

УДК 621.317.789

Д.К. Маков

**НОВИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ**

This article concerns the digital determination of three-phase quality indexes of electric power – coefficient of asymmetry on a negative sequence, rejection and oscillation of fundamental frequency voltage. These indexes are characterized by voltages of negative (VNS) and direct (VDS) sequences of fundamental frequency. For determination of VNS (after analog-digital transformation with tuning of frequency of measuring of instantaneous values of linear voltages) it is possible to take advantage of two linear operations – selection of linear voltages of fundamental frequency and selection of measurable sequence. Traditional approach of VNS measuring uses just the same sequence of implementation of operations. Thus, accuracy requirements of selection of linear voltages of fundamental frequency are very high. And in obtained codes of linear voltages codes of VDS of fundamental frequency are dominant and inconclusive. Fundamental frequency is obtained further using complicated algorithm with the multi-bits calculations. Crushing down dominant and inconclusive VNS using addition of codes of instantaneous values of linear voltages after analog-digital transformation is proposed for determination of VNS of fundamental frequency. An algorithm is thus simplified in 20–50 times, accuracy requirements of subsequent selection of voltage of fundamental frequency decrease, VDS of most ultraharmonics disappears almost completely. VNS of fundamental frequency increases in 3 times as compared to its in linear voltages. VNS of fundamental frequency is further distinguished. The offered method of determination of voltage of symmetric constituents is characterized by simplicity and increased accuracy.

**Keywords:** indexes of quality of electric power, coefficient of asymmetry, symmetric systems of voltage of positive, zero, negative sequences.

**Вступ**

Питанню якості електричної енергії нині приділяється значна увага, тому що недодержання норм якості електроенергії призводить до погіршення електромагнітної сумісності електричних мереж електропостачання і користувачів електроенергії та, як наслідок, до значних економічних збитків.

Три важливі показники якості електроенергії [1] – коефіцієнти асиметрії по зворотній послідовності основної частоти, відхилення та коливання напруги основної частоти – визначаються двома симетричними трифазними системами напруг основної частоти: зворотна (НЗП) і пряма (НПП). Умовно всі показники якості електроенергії можна поділити на статичні та динамічні. Серед статичних – два перші з перелічених показників, а динамічний – останній. Найскладнішим для виміру з названих показників є коефіцієнт асиметрії по зворотній послідовності основної частоти. Нормально допустиме значення цього показника – до 2% з абсолютною похибкою до  $\pm 0,3\%$ . Тобто необхідно виділити 4,4 В НЗП з абсолютною похибкою до  $\pm 0,7$  В за наявності 220 В НПП. Причому НЗП і НПП одної частоти і різняться тільки послідовністю фаз. Тому в цій статті основна увага приділяється визначенню саме НЗП.

Для визначення показників якості електроенергії слід віддати перевагу методам із ви-

користанням аналого-цифрового перетворення миттєвих значень міжфазних (фазних) напруг трифазної мережі і подальшою математичною обробкою отриманих кодів. Саме такий підхід є найбільш універсальним, дає змогу отримати всі поточні статичні показники якості електроенергії кожного періоду напруги основної частоти і також динамічні показники якості електроенергії, використати сучасну елементну базу.

Для визначення НЗП, НПП достатньо виконати дві лінійні операції – виділення шуканої симетричної трифазної системи напруг та виділення напруги основної частоти. Причому внаслідок лінійності цих операцій першою може бути кожна з них.

Використання попереднього виділення основної гармоніки через усунення напруги вищих гармонік можна вважати менш вдалим як в аналоговому, так і в цифровому виконанні.

Такий підхід в аналоговому виконанні характеризується апаратною надлишковістю (три фільтри низьких частот) і складністю отримати необхідний ступінь ідентичності комплексних коефіцієнтів передачі цих трьох фільтрів низьких частот (тобто ідентичності за модулем і кутом зсуву фаз). Тому такий підхід на практиці не використовується.

При попередньому цифровому виділенні основної гармоніки міжфазних напруг для отримання коефіцієнта асиметрії по зворотній послідовності основної частоти має місце не-

пряме вимірювання цього показника якості електроенергії. При цьому вимоги до точності виділення напруг основної частоти досить високі [2]: при виділенні НПП міжфазних напруг з похибкою до 0,1 % при розрахунку коефіцієнта асиметрії в 2 % отримуємо абсолютну похибку приблизно до 0,15 %. При визначенні НЗП [3–6] з необхідною точністю наступна операція (цифрове виділення шуканої симетричної складової) перетворює коди з великими неінформативними складовими НПП, більшими в 25–50 разів за інформативні значення НЗП. Доводиться використовувати досить складні розрахунки з великою розрядністю, що є недоліком.

### Постановка задачі

Мета роботи – на основі порівняльного аналізу найбільш близьких відомих способів цифрового визначення симетричних складових трифазної напруги, виявлення їх недоліків розробити більш простий спосіб визначення симетричних складових трифазної напруги з підвищеною точністю.

### Попередні відомості

В [1] запропоновано НЗП розраховувати за формулою

$$U_{2(1)} = \frac{1}{12} \sqrt{\left[ \left( \sqrt{3}U_{AB(1)} - \sqrt{4U_{BC(1)}^2 - \frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} + U_{AB(1)} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2 \right]}$$

де  $U_{2(1)}$  – НЗП основної частоти,  $U_{AB(1)}$ ,  $U_{BC(1)}$ ,  $U_{CA(1)}$  – міжфазні напруги основної частоти. Тобто необхідно:

- 1) з високою точністю виділити напруги основної частоти трьох міжфазних напруг;
- 2) виконати розрахунки за досить складним алгоритмом. У цьому випадку має місце непряме вимірювання НЗП.

У [3] для виміру НЗП і НПП спочатку отримують проміжні два числа  $v(t_i), w(t_i)$ . Для цього коди миттєвих значень трьох фазних  $A$ -,  $B$ -,  $C$ -напруг у моменти часу  $t_i$  перетворюють згідно з формулами:

$$v(t_i) = u_A(t_i) - 0,87[u_B(t_i) - u_C(t_i)],$$

$$w(t_i) = 0,5[u_B(t_i) + u_C(t_i)],$$

де  $u_A(t_i), u_B(t_i), u_C(t_i)$  – коди, які пропорційні миттєвим значенням вхідних трифазних напруг  $U_A, u_B(t_i), u_C(t_i)$  в моменти часу  $t_i$ . Ці коди запам'ятовують.

Далі виділяють коди, пропорційні основній частоті. Кожне з цих двох чисел –  $v(t_i), w(t_i)$  – множать на  $\cos \omega t_i$  і  $\sin \omega t_i$ , результати запам'ятовують у чотирьох реверсивних лічильниках. За період досліджуваного сигналу після обробки кодів миттєвих значень у реверсивних лічильниках отримують коди  $v$  і  $w$  квадратурних складових основної гармоніки напруги. Далі ці коди використовують в арифметичному пристрої для отримання кодів, пропорційних вимірюванім симетричним складовим напруги трифазної мережі.

Недоліком такого технічного рішення є невисока точність, бо при середньоквадратичному значенні похибки  $\sigma_i$  виміру кожного миттєвого значення фазної напруги і припущенні незалежності цих вимірів (найкращий для точності випадок) сумарна похибка виміру миттєвого значення  $v(t_i)$  дорівнює  $\sqrt{3}\sigma_i$ . Сумарна похибка виміру миттєвого значення  $w(t_i)$  становить  $\sqrt{2}\sigma_i$ , а сумарна похибка вимірювання миттєвого значення результату вимірювання дорівнює  $\sqrt{5}\sigma_i$ .

Крім того, алгоритм вимірювання досить складний, оскільки необхідно попередньо виділити  $v(t)$  і  $w(t)$ , а коди основної гармоніки необхідно виділити 4 рази. Це – також непряме вимірювання НЗП.

Підвищити точність виміру НЗП допомагає використання диференційного методу [7], але реалізація цього методу досить складна – містить три аналого-цифрові канали, ставить високі вимоги по точності до формувача опорної трифазної системи напруг, ідентичності опорних напруг кожної фази й інших аналогових блоків і додає свої специфічні похибки.

### Розв'язок поставленої задачі

Більш перспективним є попереднє виділення напруги шуканої симетричної послідовності з подальшою частотною фільтрацією. Саме так виконані багато приладів, у яких обидві операції виконуються з аналоговим сигналом. При аналоговому виділенні напруги симетричних складових фільтром симетричних складових перехідний процес для деяких із цих фільтрів практично закінчується за проміжок часу до 0,02-0,03 с (0,02 с – період напруги основної частоти електромережі). Тому для багатьох випадків можна рекомендувати аналогову фільтрацію фільтром симетричних складових із подальшим цифровим виділенням основної гармоніки для зменшення тривалості перехідного процесу.

На рис. 1 показано відому та рекомендовані послідовності виконання операцій при вимірюванні НЗП трифазної напруги.

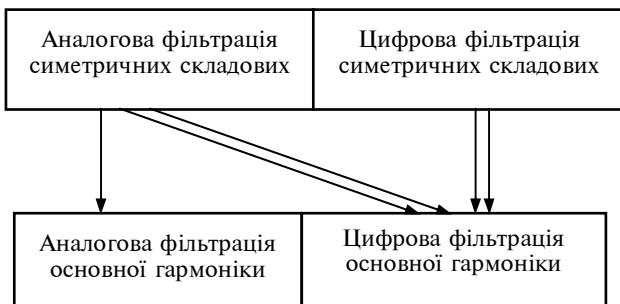


Рис. 1. Відомий (одна стрілка) і запропоновані (подвійні стрілки) способи визначення НЗП при попередній фільтрації симетричних складових

У випадку визначення НЗП основної частоти домінуючою неінформативною складовою є не просто напруга основної частоти, а саме НПП основної частоти. Тому необхідно послаб-

ляти не напругу основної частоти, а НПП основної частоти.

Розглянемо цифровий спосіб [8] визначення симетричних складових трифазної мережі з використанням аналого-цифрового перетворення трифазної напруги, подальшим виділенням шуканої НЗП основної частоти з цифровим послабленням симетричних складових НПП основної частоти, більшості симетричних складових вищих гармонік. Після цього з цифрового сигналу, який містить НЗП основної частоти і напруги вищих гармонік, виділяється НЗП основної частоти.

У цьому пристрої частота  $f_B$  вимірювань кодів миттєвих значень міжфазних напруг  $AB$ ,  $BC$ ,  $CA$  підстроюється блоком підстроювання частоти БПЧ до основної частоти  $f_M$  напруги електричної мережі й у кожній фазі дорівнює  $f_B = 3nf_M$ , де  $n$  – ціле число (наприклад,  $n = 120$ ), причому період напруги основної частоти становить  $T_M = 1/f_M = 3n/f_B = 3n\Delta t$ .

Сучасна елементна база впевнено дає змогу зробити БПЧ в аналого-цифровому і цифровому виконанні з похибкою до 0,05 % від відхилення частоти.

Цей спосіб [8] реалізований у пристрої за блок-схемою, наведеною на рис. 2.

Миттєві значення  $u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}$  міжфазних напруг  $AB, BC, CA$  можна подати відповідно

$$u_{AB} = U_{1(l)m} \sin \omega t + U_{2(l)m} \sin \omega t,$$

$$u_{BC} = U_{1(l)m} \sin(\omega t - 120^\circ) + U_{2(l)m} \sin(\omega t + 120^\circ),$$

$$u_{CA} = U_{1(l)m} \sin(\omega t + 120^\circ) + U_{2(l)m} \sin(\omega t - 120^\circ),$$

де  $U_{1(l)m}, U_{2(l)m}$  – відповідно максимальні значення симетричних складових НПП і НЗП ос-

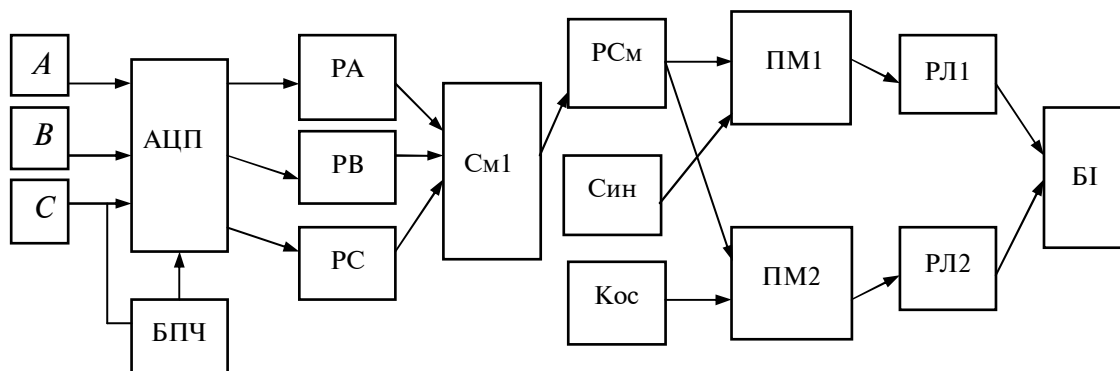


Рис. 2. Блок-схема пристрою для реалізації запропонованого способу визначення симетричних складових трифазної напруги

новної частоти. Міжфазні напруги  $AB$ ,  $BC$ ,  $CA$  подаються через вхідні блоки на входи АЦП. На виходах АЦП отримуються  $A$ -,  $B$ -,  $C$ - послідовності кодів миттєвих значень міжфазних напруг досліджуваної трифазної електричної мережі. Ці коди запам'ятовуються поспіль у комірки пам'яті відповідного для кожної напруги регістра РА, РВ, РС.

Можна записати вміст  $i$ -ї комірки регістрів РА, РВ, РС відповідно:

$$N_A(i\Delta t) = K_1(U_{1(l)m} \sin \omega i\Delta t + U_{2(l)m} \sin \omega i\Delta t),$$

$$N_B(i\Delta t) = K_2(U_{1(l)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ) + U_{2(l)m} \sin(\omega i\Delta t + 120^\circ)),$$

$$N_C(i\Delta t) = K_3(U_{1(l)m} \sin(\omega i\Delta t + 120^\circ) + U_{2(l)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ)),$$

де  $K_1, K_2, K_3$  – коефіцієнти передачі вхідних каскадів і АЦП відповідно міжфазних напруг  $AB$ ,  $BC$ ,  $CA$ .

У цьому способі широко використовується особливість трифазних напруг:

$$\begin{aligned} U_{1(l)m} \sin \omega i\Delta t + U_{1(l)m} \sin(\omega i\Delta t + 240^\circ) + \\ + U_{1(l)m} (\sin \omega i\Delta t + 120^\circ) = 0, \\ U_{1(l)m} \sin \omega i\Delta t + U_{1(l)m} \sin(\omega i\Delta t - 240^\circ) + \\ + U_{1(l)m} (\sin \omega i\Delta t - 120^\circ) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Саме тому в цифровому вигляді значно зменшуються напруги симетричних складових НПП основної частоти і більшості вищих гармонічних складових.

Для цього коди регістра РА поспіль, починаючи з першої комірки пам'яті, складаються в суматорі СМ1 відповідно з кодами регістра РВ поспіль, починаючи з  $n+1$ -ї комірки пам'яті (відповідає додатковому  $120^\circ$  зсуву фази  $B$  зі знаком мінус), та кодами регістра РС поспіль, починаючи з  $2n+1$ -ї комірки пам'яті (відповідає додатковому  $240^\circ$  зсуву фази  $C$  зі знаком мінус). Отримуємо такий результат у  $i$ -й комірці регістра сум РСМ:

$$\begin{aligned} N(i\Delta t) = \\ N_A(i\Delta t) + N_B(i\Delta t - 120^\circ) + N_C(i\Delta t - 240^\circ) = \\ = K_1(U_{1(l)m} \sin \omega i\Delta t + U_{2(l)m} \sin \omega i\Delta t) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + K_2(U_{1(l)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ - 120^\circ) + \\ + U_{2(l)m} \sin(\omega i\Delta t + 120^\circ - 120^\circ)) + \\ + K_3(U_{1(l)m} \sin(\omega i\Delta t + 120^\circ - 240^\circ) + \\ + U_{2(l)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ - 240^\circ)) \cong \\ \cong 3K_1U_{2(l)m} \sin \omega i\Delta t, \end{aligned}$$

де  $N_B(i\Delta t - 120^\circ)$ ,  $N_C(i\Delta t - 240^\circ)$  – відповідно коди комірок регістрів РВ та РС миттєвих значень міжфазних напруг  $BC$  і  $CA$ , додатково зсунуті відповідно на мінус  $120^\circ$  та мінус  $240^\circ$  для напруги основної частоти (відповідно на  $n$  і  $2n$  комірки пам'яті),  $K_1 = K_2 = K_3$ . Тобто в регістрі сум РСМ містяться коди миттєвих значень НЗП основної частоти і більшості вищих гармонік.

Далі для отримання НЗП основної частоти з отриманої послідовності сум кодів виділяються коди напруги основної частоти. Для цього коди комірок регістра сум РСМ помножуються в помножувачах ПМ1 і ПМ2 на відповідно коди синуса Син і косинуса Кос. Ортогональні складові НЗП основної частоти отримуються в реверсивних лічильниках РЛ1 і РЛ2 і надходять до блока індикації БІ.

Розглянемо загальний випадок наявності НПП і НЗП  $k$ -ї гармонічної складової. Міжфазні напруги мають однакову форму. Миттєві значення  $u_{AB(k)}$ ,  $u_{BC(k)}$ ,  $u_{CA(k)}$  міжфазних напруг  $AB$ ,  $BC$ ,  $CA$   $k$ -ї гармонічної складової можна записати як

$$\begin{aligned} u_{AB(k)} &= U_{1(k)m} \sin k\omega t + U_{2(k)m} \sin k\omega t, \\ u_{BC(k)} &= U_{1(k)m} \sin(k\omega t - 120^\circ \times k) + \\ &+ U_{2(k)m} \sin(k\omega t + 120^\circ \times k), \\ u_{CA(k)} &= U_{1(k)m} \sin(k\omega t + 120^\circ \times k) + \\ &+ U_{2(k)m} \sin(k\omega t - 120^\circ \times k), \end{aligned}$$

де  $U_{1(k)m}$ ,  $U_{2(k)m}$  – відповідно максимальні значення симетричних складових НПП і НЗП  $k$ -ї гармонічної складової.

Можна записати вміст  $i$ -ї комірки регістрів РА, РВ, РС від  $k$ -ї гармонічної складової відповідно:

$$N_A(ik\Delta t) = K_{1k}(U_{1(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{2(k)m} \sin \omega ik\Delta t),$$

$$N_B(ik\Delta t) = K_{2k}(U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k)),$$

$$N_C(ik\Delta t) = K_{3k}(U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k)),$$

де  $K_1 = K_2 = K_3$  – коефіцієнти передачі вхідних каскадів і АЦП відповідно міжфазних напруг  $AB$ ,  $BC$ ,  $CA$  для напруги  $k$ -ї гармонічної складової.

Далі коди регістра РА поспіль, починаючи з першої комірки пам'яті, складаються в суматорі  $См1$  відповідно з кодами регістра РВ поспіль, починаючи з  $n+1$ -ї комірки пам'яті (відповідає для напруги  $k$ -ї гармонічної складової додатковому  $120^\circ \times k$  зсуву фази  $B$  зі знаком мінус), та кодами регістра РС поспіль, починаючи з  $2n+1$ -ї комірки пам'яті (відповідає для напруги  $k$ -ї гармонічної складової додатковому  $240^\circ \times k$  зсуву фази  $C$  зі знаком мінус). Отримуємо такий результат у  $i$ -й комірці регістра сум РСм для напруги  $k$ -ї гармонічної складової ( $K_{1k} = K_{2k} = K_{3k}$ ):

$$\begin{aligned} N(ik\Delta t) &= N_A(ik\Delta t) + \\ &+ N_B(ik\Delta t - 120^\circ \times k) + N_C(ik\Delta t - 240^\circ \times k) = \\ &= K_{1k}(U_{1(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{2(k)m} \sin \omega ik\Delta t) + \\ &+ K_{2k}(U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k - 120^\circ \times k) + \\ &+ U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k - 120^\circ \times k)) + \\ &+ K_{3k}(U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k - 240^\circ \times k) + \\ &+ U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k - 240^\circ \times k)) = \\ &= K_{1k}(U_{1(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{2(k)m} \sin \omega ik\Delta t + \\ &+ U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k - 120^\circ \times k) + \\ &+ U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k - 120^\circ \times k) + \\ &+ U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k - 240^\circ \times k) + \\ &+ U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k - 240^\circ \times k)). \end{aligned}$$

Тоді результат у  $i$ -й комірці регістра сум РСм для напруг  $k_1$ -ї гармонічної складової ( $k_1 = 3s + 1$ ,  $s = 0, 1, 2, 3, \dots$ )  $N(ik_1\Delta t) = 3K_{1k} \times U_{2(k_1)m} \sin \omega ik_1\Delta t$ , для напруг  $k_2$ -ї гармонічної складової ( $k_2 = 3s + 2$ ,  $s = 0, 1, 2, 3, \dots$ )  $N(ik_2\Delta t) =$

$= 3K_{1k} U_{2(k_2)m} \sin \omega ik_2\Delta t$ , для напруг  $k_3$ -ї гармонічної складової ( $k_3 = 3s + 3$ ,  $s = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) становить

$$N(ik_3\Delta t) = 3K_{1k}[U_{2(k_3)m} \sin \omega ik_3\Delta t + U_{1(k_3)m} \sin \omega ik_3\Delta t].$$

В отриманому результаті відсутня НПП основної частоти, на кожні три послідовні гармонічні складові ( $k_1, k_2, k_3$  при однаковому  $s$ ) відсутні по дві НПП (для  $k_1, k_2$  гармонічних складових). Тобто запропонований спосіб без додаткових витрат втричі зменшує кількість НПП вищих гармонічних складових. Результуюча напруга отримана "чистішою". Для отримання кодів НЗП основної частоти з одержаного результату виділяються коди основної частоти.

Для виміру НПП основної частоти достатньо поміняти місцями в алгоритмі будь-які дві міжфазні напруги.

Використання запропонованого способу значно (більш ніж на порядок) зменшує вимоги до точності виділення напруги основної частоти. Це має місце тому, що в сигналі практично зникають неінформативна домінуюча НПП основної частоти, яка більша за інформативну НЗП приблизно в 50 разів, зникають також НПП вищих гармонічних складових з номерами 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11 ... і т.д.

## Висновки

Запропонований спосіб визначення симетричних складових трифазної напруги з підвищеною точністю дає можливість:

1) значно (в 20–50 разів) знизити вимоги до точності виділення кодів напруги основної частоти і розрядності блоків Фур'є-перетворення при вимірі напруги зворотної послідовності основної частоти;

2) знизити вплив вищих гармонічних складових на результат визначення НЗП основної частоти;

3) спростити алгоритм визначення симетричних складових;

4) визначити симетричні складові трифазних напруг деяких вищих гармонічних складових;

5) отримати результат визначення НЗП і НПП основної частоти, НПП і НЗП деяких вищих гармонічних складових, які, завдяки особ-

ливостям алгоритму, збільшені в 3 рази порівняно з вмістом їх у будь-якій міжфазній напрузі.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробленні найбільш вдалих методів коригування похибок від неідентичності кана-

лів міжфазних напруг для підвищення точності цифрового виділення симетричних складових трифазної напруги, які характеризують три важливі показники якості електроенергії трифазної електромережі.

1. *Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109–97.* – Введ. 01.01.97.
2. *Шидловский А.К., Музыченко А.Д.* Таблицы симметричных составляющих. – К.: Наук. думка, 1976. – 204 с.
3. *Цифровой измеритель несимметрии трехфазной сети: А.с. СССР № 746336 / М.Я. Минц, В.Н. Чинков, О.Г. Гриб.* – Оpubл. 1980, Бюл. № 25.
4. *Измеритель симметричных составляющих трехфазной сети: А.с. СССР № 737882 / В.П. Гапченко, О.Г. Гриб, М.Я. Минц, В.Н. Чинков.* – Оpubл. 1980, Бюл. № 20.
5. *Способ разложения напряжений многофазной цепи на ортогональные составляющие симметричных последовательностей: А.с. СССР № 1117541/ А.К. Шидловский, С.Г. Таранов, В.В. Брайко и др.* – Оpubл. 1984, Бюл. № 37.
6. *Цифровой вимірювач коефіцієнтів несиметрії напруги в промисловій мережі: Пат. України UA № 75929 / Р.В. Петросян.* – Оpubл. 2006, Бюл. № 6.
7. *Тесик Ю.Ф.* Применение дифференциального метода к измерению показателей качества электроэнергии // Зб. наук. праць ІЕД НАНУ. – 2005. – № 3. – С. 16–21.
8. *Спосіб цифрового виміру симетричних складових напруг трифазної мережі: Пат. України UA № 72534 / А.А. Щерба, К.Л. Серпілін, Д.К. Маков.* – Оpubл. 2012, Бюл. № 16.

Рекомендована Радою  
факультету електроенерготехніки  
та автоматики НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
27 травня 2013 року