bar{H}_3(n), \bar{H}_4(n) \in \mathbb{R}^K$, K – кількість коефіцієнтів ЦФ, f_{min} – мінімальне значення частоти, f_{max} – максимальне значення частоти, K_{max} – коефіцієнт передачі ЦФ.

2. Отримати наступний відлік сигналу і сформувати вектор-рядок $\bar{U}(n)$.

3. Отримати результати фільтрації ЦФ1:

$$a(n) = \bar{H}_1(n) \cdot \bar{U}^T(n).$$

4. Отримати результати фільтрації ЦФ2:

$$b(n) = \bar{H}_2(n) \cdot \bar{U}^T(n).$$

5. Отримати результати фільтрації ЦФ3:

$$c(n) = \bar{H}_3(n) \cdot \bar{U}^T(n).$$

6. Отримати результати фільтрації ЦФ4:

$$d(n) = \bar{H}_4(n) \cdot \bar{U}^T(n).$$

7. Обчислити амплітуди сигналів, використовуючи квадратурні складові:

$$fn(n) = \sqrt{a(n)^2 + b(n)^2},$$

$$fd(n) = \sqrt{c(n)^2 + d(n)^2}$$

8. Обчислити відносне значення частоти:

$$fr(n) = \frac{fn(n)}{fd(n)}$$

9. Обчислити абсолютне значення частоти електричної мережі:

$$f_a(n) = \left(\frac{(f_{max} - f_{min})f_r(n)}{K_{max}} + f_{min} \right).$$

10. Видати отриманий результат та завершити.

Для побудови комп'ютеризованих систем з каналом вимірювання частоти напруги електричної мережі, необхідний датчик напруги змінного струму. В якості такого датчика може бути використано ZMPT101B, який представлений на рис. 14.

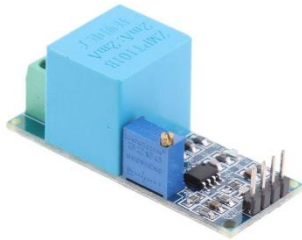


Рис. 14. Датчик напруги змінного струму ZMPT101B

Також у комп'ютеризованій системі повинен бути присутній антиалайзинговий фільтр, тому що у складі датчика він відсутній. Хоча за допомогою ЦФ можна відфільтрувати завади та гармонічні складові, однак цього може бути недостатньо, враховуючі особливості фільтрів.

Висновки

У роботі розглянуто алгоритм обчислення частоти напруги в електромережі з використанням квадратурних складових. Для виділення квадратурних складових було запропоновано використати цифрові фільтри з лінійною фазою. Існує чотири типи таких фільтрів. В результаті аналізу показано, що необхідно використовувати спільно фільтри 2х типів: першого та третього типу або другого та четвертого типу в залежності від порядку цифрових фільтрів.

Для оптимізації коефіцієнтів фільтру обрано метод найменших квадратів. Результати розрахунку коефіцієнтів фільтрів показали, що запропонований алгоритм дозволяє отримати високу точність обчислення частоти напруги при відносно невеликому порядку фільтрів. Так при 20 порядку цифрових фільтрів методологічна

похибка не перевищила 0.03 Гц у смузі 42.5-57.5 Гц.

Перспективи подальших досліджень полягають у можливості мінімізації порядку фільтра, а також у вивченні питання накладання додаткових умов при синтезі цифрових фільтрів для зниження гармонійних складових (хоча у більшості випадків достатньо використання антиалайзингового фільтру).

Література

1. Тимохін О. В., Канабас Д. С. Методи визначення частоти синусоїдального сигналу електричної мережі. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"*. 2020. С. 11–15.
2. Литвиненко В. М., Дощенко Г. Г., Самойлов М. О. Аналіз методів вимірювання частоти. *Біомедична інженерія та електроніка*. 2017. №. 1(15). С. 63–83.
3. Xing J., Mu L. A fast and precise power system frequency estimation method without iterations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. V. 123. 106199. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106199.
4. Djurišić Ž. R., Djurić M. B., Papić V. D. An algorithm for three-phase power system frequency measurement. *Electrical Engineering*. 2024. P. 1–12. DOI: 10.1007/s00202-024-02238-6.
5. Xiao D., Tan W., Zhang W. A practical method of real-time measurement for power system frequency. *Power System Protection and Control*. 2014. Vol. 42. P. 21–29.
6. Петросян Р. В. Вимірювач частоти електричної мережі на базі цифрових фільтрів. *Вісник ЖІТІ*. 2002. №3(22). С. 78–80.
7. Micheletti R. Real-time measurement of power system frequency. *XVI IMEKO World Congress : proceedings, Vienna, Austria, 25–28 September, 2000 / IMEKO*. 2000. 6 p.
8. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). БУДСТАНДАРТ Online – нормативні документи

будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226 (дата звернення: 24.07.2024).

9. ГОСТ 13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. БУДСТАНДАРТ Online

– нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837 (дата звернення: 24.07.2024).

10. Manolakis D.G., Proakis J.G. Digital signal processing. London : Pearson, 2014. 1014 p.

Петросян Р.В.

АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕННЯ ЧАСТОТИ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ КВАДРАТУРНИХ СКЛАДОВИХ

У науковій статті вирішувалась важлива науково-технічна проблема – зниження похибки обчислення частоти напруги в електромережі. Обчислення значення частоти напруги має важливе значення, оскільки це дає змогу забезпечити надійність і стабільність роботи енергетичних об'єктів. Тривала робота обладнання при значному відхиленні частоти напруги від номінального значення призводить до його підвищеного зносу та передчасного виходу з ладу. Також невідповідність частоти номінальному значенню може бути причиною до виникнення додаткових похибок під час вимірювання інших параметрів енергетичних об'єктів.

В основу методу покладено обчислення частоти напруги в електромережі з використанням квадратурних складових. В ході роботи було запропоновано структурну схему обчислення частоти напруги з використанням цифрових фільтрів. Також було виконано синтез цифрових фільтрів. Для перевірки отриманих результатів проведено моделювання на комп'ютері з використанням мови програмування Python. Запропоновано алгоритм обчислення частоти напруги в електромережі.

Ключові слова: алгоритм обчислення частоти напруги; похибка частоти напруги; квадратурні складові; цифрові фільтри; метод найменших квадратів.

Petrosian R.V.

ALGORITHM FOR CALCULATING THE POWER SYSTEM VOLTAGE FREQUENCY USING QUADRATURE COMPONENTS

The scientific article solves an important scientific and technical problem – minimizing the error in calculating the power system voltage frequency. The calculation of the voltage frequency is important because it helps to ensure the reliability and stability of power facilities. Long-term operation of equipment with a significant deviation of the voltage frequency from the nominal value leads to increased wear and premature failure. In addition, a mismatch between the frequency and the nominal value can lead to additional errors when measuring other parameters of power facilities.

The algorithm is based on calculating the power system voltage frequency using quadrature components. In the course of the work, a structural scheme for calculating the voltage frequency using digital filters was proposed. The synthesis of digital filters was also performed. To verify the results obtained, a computer simulation was performed using the Python programming language. An algorithm for calculating the voltage frequency in the power grid is proposed.

Keywords: algorithm for calculating the voltage frequency; voltage frequency error; quadrature components; digital filters; least squares method.