

УДК 621.317.789

Д. К. Маков

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна

ЦИФРОВОЕ ВИМЕРИОВАНИЕ СИМЕТРИЧНЫХ СКЛАДОВИХ ТРИФАЗНОЙ НАПРУГИ

Статья посвящена цифровому измерению трехфазных показателей качества электроэнергии – коэффициенту несимметрии по обратной последовательности, отклонению и колебанию напряжения основной частоты. Эти показатели характеризуются напряжениями обратной (НОП) и прямой (НПП) последовательности основной частоты. Подробнее рассматривается измерение НОП. Для измерения НОП, после аналого-цифрового преобразования с подстройкой частоты измерения мгновенных значений фазных напряжений, можно воспользоваться двумя линейными операциями – выделением фазных напряжений основной частоты и выделением измеряемой последовательности. Традиционный подход измерения НОП использует именно такую последовательность выполнения операций. При этом требования к точности выделения фазных напряжений основной частоты весьма высоки. В полученных кодах фазных напряжений доминирующими и неинформативными являются коды НПП основной частоты. Далее по достаточно сложному алгоритму с многоразрядными вычислениями рассчитывается НОП основной частоты. Поэтому для определения НОП основной частоты предлагается после аналого-цифрового преобразования сначала подавить доминирующую и неинформативную НПП, используя сложение со сдвигом кодов мгновенных значений фазных напряжений. При этом упрощается алгоритм, в 20-50 раз снижаются требования к точности последующего выделения напряжения основной частоты, практически исчезают НПП большинства высших гармоник, НОП основной частоты увеличивается в 3 раза по сравнению с ним в фазных напряжениях. Далее выделяется НОП основной частоты. Предлагаемый способ измерения напряжения симметричных составляющих имеет ряд преимуществ по сравнению с ранее применяемыми и может быть рекомендован для измерения НОП и НПП. Библ. 6, рис. 3.

Ключевые слова: показатели качества электроэнергии, коэффициент несимметрии, напряжение прямой, нулевой, обратной последовательностей.

Стаття присвячена цифровому виміру трифазних показників якості електроенергії - коефіцієнту асиметрії по зворотній послідовності, відхиленню і коливанню напруги основної частоти. Ці показники характеризуються напругою зворотної (НЗП) і прямої (НПП) послідовності основної частоти. Основна увага приділена виміру НЗП. Для виміру НЗП, після аналого-цифрового перетворення з підстроюванням частоти виміру миттєвих значень фазної напруги, можна скористатися двома лінійними операціями - виділенням фазної напруги основної частоти і виділенням вимірюваної послідовності. Традиційний підхід виміру НЗП використовує саме таку послідовність виконання операцій. При цьому вимоги до точності виділення фазної напруги основної частоти дуже високі. В отриманих кодах фазної напруги домінуючими і неінформативними є коды НПП основної частоти. Далі по досить складному алгоритму з багаторозрядними обчисленнями отримують НЗП основної частоти. Тому для визначення НЗП основної частоти пропонується після аналого-цифрового перетворення спочатку подавити домінуючу і неінформативну НПП, напругу нульової послідовності (ННП), використовуючи складання із зрушенням кодів миттєвих значень фазних напруг. При цьому спрощується алгоритм, в 20-50 разів знижуються вимоги до точності подальшого виділення напруги основної частоти, практично зникають НПП, ННП більшості вищих гармонік, НЗП основної частоти збільшується в 3 рази в порівнянні з вмістом її у фазній напрузі. Далі виділяється НЗП основної частоти. Пропонований спосіб виміру напруги симетричних складових має ряд переваг в порівнянні з раніше вживаними і повинен використовуватися для виміру НЗП і НПП. Бібл. 6, рис. 3.

Ключові слова: показники якості електроенергії, коефіцієнт асиметрії, напруга прямої, зворотної, нульової послідовностей.

Вступ

Чотири важливих показників якості електроенергії [4]: коефіцієнти асиметрії по нульовій та зворотній послідовності основної частоти, відхилення та коливання напруги основної частоти визначають три симетричні трифазні системи основної частоти: нульова (ННП), зворотна (НЗП), пряма (НПП). Умовно всі показники якості електроенергії можна поділити на статичні та динамічні.

Серед статичних – три перших з перерахованих показників, а динамічний – останній з перерахованих. Для вимірювання показників якості електроенергії слід віддати перевагу методам з використанням аналого-цифрового перетворення миттєвих значень фазних напруг трифазної мережі і наступною математичною обробкою отриманих кодів. Саме такий підхід є найбільш універсальним, дозволяє отримати всі поточні статичні показники якості електроенергії кожного періоду напруги основної частоти та динамічні показники якості електроенергії.

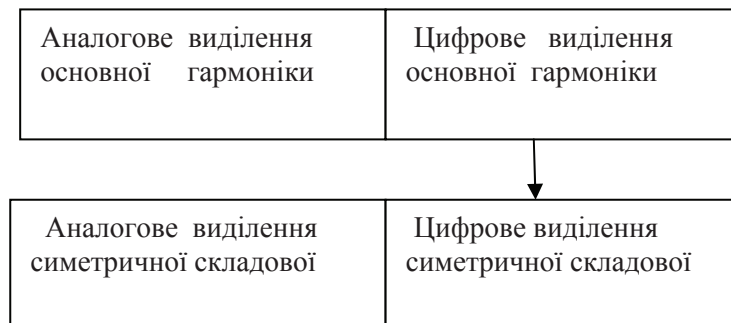
Для вимірювання НЗП, НПП, ННП достатньо виконати дві лінійні операції – виділення шуканої симетричної трифазної системи напруг та виділення напруги основної частоти. Причому внаслідок лінійності цих операцій першою може бути кожна з них.

Використання попереднього виділення основної гармоніки шляхом 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 необхідну ступінь ідентичності комплексних коефіцієнтів передачі цих трьох фільтрів низьких частот (тобто ідентичності по модулю і куту зсуву фаз). Тому такий підхід на практиці не використовується.

Мета статті – виконати порівняльний аналіз алгоритмів цифрових вимірювачів симетричних складових трифазної напруги для виявлення домінуючих похибок вимірювання і подальшої розробки рекомендацій коригування цих похибок для зменшення результуючої похибки вимірювання НЗП для трифазних користувачів електроенергії.

При попередньому цифровому виділенні основної гармоніки [1–3, 5] при вимірюванні НЗП наступна операція (цифрове виділення шуканої симетричної складової) перетворює коди з великими неінформативними складовими НПП, більшими в 25–50 раз за інформативні значення НЗП. Доводиться використовувати досить складні розрахунки з великою розрядністю. Це недолік.



Постановка задачі

Наприклад, [4] рекомендує НЗП розраховувати за формулою:

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

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

В [1] для вимірювання НЗП і НПП спочатку отримують проміжні два числа C . Для цього коди миттєвих значень трьох фазних А-, В-, С- напруг в моменти часу t_i перетворюють згідно наведених нижче формул. Виходять два числа:

$$v(t_i) = u_A(t_i) - 0,87[u_B(t_i) - u_C(t_i)], w(t_i) = 0,5[u_B(t_i) + u_C(t_i)],$$

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

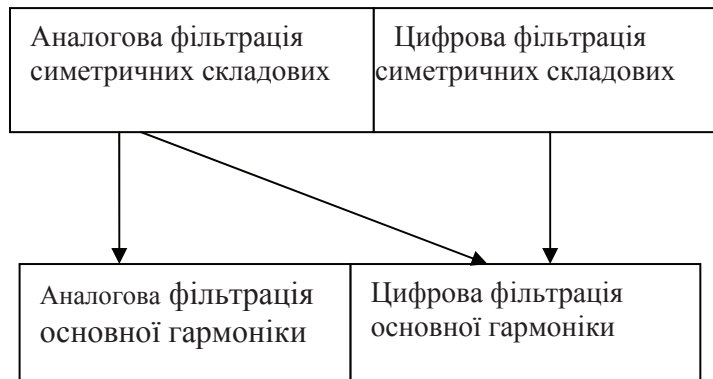
Далі виділяють коди, пропорційні основній гармоніці. Кожне з цих двох чисел $v(t_i), w(t_i)$ множать на $\cos \omega t_i$ та $\sin \omega t_i$ та результати запам'ятовують в чотирьох реверсивних лічильниках. За період досліджуваного сигналу після обробки кодів миттєвих значень у згаданих реверсивних

лічильниках отримують коди v та w квадратурних складових основної гармоніки напруги. Далі ці коди v та w 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 σ_i виміру кожного миттєвого значення фазної напруги і припущенні незалежності цих вимірів (найкращий для точності випадок) сумарна похибка вимірювання миттєвого значення $v(t_i)$ дорівнює $\sqrt{3}\sigma_i$. Сумарна похибка вимірювання миттєвого значення $w(t_i)$ дорівнює $\sqrt{2}\sigma_i$, а сумарна похибка вимірювання миттєвого значення результату вимірювання дорівнює $\sqrt{5}\sigma_i$.

Крім того, алгоритм вимірювання досить складний, так як необхідно попередньо виділити $v(t)$ і $w(t)$, а коди основної гармоніки необхідно виділити 4 рази.

Розв'язок поставленої задачі

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



Реалізовані на практиці послідовності виконання операцій при вимірюванні НЗП трифазної напруги показані стрілками, рекомендовані послідовності виконання операцій показані подвійними стрілками.

Розглянемо цифровий спосіб [6] вимірювання симетричних складових трифазної мережі з використанням аналого-цифрового перетворення трифазної напруги, наступним виділенням шуканої НЗП основної частоти з цифровим послабленням симетричних складових НПП і ННП основної частоти, НПП і ННП вищих гармонік, котрі не вимірюються. Після цього з цифрового сигналу, який містить НЗП основної частоти і вищих гармонік, виділяється НЗП основної частоти.

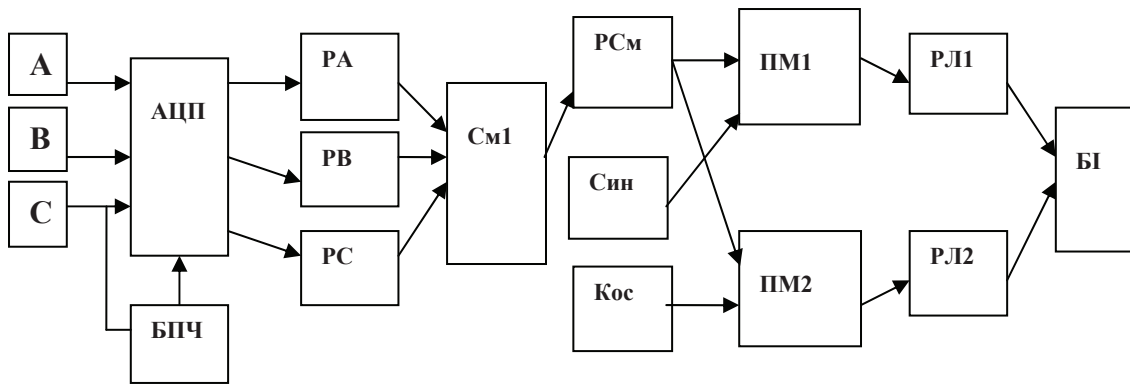
В цьому пристрою частота f_e вимірювань кодів миттєвих значень фазних напруг А, В, С підстроюється блоком підстроювання частоти БПЧ до основної частоти f_m напруги електричної мережі і в кожній фазі дорівнює $f_e = 3nf_m$, де n – ціле число, наприклад, $n=120$. Причому період напруги основної частоти $T_m = 1/f_m = 3n/f_e = 3n\Delta t$.

Цей спосіб, реалізований в пристрою за блок-схемою, наведеною нижче.

Напруги фаз А, В, С можна представити відповідно:

$$\begin{aligned} u_A &= U_{0(1)m} \sin \omega t + U_{1(1)m} \sin \omega t + U_{2(1)m} \sin \omega t, \\ u_B &= U_{0(1)m} \sin \omega t + U_{1(1)m} \sin(\omega t - 120^\circ) + U_{2(1)m} \sin(\omega t + 120^\circ), \\ u_C &= U_{0(1)m} \sin \omega t + U_{1(1)m} \sin(\omega t + 120^\circ) + U_{2(1)m} \sin(\omega t - 120^\circ), \end{aligned}$$

де: $U_{0(1)m}$, $U_{1(1)m}$, $U_{2(1)m}$ – відповідно максимальні значення симетричних складових відповідно ННП, НПП, НЗП основної частоти.



Напряги фаз А, В, С подаються через вхідні блоки на входи АЦП. На виходах АЦП отримуються А-, В-, С- послідовності кодів миттєвих значень фазних напруг досліджуваної трифазної електричної мережі. Ці коди запам'ятовуються поспіль у комірки пам'яті відповідного для кожної фази регістру РА, РВ, РС.

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

$$\begin{aligned} N_A(i\Delta t) &= K_1(U_{0(1)m} \sin \omega i\Delta t + U_{1(1)m} \sin \omega i\Delta t + U_{2(1)m} \sin \omega i\Delta t), \\ N_B(i\Delta t) &= K_2(U_{0(1)m} \sin \omega i\Delta t + U_{1(1)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ) + U_{2(1)m} \sin(\omega i\Delta t + 120^\circ)), \\ N_C(i\Delta t) &= K_3(U_{0(1)m} \sin \omega i\Delta t + U_{1(1)m} \sin(\omega i\Delta t + 120^\circ) + U_{2(1)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ)), \end{aligned}$$

де K_1, K_2, K_3 – коефіцієнти передачі вхідних каскадів і АЦП відповідно А, В, С.

Далі в цифровому вигляді подавляються напруги симетричних складових НПП та ННП основної частоти, котрі не вимірюються. Для цього коди регістра РА поспіль, починаючи з першої комірки пам'яті, складаються в суматорі См1 відповідно з кодами регістра РВ поспіль, починаючи з $n+1$ -ої комірки пам'яті (відповідає додатковому 120° зсуву фази В зі знаком мінус), та кодами регістра РС поспіль, починаючи з $2n+1$ -ої комірки пам'яті (відповідає додатковому 240° зсуву фази С зі знаком мінус). Отримується наступний результат в i -ої комірки регістра сум РСм:

$$\begin{aligned} N(i\Delta t) &= N_A(i\Delta t) + N_B(i\Delta t - 120^\circ) + N_C(i\Delta t - 240^\circ) = K_1(U_{0(1)m} \sin \omega i\Delta t + U_{1(1)m} \sin \omega i\Delta t + U_{2(1)m} \sin \omega i\Delta t) + \\ &+ K_2(U_{0(1)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ) + U_{1(1)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ - 120^\circ) + U_{2(1)m} \sin(\omega i\Delta t + 120^\circ - 120^\circ)) + \\ &+ K_3(U_{0(1)m} \sin(\omega i\Delta t - 240^\circ) + U_{1(1)m} \sin(\omega i\Delta t + 120^\circ - 240^\circ) + U_{2(1)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ - 240^\circ)) \cong 3K_1 U_{2(1)m} \sin \omega i\Delta t, \end{aligned}$$

де $N_B(i\Delta t - 120^\circ), N_C(i\Delta t - 240^\circ)$ – відповідно коди комірок регістрів РВ та РС миттєвих значень напруг фаз В та С, додатково зсунуті відповідно на мінус 120° та мінус 240° для напруги основної частоти (відповідно на n та $2n$ комірок пам'яті), $K_1 = K_2 = K_3$.

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 блоку індикації БІ.

Для отримання НЗП k -ої гармоніки з отриманої послідовності сум кодів регістра сум РСм виділяються коди напруги k -ої частоти.

Для вимірювання НПП достатньо поміняти місцями в алгоритмі будь-які дві фазні напруги.

При такому підході значно (більше ніж на порядок) зменшуються вимоги до точності виділення напруги основної частоти. Це має місце тому, що в сигналі практично зникають неінформативна домінуюча НПП та ННП основної частоти, НПП і ННП вищих гармонік з номерами 2, 4, 5, 7, 8 і т.д.

Висновки

Такий підхід дозволяє:

1. Значно знизити вимоги до точності виділення кодів напруги основної частоти і розрядності блоків Фур'є-перетворення при вимірі напруги зворотної послідовності основної частоти, тому що немає необхідності виконувати обчислення з багаторозрядними кодами фазних напруг, що містять домінуючі по модулю коди НПП основної частоти.

2. Знизити вплив вищих гармонік на результат вимірювання, оскільки результат вимірювання не залежить від напруг основної та вищих гармонік симетричних послідовностей, які не вимірюються.

3. Спростити алгоритм вимірювання симетричних складових, тому що замість розрахунку по складних формулах здійснюється складання зі зсувом кодів миттєвих значень фазних напруг, розташованих у відповідних регістрах.

4. Визначити симетричні складові трифазних напруг вищих гармонік з номерами 2,4,5,7,8...

5. Отримати результат вимірювання шуканої НЗП, котра, завдяки особливостям алгоритму, збільшена в 3 рази порівняно з вмістом НЗП в будь-якій фазній напрузі.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці найбільш вдалих методів коригування похибок для підвищення точності цифрового вимірювання симетричних складових трифазної напруги, котрі характеризують чотири важливих показники якості електроенергії трифазної електромережі.

Список літератури

1. А. с. СССР № 746336. Цифровой измеритель несимметрии трехфазной сети/ М. Я. Минц, В. Н. Чинков, О. Г. Гриб. – Опубл. в бюлл. – 1980. – № 25.

2. А. с. СССР № 737882. Измеритель симметричных составляющих трехфазной сети/В. П. Гапченко, О. Г. Гриб, М. Я. Минц, В. Н. Чинков. – Опубл. в бюлл. – 1980. – № 20.

3. 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. – Опубл. в бюлл. – 1984. – № 37.

4. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

5. Патент України UA № 75929. Цифровий вимірювач коефіцієнтів несиметрії напруги в промисловій мережі/ Р. В. Петросян. – Опубл. в бюл. – 2006. – № 6.

6. Патент України UA №72534. Спосіб цифрового виміру симетричних складових напруг трифазної мережі/ А. А. Щерба, К. Л. Серпін, Д. К. Маков. – Опубл. в бюл. – 2012. – №16.

DIGITAL MEASUREMENT OF SYMMETRIC COMPONENTS OF TREE-PHASE VOLTAGE

D. K. Makov

National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnical Institute”,
Kyiv, Ukraine

This article is sanctified to the digital measuring of three-phase indexes of quality of electric power - coefficient of asymmetry on a reverse sequence, rejection and oscillation of voltage of fundamental frequency. These indexes are characterized voltages of reverse (VRS) and direct (VDS) sequence of fundamental frequency. We will consider measuring of VRS. For measuring of VRS (after analog-digital transformation with tuning of frequency of measuring of instantaneous values of phase voltages) it is possible to take advantage of two linear operations - selection of phase voltages of fundamental frequency and selection of measureable sequence. Traditional approach of measuring of VRS uses the just the same sequence of implementation of operations. Thus requirement to exactness of selection of phase voltages of fundamental frequency very high. And in got codes of phase voltages dominant and notinformative are codes of VDS of fundamental frequency. Further on a difficult enough algorithm with the multi-bit calculations of getting VRS of fundamental frequency. Therefore for determination of VRS of fundamental frequency offered after analog-digital transformation first to crush down dominant and notinformative VDS, using addition with the change of codes of instantaneous values of phase voltages. An algorithm is thus simplified, in 20-50 times go down requirement to exactness of subsequent selection of voltage of fundamental frequency, VDS of most ultraharmonics disappear practically, VRS of fundamental frequency increases in 3 times as compared to its in phase voltages. VRS of fundamental frequency is further distinguished. The offered method of measuring of voltage of symmetric constituents has a row of advantages as compared to before applied and must be used for measuring of VRS and VDS. References 6, figures 5.

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

1. *Patent of USSR № 746336*. Digital measuring device of asymmetry of three-phase network/*M. Ya. Mints, V. N. Chinkov, O. G. Grib*. – Publ. in bull. – 1980. – № 25. (*Rus.*).
2. *Patent of USSR № 737882*. Measuring device of symmetric constituents of three-phase network/ *V. P. Gapchenko, O. G. Grib, M. Ya. Mints, V. N. Chinkov*. – Publ. in bull. – 1980. – № 20. (*Rus.*).
3. *Patent of USSR №.1117541*. Method of decomposition of voltages of multiphase network on ortogonal constituents of symmetric sequences/ *A. K. Shidlovskii, S. G. Taranov, V. V. Brajko, I. P. Grinberg, O. L. Karasinskii, Yu. F. Tesik, R. B. Husid*. – Publ. in bull. – 1984. – №3 7. (*Rus.*).
4. Standart of Ukraine 13109-97 “Norms of quality of electric energy are in the systems of power supply of general-purpose”. (*Rus.*).
5. *Patent of Ukraine UA № 75929*. A digital measuring device of coefficients of asymmetry of voltage is in the industrial network/*R. V. Petrosyan*. – Publ. in bull. – 2006. – №6. (*Ukr.*).
6. *Patent of Ukraine UA № 72534*. Method of the digital measuring of symmetric constituents of voltage of three-phase network/ *A. A. Shcherba, K. L. Serpilin, D. K. Makov*. – Publ. in bull. – 2012. – №16. (*Ukr.*).