

## МЕТОД ЦИФРОВОГО ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ НАПРУГ

Щерба А.А., д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України, Маков Д.К., к.т.н., доц., Коломійчук Д.С., Лісовий О.Р., студенти  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедри теоретичної електротехніки

**Вступ.** Задача забезпечення необхідної якості електроенергії є однією з найбільш важливих проблем сучасної електроенергетики. Тому, розробка нових більш ефективних методів визначення показників якості електроенергії є важливим і актуальним електротехнічним напрямком.

Відповідно до Держстандарту України № 13109-97 [3] одним із показників якості електроенергії є коефіцієнт асиметрії напруг по нульовій послідовності. Цей показник визначається напругою нульової послідовності (ННП) основної частоти трифазної системи напруг. Згідно зі стандартом нормально допустиме значення цього показника складає до 2% (при абсолютній похибці до  $\pm 0,5\%$ ). Тобто при наявності 220 В напруги прямої послідовності (НПП) основної частоти необхідно виділити 4,4 В ННП з абсолютною похибкою до  $\pm 1,1$  В. Причому ННП і НПП мають однакову частоту і відрізняються тільки послідовністю фаз.

Для визначення показників якості електроенергії використовують методи з аналого-цифровим перетворенням миттєвих значень фазних напруг трифазної мережі і наступною математичною обробкою отриманих кодів. При використанні таких методів першою операцією є автоматичне підстроювання частоти вимірювання миттєвих значень фазних напруг в  $3n$  раз більшу (де  $n$  – ціле число, більше 64) від основної частоти напруги електромережі. Після цього треба виконати дві лінійні операції: виділити фазні напруги основної частоти та виділити ННП. Внаслідок лінійності цих операцій їх послідовність виконання може бути довільною, але використання послідовності операцій, наведеної вище, слід вважати менш вдалим. При попередньому цифровому виділенні основної гармонічної складової фазних і міжфазних напруг вимоги до точності виділення фазних напруг основної частоти повинні бути досить високими. В той же час в [1, 2] пропонується використання саме такої послідовності операцій. Потім для визначення ННП з необхідною точністю треба використовувати третю операцію (цифрове виділення ННП), яка перетворює коди з великими неінформативними складовими НПП, більшими в 25-50 раз за інформативні значення ННП. Таким чином, доводиться використовувати досить складні розрахунки з великою розрядністю, що є недоліком для реалізації високої точності.

У [3] запропоновано ННП розраховувати за формулою:

$$U_{0(1)} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[ \frac{U^2_{BC(1)} - U^2_{CA(1)}}{U_{AB(1)}} - 3 \cdot \frac{U^2_{B(1)} - U^2_{A(1)}}{U_{AB(1)}} \right]^2 + [E - 3F]^2},$$

$$\text{де } E = \sqrt{4U_{BC(1)}^2 - \left( U_{AB(1)} - \frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2}, \quad F = \sqrt{4U_{B(1)}^2 - \left( U_{AB(1)} - \frac{U_{B(1)}^2 - U_{A(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2},$$

де:  $U_{0(1)}$  – ННП основної частоти,  $U_{AB(1)}, U_{BC(1)}, U_{CA(1)}$  – міжфазні напруги основної частоти,  $U_{A(1)}, U_{B(1)}$  – фазні напруги основної частоти.

Таким чином, необхідно з високою точністю виділити напруги основної частоти трьох міжфазних і двох фазних напруг, які містять домінуючу неінформативну НПП; виконати розрахунки по досить складному алгоритму.

У [1] запропоновано спосіб з використанням представлені вище послідовністю дій для вимірювання ННП основної частоти і додатковим розкладанням напруг трифазного кола на ортогональні складові симетричних послідовностей. Недоліками цього способу також є високі вимоги до точності виділення напруг основної частоти лінійних, фазних напруг і досить складний алгоритм розрахунку результату.

У [3] також допускається знаходити НПП методом симетричних складових.

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка простого методу визначення ННП основної частоти підвищеної точності.

У випадку визначення ННП основної частоти домінуючою неінформативною складовою є не просто напруга основної частоти, а саме НПП основної частоти. Тому необхідно послабляти не напругу основної частоти або вищих гармонік, а в першу чергу домінуючу НПП основної частоти. Після цього вимоги до точності виділення напруги основної частоти при визначенні ННП зменшуються більше ніж на порядок.

У [4] пропонується новий метод цифрового визначення ННП трифазної системи напруг з підвищеною точністю. У цьому методі широко використовується особливість трифазних напруг:

$$U_{1(1)m} \sin \omega t + U_{1(1)m} \sin(\omega t - 240^\circ) + U_{1(1)m} (\sin \omega t - 120^\circ) = 0.$$

Частота  $f_g$  вимірювань кодів миттєвих значень фазних напруг А, В, С підстроюється блоком підстроювання частоти БПЧ до основної частоти  $f_m$  напруги електричної мережі:  $f_g = 3nf_m$ , де  $n$  – ціле число, наприклад,  $n = 120$ . Період напруги основної частоти  $T_m = 1/f_m = 3n/f_g = 3n\Delta t$ . Розглянемо загальний випадок наявності в трифазній мережі ННП, НПП та напруги зворотної послідовності (НЗП)  $k$  – і гармонічної складової. Фазні напруги мають однакову форму. Миттєві значення  $u_{A(k)}, u_{B(k)}, u_{C(k)}$  фазних напруг А, В, С  $k$  – і гармонічної складової можна відповідно записати:

$$u_{A(k)} = U_{0(k)m} \sin k\omega t + U_{1(k)m} \sin k\omega t + U_{2(k)m} \sin k\omega t,$$

$$u_{B(k)} = U_{0(k)m} \sin k\omega t + U_{1(k)m} \sin(k\omega t - 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(k\omega t + 120^\circ \times k),$$

$$u_{C(k)} = U_{0(k)m} \sin k\omega t + U_{1(k)m} \sin(k\omega t + 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(k\omega t - 120^\circ \times k),$$

де:  $U_{0(k)m}, U_{1(k)m}, U_{2(k)m}$  – максимальні значення симетричних складових відповідно ННП, НПП, НЗП  $k$ -ї гармонічної складової. Фазні напруги А, В, С подаються через вхідні блоки на входи трьох АЦП. На виходах АЦП отримуються А-, В-, С- послідовності кодів миттєвих значень фазних напруг трифазної електричної мережі. Ці коди запам'ятовуються поспіль у комірки пам'яті відповідного для кожної фазної напруги регістру РА, РВ, РС. Інтервал часу між  $i$ -м і  $(i+1)$ -м вимірами миттєвих значень дорівнює  $\Delta t$ . Вміст  $i$ -ї комірки регістрів РА, РВ, РС від напруги  $k$ -ї гармонічної складової можна представити відповідно виразами:

$$N_A(ik\Delta t) = K_{1k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{2(k)m} \sin \omega ik\Delta t),$$

$$N_B(ik\Delta t) = K_{2k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k)),$$

$$N_C(ik\Delta t) = K_{3k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k)),$$

$$i\Delta t = t, \quad i=1,2,3,\dots,3n,$$

де  $K_{1k}, K_{2k}, K_{3k}$  – коефіцієнти передачі вхідних каскадів і АЦП відповідно фазних напруг А, В, С для напруги  $k$ -ї гармонічної складової.

Наступним складанням кодів миттєвих значень фазних напруг А, В, С практично повністю усувається вплив домінуючої неінформативної НПП і НЗП основної частоти, НПП і НЗП більшості вищих гармонік і збільшуються втричі ННП основної частоти. З отриманого результату складання виділяються коди НПП основної частоти.

Для цього коди з перших комірок пам'яті регістрів РА, РВ, РС складаються в суматорі С<sub>м1</sub>. Записується отриманий результат складання в першу комірку пам'яті регістра сум РС<sub>м</sub>. Далі коди з других комірок пам'яті регістрів РА, РВ, РС складаються в суматорі С<sub>м1</sub>. Результат записується в другу комірку пам'яті регістра сум РС<sub>м</sub> і т.д. В регістрі сум РС<sub>м</sub> накопичується послідовність  $3n$  кодів результатів складань. Це коди миттєвих значень отриманої в результаті складання результуючої напруги. Від напруги  $k$ -ї гармонічної складової ( $K_{1k} = K_{2k} = K_{3k}$ ) в  $i$ -й комірці регістра сум РС<sub>м</sub> отримаємо  $N(ik\Delta t)$ :

$$N(ik\Delta t) = N_A(ik\Delta t) + N_B(ik\Delta t) + N_C(ik\Delta t) =$$

$$= K_{1k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin \omega ik\Delta t +$$

$$+ U_{2(k)m} \sin \omega ik\Delta t) + K_{2k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t +$$

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

$$+ 120^\circ \times k)) + K_{3k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k) +$$

$$+ U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k)). \quad (1)$$

Тоді результат в  $i$ -й комірці регістра сум РС<sub>м</sub> від напруг  $k_1$ -ї та  $k_2$ -ї гармонічних складових ( $k_1 = 3s + 1; k_2 = 3s + 2, s = 0,1,2,3,\dots$ ):

$N(ik_1\Delta t) = 3K_{1k_1}U_{0(k_1)m} \sin \omega ik_1\Delta t; N(ik_2\Delta t) = 3K_{1k_2}U_{0(k_2)m} \sin \omega ik_2\Delta t$ ; від напруг  $k_3$  –ї гармонічної складової ( $k_3 = 3s + 3, s = 0, 1, 2, 3, \dots$ ):

$$N(ik_3\Delta t) = 3K_{1k} (U_{0(k_3)m} \sin \omega ik_3\Delta t + U_{1(k_3)m} \sin \omega ik_3\Delta t + U_{2(k_3)m} \sin \omega ik_3\Delta t).$$

Таким чином, результуюча напруга стає «чистішою». Без використання традиційної частотної фільтрації отримано НПП основної частоти зі зменшенням багатьох вищих гармонік та усуненням НПП і НЗП основної частоти і більшості вищих гармонік. Причому НПП основної частоти є домінуючою (в 30-50 раз більшою від НПП) і неінформативною. Для отримання НПП основної частоти згідно виразу (1) треба виділити коди напруги основної частоти.

**Висновки.** Розроблено новий аналого-цифровий метод визначення НПП основної частоти. Його особливості: а) вплив домінуючої неінформативної НПП і НЗП основної частоти на результат виміру НПП основної частоти усуваються складанням відповідних миттєвих значень трьох фазних напруг; б) вимоги до точності виділення напруги основної частоти при визначенні НПП зменшуються більше ніж на порядок.

Запропонований метод характеризується простотою реалізації і підвищеною точністю.

#### Перелік посилань

1. А. с. СССР № 1117541. Способ разложения напряжений многофазной цепи на ортогональные составляющие симметричных последовательностей/ А. К. Шидловский, С. Г. Таранов, В. В. Брайко, И. П. Гринберг, О. Л. Карасинский, Ю. Ф. Тесик, Р. Б. Хусид. – Оpubл. в бюлл. – 1984. – № 37.
2. А. с. СССР № 737882. Измеритель симметричных составляющих трехфазной сети/ В. П. Гапченко, О. Г. Гриб, М. Я. Минц, В. Н. Чинков. – Оpubл. в бюлл. – 1980. – №20.
3. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
4. Патент України UA №88863. Спосіб цифрового виміру напруги нульової послідовності трифазної мережі/ А. А. Щерба, Д. К. Маков. – Оpubл. в бюлл. – 2014. – №7.
5. Lobodzinskiy V., Tsyban Y. The investigation of wave process during propagation of plate voltage pulse on three-phase performance cable line //2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – IEEE, 2017. – С. 448-451.
6. Lobodzinskiy V., Maślak L. Mathematical modeling of the three-phase high-voltage cable lines under the theory of multiterminal networks //2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). – IEEE, 2015. – С. 96-98.