

**Петросян Р.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Колос К.Р.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРА СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДНИКІВ НА БАЗІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Трифазна система передачі електроенергії набула великого поширення. Однак система добре функціонує лише тоді, коли вона симетрична. Однією з головних причин порушення симетричності є застосування таких навантажень, симетричне виконання і режими роботи яких неможливе або недоцільне за конструктивним, технологічним або економічним міркуванням. Тому важливе значення має контроль якості електроенергії. Існує досить велика кількість показників якості електроенергії, але в цій статті розглядаються такі показники, як: коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю; коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю.

Впровадження сучасної елементної бази вносить корективи до всіх сфер науки і техніки (в тому числі й до енергетики). В основу методу симетричних складників покладено цифровий фільтр. Як фільтруючий пристрій запропоновано використати КІХ-фільтр з лінійною фазою (I та II типу). Це дозволило досить точно апроксимувати три вектори повороту.

Для оптимізації коефіцієнтів фільтру використано генетичний алгоритм. Генетичний алгоритм – евристичний алгоритм, що є різновидом еволюційних алгоритмів, за допомогою яких вирішуються оптимізаційні задачі з використанням методів природної еволюції, аналогічних природному відбору у природі. Цей алгоритм дозволяє виконувати багатокритеріальну оптимізацію, яка використана під час синтезу фільтрів (необхідно було мінімізувати як амплітудно-частотну характеристику, так і фазо-частотну). Як фітнес-функцію використано чебишевську норму. Моделювання було проведено з використанням мови програмування Python. Результати показали, що отримано досить непогані показники.

Перспективи подальших досліджень полягають у тестуванні запропонованого методу на більш широкому спектрі задач, пошуку інших методів оптимізації, дослідженні ефектів кінцевої розрядності, аналізі структури цифрового фільтру симетричних складників.

**Ключові слова:** фільтр симетричних складників, цифровий фільтр, генетичний алгоритм, чебишевська норма.

**Постановка проблеми.** У кінці минулого століття була запропонована трифазна система передачі електроенергії, яка набула великого поширення. Однак система добре функціонує лише тоді, коли вона симетрична. Однією з головних причин порушення симетричності є застосування таких навантажень, симетричне виконання і режими роботи яких неможливі або недоцільні за конструктивним, технологічним або економічним міркуванням. Тому важливе значення має контроль якості електроенергії.

В останні роки значення обчислювальної техніки в житті сучасного суспільства різко збільшилося, тому більшість методів адаптують, використовуючи цифрові методи обробки. Цифрова обробка використовується в багатьох сферах техніки: системах управління технологічними процесами, медичному діагностичному обладнанні,

засобах зв'язку, вимірювальних і діагностичних засобах енергетики тощо [1, 2].

Аналіз показників якості електроенергії здійснюється під час обліку споживаної електроенергії [3], під час регулювання несиметричних режимів у системах електропостачання [4], в релейному захисті енергетичних систем [5] тощо. Безперервне збільшення попиту на енергоресурси і зростання цін на них зобов'язує до підвищеного контролю за їхніми витратами та якістю [6, 7]. Також в Україні взято курс на діджиталізацію, в тому числі і в енергетиці [8], тому розроблення цифрового фільтру симетричних складників є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для аналізу несиметричності трифазної системи використовується метод симетричних складників [9, 10]. Цей метод заснований на уявленні

асиметричної трифазної системи у вигляді суми трьох симетричних систем.

Несиметрія напруги характеризується такими показниками, як:

– коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю;

– коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю.

Відповідно до державного стандарту [11] ці коефіцієнти визначаються за такими виразами (1) та (2):

$$k_2 = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$k_0 = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $U_{1(1)}$ ,  $U_{2(1)}$ ,  $U_{0(1)}$  – діючі значення напруги прямої (НПП), зворотної (НЗП) та нульової послідовності (ННП) основної частоти; допускається вважати  $U_{1(1)} = U_n$ .

Спочатку в перших пристроях контролю показників якості електроенергії найбільше поширення знайшли фільтри симетричних складників (ФСС), які побудовані на базі аналогових дискретних елементів [12, 13]. Вплив на результати вимірювань настроювання ФСС, зміна параметрів його елементів при старінні та зміні температури навколишнього середовища, зміна загального рівня напруги, а також вплив вищих гармонік та відхилення частоти напруги електричної мережі від номінального значення вимагало вдосконалення методів вимірювання симетричних складників. Для підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання вводилися різні коригувальні та компенсуючі кола [12], що призводило до суттєвого ускладнення реалізації приладів цього класу.

Також було розроблено безліч цифрових методів вимірювання симетричних складників. Серед них можна виділити такі групи методів:

- 1) встановлений державним стандартом;
- 2) на базі цифрової обробки;
- 3) заміна вектора повороту часовою затримкою;
- 4) змішаний.

Розглянемо деякі цифрові методи більш докладно по групах. У [11] запропоновано НЗП розраховувати за формулою (3):

$$U_{2(1)} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3}U_{BA(1)} - \sqrt{4U_{CB(1)}^2 - \left( \frac{U_{CB(1)}^2 - U_{AC(1)}^2}{U_{BA(1)}} + U_{BA(1)} \right)^2} \right)^2 + 1 \right]}, \quad (3)$$

де  $U_{BA(1)}$ ,  $U_{CB(1)}$ ,  $U_{AC(1)}$  – лінійні напруги основної частоти.

Подібні вирази мають НПП та ННП. Для розрахунку (3) необхідно спочатку розрахувати лінійні напруги, використовуючи швидке

перетворення Фур'є. Досить громіздке рішення задачі, особливо якщо необхідно обчислити тільки несиметрію в трифазній мережі.

Досить цікавий підхід [14] запропонований для обчислення НВП, НЗП, ННП. Суть методу полягає в попередньому обчисленні квадратурних складників. По суті цей метод відноситься до кореляційного методу з його перевагами та недоліками, що впливають звідси.

У роботі [15] запропонований метод на базі цифрових фільтрів (рис. 1, рис. 2, рис. 3). Суть полягає в тому, що вони використовуються як оператори повороту. Такий підхід дозволяє підвищити швидкодію вимірювань, що позитивно позначиться в аварійних режимах.

У [13] запропоновано метод, в якому вектор повороту реалізований з використанням програмних затримок (затримка на третину і дві третини періоду). Такий підхід дуже простий в реалізації, але не враховує впливу вищих гармонік та коливань напруги.

У роботі [16] запропоновано змішаний підхід, суть якого в тому, що виконують аналогову фільтрацію фільтром симетричних складників із постобробкою (цифровим виділенням основної гармоніки напруги). Такий метод має всі недоліки, які присутні аналоговим методам.

Аналізуючи цифрові методи вимірювання симетричних складників, можна відзначити, що для обчислення симетричних складників необхідно або вводити частотну корекцію в існуючі методи, або використовувати методи, які інваріантні до відхилення частоти напруги мережі.

Кожен із методів розроблявся з урахуванням властивостей, які мають перетворення Фур'є, кореляційна функція та часова затримка сигналу. Однак усі зазначені методи є частотнозалежними, за виключенням методу [15], тому подальше вдосконалення методу симетричних складників на базі цифрових фільтрів є актуальною задачею.

**Постановка завдання.** Метою роботи є подальше вдосконалення методу симетричних складників на базі цифрових фільтрів (ЦФ).

Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі завдання: провести аналіз цифрових фільтрів; запропонувати тип фільтру для ФСС; обрати фітнес-функцію для оптимізації коефіцієнтів фільтру; розрахувати коефіцієнти ФСС; зробити висновки з отриманих результатів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Цифрова обробка у загальному вигляді виконується відповідно до структурної схеми (рис. 4):

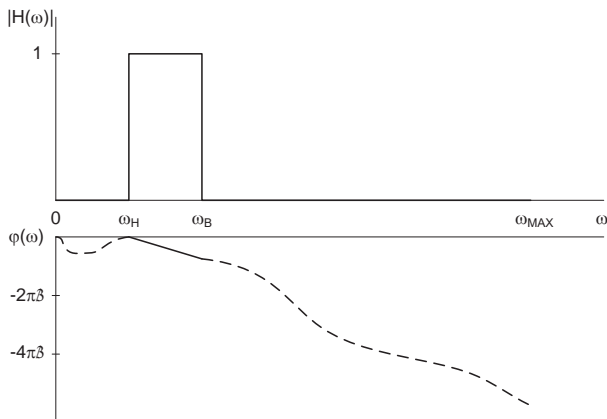


Рис. 1. Частотна характеристика вектора повороту  $a^0=1$  на базі фільтра

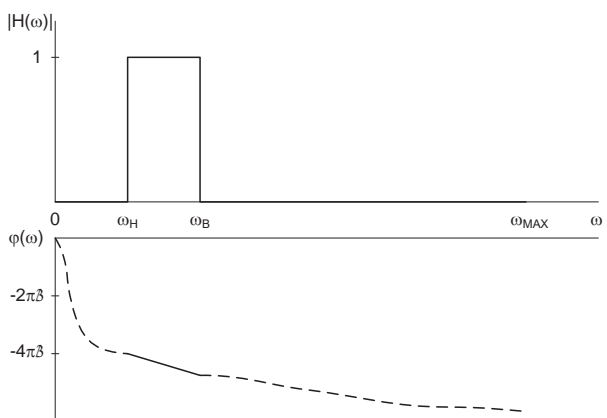


Рис. 2. Частотна характеристика вектора повороту  $a^1=a$  на базі фільтра

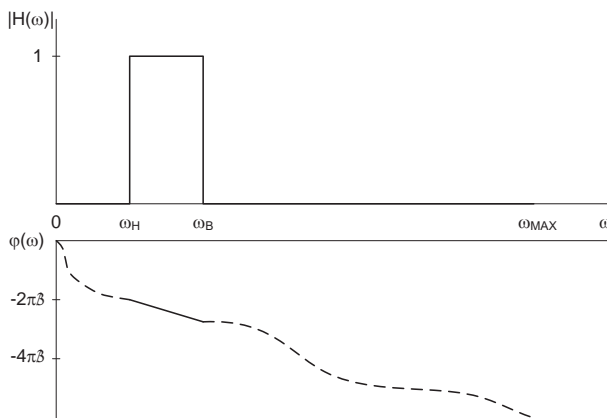


Рис. 3. Частотна характеристика вектора повороту  $a^2$  на базі фільтра

Робота схеми полягає в тому, щоб усунути накладення спектра при цифровій обробці з використанням фільтра ААФ, оцифрувати аналоговий сигнал з використанням АСД і обробити отримані дані в модулі DSP відповідно до заданого алгоритму. У разі необхідності сформувати вихідний аналоговий сигнал з використанням АСД.

У цьому разі метод симетричних складників на базі цифрових фільтрів можна записати виразами (4)–(6):

$$3U_{1(i)}(z) = U_{A(i)}(z)H^0(z) + U_{B(i)}(z)H^1(z) + U_{C(i)}(z)H^2(z), \quad (4)$$

$$3U_{2(i)}(z) = U_{A(i)}(z)H^0(z) + U_{B(i)}(z)H^2(z) + U_{C(i)}(z)H^1(z), \quad (5)$$

$$3U_{0(i)}(z) = U_{A(i)}(z)H^0(z) + U_{B(i)}(z)H^0(z) + U_{C(i)}(z)H^0(z), \quad (6)$$

де  $U_{A(i)}(z), U_{B(i)}(z), U_{C(i)}(z)$  – z-перетворення послідовності вхідних відліків напруг фаз А, В, С основної частоти відповідно;  $H^0(z), H^1(z), H^2(z)$  – z-перетворення векторів повороту.

Алгоритм обчислення коефіцієнтів симетричних складників буде визначатися структурною схемою, представленою на рис. 5. Як видно з рисунка, для реалізації обчислення цих коефіцієнтів відповідно до виразів (4)–(6) необхідно використати п'ять ЦФ: три  $H^0(z)$  і по одному  $H^1(z), H^2(z)$ . Працює схема таким чином: на вхід надходять послідовності оцифрованих значень фаз А, В, С, які проходять через вказані фільтри. На виході суматорів буде послідовність симетричних складників: нульового та зворотного. На виході отримуємо шукані значення, обчислені відповідно до виразів (1), (2).

Таким чином, щоб реалізувати алгоритм, представлений схемою на рис. 5, необхідно синтезувати усі фільтри. Існують такі ЦФ [1, 2]: фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ-фільтри); фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (БІХ-фільтри).

У багатьох додатках цифрової обробки сигналів найкраще використовувати КІХ-фільтри, тому що вони мають такі переваги:

- групова затримка фільтра постійна (КІХ-фільтри з лінійною фазою);
- КІХ-фільтри завжди стійкі.

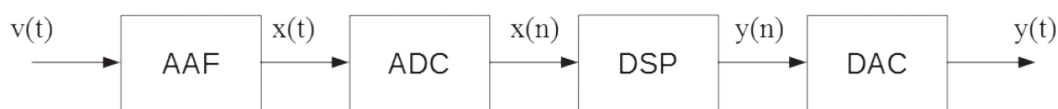


Рис. 4. Загальна структура системи ЦОС: ААФ – антиалайзінговий фільтр; АСД – аналого-цифровий перетворювач; DSP – цифровий процесор обробки сигналів; АСД – цифро-аналоговий перетворювач

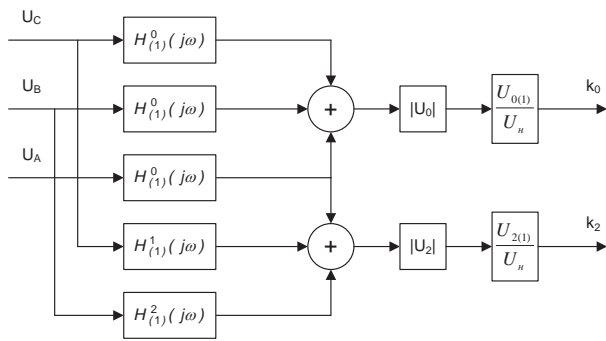


Рис. 5. Структурна схема вузла обчислення коефіцієнтів несиметрії з використанням ЦФ

У загальному випадку цифровий нерекурсивний фільтр описується таким виразом (7):

$$y(n) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot x(n-k), \quad (7)$$

де  $h(k)$  – коефіцієнти фільтра (імпульсна характеристика).

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) такого фільтра буде мати такий вигляд (8):

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot e^{-j\omega n}. \quad (8)$$

Для того, щоб КІХ-фільтр задовольняв вимогам реалізації векторів повороту, необхідно, щоб їхня фазо-частотна характеристика (ФЧХ) була лінійною із зсувом на  $120^\circ$  та  $240^\circ$ . Для цього необхідно, щоб імпульсна характеристика була симетричною або антисиметричною. У цьому разі можливо чотири типи КІХ-фільтрів [2]. Однак для нашої задачі можна використати фільтри I та II типів. Фільтри III і IV типів мають уявну частину частотної характеристики, тому не можуть бути використані. На жаль, ідеальну лінійну характеристику можна отримати тільки для одного фільтра (вектора повороту), тому необхідне застосування оптимізаційного методу для мінімізації похибки частотних характеристик при синтезі фільтрів.

Відомо безліч методів їх проектування в науковій літературі [1, 2]. Найбільш широко використовуються класичні методи розрахунку КІХ-фільтрів: метод зважування; метод частотної вибірки; метод найменших квадратів, метод найкращої рівномірної апроксимації. Тільки третій і четвертий методи відносяться до оптимізаційних методів. Однак у цьому разі синтез КІХ-фільтра будемо проводити з використанням генетичного алгоритму [17], тому що нам необхідно оптимізувати не тільки АЧХ, а й ФЧХ.

Генетичний алгоритм – евристичний алгоритм є різновидом еволюційних алгоритмів, за допомогою яких вирішуються оптимізаційні задачі з вико-

ристанням методів природної еволюції, аналогічних природному відбору в природі. Крім того, цей алгоритм дозволяє виконувати багатокритеріальну оптимізацію, що якраз необхідно в нашій задачі. Також у разі необхідності для збільшення швидкодії обчислень можна використати паралельні обчислення [18] під час синтезу фільтрів.

Під час вирішення задачі генетичним алгоритмом необхідно виділити фенотип, який визначає реальний об'єкт. У нашому разі в ролі фенотипу виступатимуть коефіцієнти фільтра, які будуть утворювати індивідуум (рис. 6).

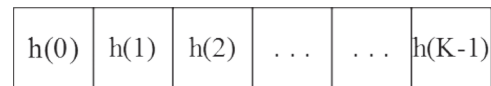


Рис. 6. Структура індивідуума

Для синтезу фільтра необхідна фітнес-функція. Синтез фільтрів будемо виконувати у вигляді задачі мінімізації зваженої чебишевської норми (9), (10):

$$e_1 = \max(W_1(\omega)|H(\omega) - \hat{H}(\omega)|) \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$e_2 = \max(W_2(\omega)|\Phi(\omega) - \hat{\Phi}(\omega)|) \rightarrow \min, \quad (10)$$

де  $H(\omega)$ ,  $\hat{H}(\omega)$  – АЧХ апроксимованого та апроксимуючого фільтрів відповідно;  $\Phi(\omega)$ ,  $\hat{\Phi}(\omega)$  – ФЧХ апроксимованого та апроксимуючого фільтрів відповідно;  $W_1(\omega)$ ,  $W_2(\omega)$  – вагові функції.

Для обчислення ЦФ була реалізована програма на мові програмування Python. Для реалізації генетичного алгоритму необхідно налаштувати гіперпараметри. У нашому разі вони будуть мати такий вигляд:

```

POPULATION = 100 # кількість індивідуумів популяції
SURVIVOR = 0.2 # ймовірність виживання
MUTATION = 0.05 # ймовірність мутації індивідуума
GENERATIONS = 150 # максимальна кількість поколінь
    
```

Загальний вигляд пропонованого методу синтезу КІХ-фільтрів на базі генетичного алгоритму має вигляд:

1. Генерація початкової популяції.
2. Обчислення пристосованості хромосом.
3. Вибір вихідних хромосом (рішень) із найкращими значеннями пристосованості для створіння нової популяції.
4. Виконання операції схрещування.
5. Виконання операції мутації.
6. Якщо умову зупинки виконано, повертаємо хромосому з найкращим значенням пристосованості, а інакше переходимо до пункту 2 для обробки нової популяції.

Результати синтезу векторів повороту (КІХ-фільтрів 24 порядку) представлено на рис. 7, рис. 8, рис. 9.

Залежність пристосованості від популяції показана на рис. 10.

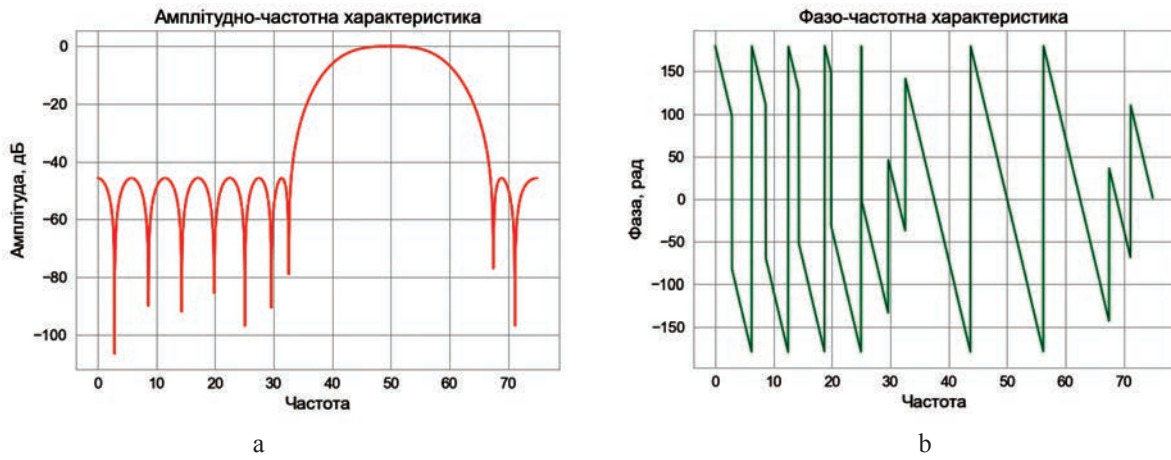


Рис. 7. Частотна характеристика вектора повороту  $H^0$ : а) АЧХ; б) ФЧХ

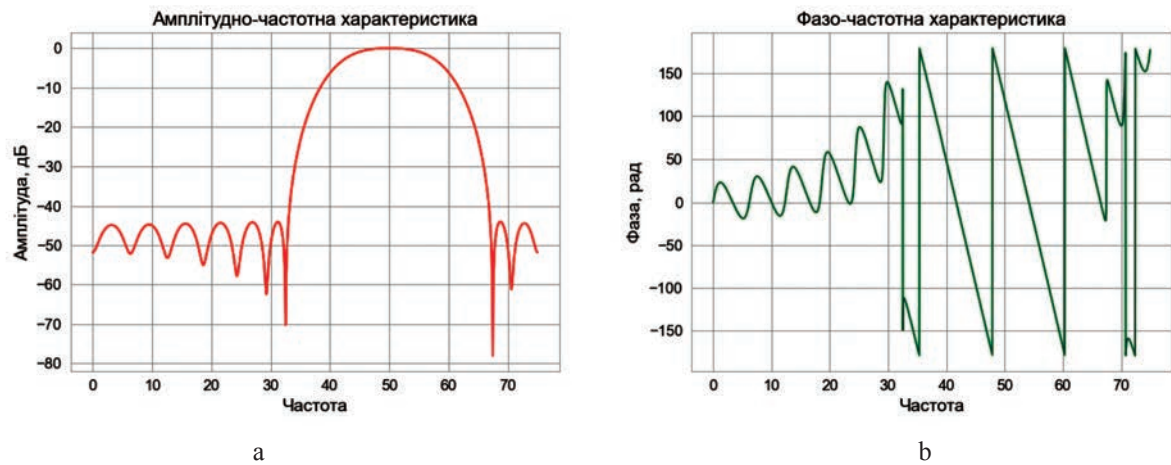


Рис. 8. Частотна характеристика вектора повороту  $H^1$ : а) АЧХ; б) ФЧХ

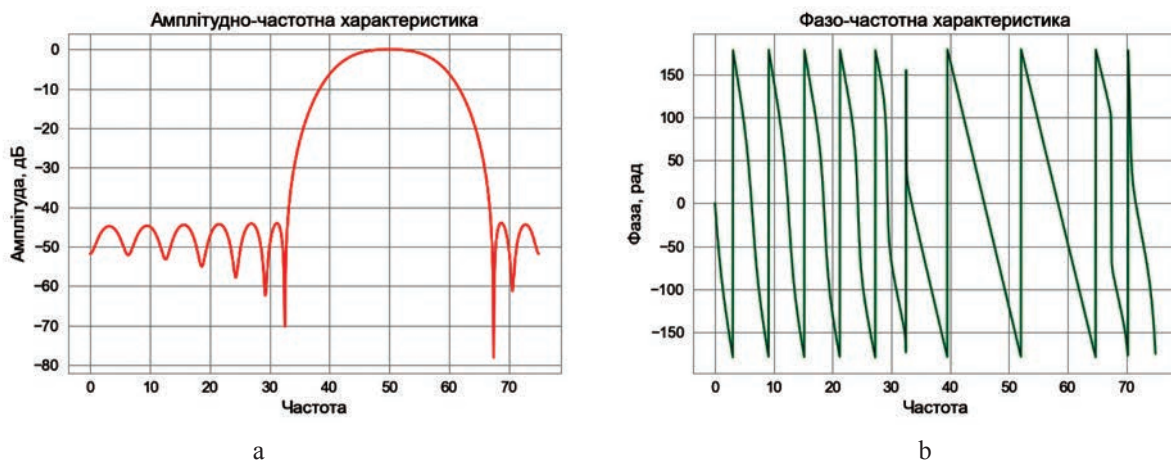


Рис. 9. Частотна характеристика вектора повороту  $H^2$ : а) АЧХ; б) ФЧХ

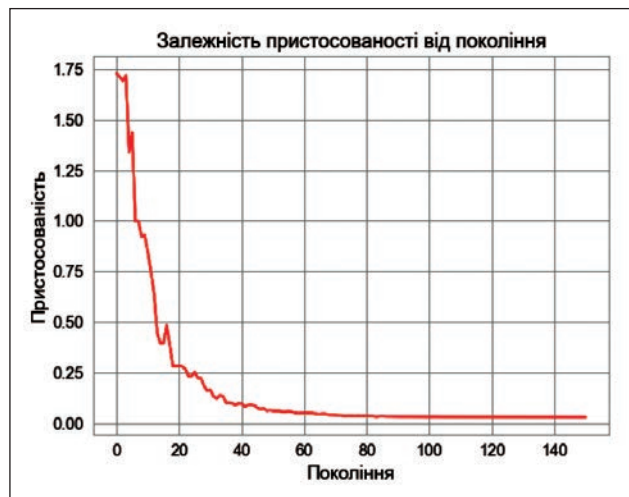


Рис. 10. Зміна пристосованості під час пошуку рішення

**Висновки.** У роботі вдосконалено метод симетричних складників на базі цифрових фільтрів та показано, як синтезувати цифровий ФСС за допомогою генетичного алгоритму. Як фітнес-функцію використано зважену чебишевську норму.

У результаті аналізу цифрових фільтрів було запропоновано використати нерекурсивний цифровий фільтр із лінійною фазою. Існує чотири типи таких фільтрів. Для цифрового ФСС було запропоновано використати фільтри I та II типу.

Для оптимізації коефіцієнтів фільтру використано генетичний алгоритм. Результати показали, що отримано досить непогані показники, а саме: усі три вектори повороту мають майже одиничний коефіцієнт передачі та зсув між ними дорівнює 120° та 240° в смузі пропускання КІХ-фільтрів.

#### Список літератури:

1. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB. БХВ, 2018. 560 с.
2. Proakis J., Manolakis D. Digital Signal Processing, 4th Edition. London: Pearson, 2013. 1019 p.
3. Артеменко М.Ю., Каплун В.В., Бобровник В.М. Визначення складників частин повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення за відомими активними та реактивними потужностями окремих фаз. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Том 30 (69), № 4. С. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-1/04>.
4. Черкашина Г.И. Симметрирование режимов работы системы электроснабжения бытового сектора. Энергозбереження. Энергетика. Энергоаудит. 2015. № 4 (135). С. 21–28.
5. Проектування електроенергетичних і електромеханічних систем та пристроїв. Релейний захист: Навчальний посібник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Є.І. Сокол, О.Г. Гриб, В.М. Баженов та ін. Харків: ФОП Бровін О.В., 2020. 306 с.
6. Головка І. Найважливіший вид палива – заощаджений. Вісник. Офіційно про податки. 2015. № 47 (47). URL: <http://www.visnuk.com.ua/ua/pubs/id/9199>. (дата звернення: 14.04.2021).
7. Маркевич К., Омельченко В. Ціноутворення на енергетичних ринках: досвід ЄС та України : Аналітична доповідь. Київ: Заповіт, 2016. 56 с. URL: [https://razumkov.org.ua/uploads/article/2016\\_ENERGY-GAZ-pravki.pdf](https://razumkov.org.ua/uploads/article/2016_ENERGY-GAZ-pravki.pdf). (дата звернення: 14.04.2021).
8. Аналіз перспектив розвитку цифрової енергетики в Україні. / О.Г. Гриб та ін. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. 2020. № 1. С. 85-90. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2020.1.12>.
9. James L., Kirtley Jr. Introduction to Electric Power Systems. Spring, 2011. 278 p.
10. Теорія електричних і магнітних кіл: Підручник / С.В. Панченко, О.М. Ананьєва, М.М. Бабаєв та ін. 2-ге вид., випр. та допов. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 246 с.
11. 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.
12. Тесик Ю.Ф. Прецизионные измерительные преобразователи параметров трехфазной сети на основе фильтров симметричных составляющих: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.05. Киев, 1985. 19 с.
13. Автоматизация электроэнергетических систем: Учебное пособие для вузов / О. П. Алексеев, В. Л. Козис, В. В. Кривенков, Морозкин В.П. и др. Энергоатомиздат, 1994. 448 с.
14. Горлач А.А., Минц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. К.: Техніка, 1985. 151 с.
15. Цифровий вимірювач квадратурних складників та коефіцієнтів несиметрії напруги: пат. 108976 Україна: МПК G01R 29/16. №201412151; заявл. 10.11.14; надр. 25.06.15, Бюл. №12. 6с.
16. Makov D.K. New method of measuring of symmetric sequences of three-phase voltage. Naukovi visti NTUU-KPI, 2014. Volume 93 Issue 1, P. 14-19.
17. Mutingi M., Mbohwa C. Grouping genetic algorithms. Advances and Applications. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. 243 p.
18. Cheng, J.R., Gen M. Parallel genetic algorithms with GPU computing. Intechopen, 2020. 26 p. DOI: <http://doi.org/10.5772/intechopen.89152>.

**Petrosian R.V., Kolos K.R. SYNTHESIS OF A DIGITAL FILTER OF SYMMETRIC COMPONENTS BASED ON A GENETIC ALGORITHM**

*The three-phase electricity transfer system has become widespread. However, the system functions well only when it is symmetrical. One of the main causes of symmetry violation is the use of such loads, symmetric performance and operating modes are impossible or inappropriate for constructive, technological or economic considerations. Therefore, quality control of electricity is important. There is a fairly large number of electricity quality indicators, but in this article, such indicators are considered as: unbalance factor of return voltage sequence; unbalance factor of zero sequence of voltage.*

*The introduction of a modern element base makes adjustments to all spheres of science and technology (including energy). The basis of the method of symmetrical components is laid a digital filter. As a filter device, a FIR filter with a linear phase (I and II type) is proposed. This allowed us to approximate three rotation vectors quite accurately.*

*A genetic algorithm was used to optimize the filter coefficients. Genetic algorithm - heuristic algorithm, which is a variety of evolutionary algorithms, which solve optimization tasks using methods of natural evolution, similar to natural selection in nature. This algorithm allows to perform multicriterial optimization used in the filter synthesis (it was necessary to minimize both an amplitude-frequency characteristic and phase frequency). As a fitness function used Chebyshev norm. Simulation was performed using Python programming language. The results showed that there are quite good indicators.*

*Prospects for further research are the testing of the proposed method on a broader spectrum of tasks, looking for other methods of optimization, studying the effects of finite bit depth, analyzing the structure of the digital filter of symmetric components.*

**Key words:** filter symmetric components, digital filter, genetic algorithm, Chebyshev norm.