

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ АСИМЕТРІЇ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ ОСНОВНОЇ ЧАСТОТИ І ВИЩИХ ГАРМОНІК

Д.К. Маков*, канд.техн.наук

НТУ України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. E-mail: makodk47@gmail.com

Представлено новий метод аналого-цифрового визначення симетричних складових трифазної електричної напруги. Його реалізовано наступною послідовністю операцій: підстроюванням, кратним трьом, частоти вимірювання миттєвих значень до основної частоти електричної напруги; аналого-цифровим перетворенням миттєвих значень трифазних напруг із запам'ятовуванням отриманих кодів; послабленням домінуючої неінформативної напруги прямої послідовності основної частоти та більшості вищих гармонік і виділенням кодів напруги, яка містить шукану симетричну складову; виділенням кодів напруги основної частоти. Порівняно з відомими метод характеризується підвищеною точністю та спрощеною реалізацією. Бібл. 10, рис. 3.

Ключові слова: показники якості електроенергії, напруги прямої та зворотної послідовностей, частота.

Якості електроенергії в трифазних мережах електроживлення завжди приділяють велику увагу [1, 2]. Проте включення в них напівпровідникових перетворювачів із широтно-імпульсною модуляцією [2, 3], несиметричних електроіндукційних [4] та електророзрядних [5] установок може призводити до погіршення як статичних, так і динамічних показників якості електроенергії. Особливе погіршення таких показників, як коефіцієнт асиметрії (КА) основної частоти (ОЧ) та відхилення і коливання напруги ОЧ виникає у разі використання в колах перетворювачів проміжних смісних накопичувачів енергії [6] та стохастичних і нелінійних навантажень [7]. При цьому КА напруги ОЧ за зворотною послідовністю характеризується напругою зворотної послідовності (НЗП) ОЧ і є найскладнішим із перерахованих показників для вимірювання. Його нормально допустиме значення має бути до 2 % з абсолютною похибкою до $\pm 0,3$ %, тобто для напруги прямої послідовності (НПП) ОЧ 220 В необхідно виділити НЗП ОЧ 4,4 В з абсолютною похибкою до $\pm 0,66$ В. Причому НЗП і НПП ОЧ відрізняються тільки послідовністю фаз.

Використання сучасної елементної бази дає змогу отримати всі поточні статичні показники якості електроенергії кожного періоду напруги ОЧ та динамічні показники якості електроенергії. Зазвичай використовується метод, під час реалізації якого підстроюється частота аналого-цифрового перетворення миттєвих значень трифазної напруги до ОЧ напруги електромережі. Далі використовується аналого-цифрове перетворення міжфазних (фазних) напруг із запам'ятовуванням отриманих кодів. Потім виконуються два лінійних перетворення з виділенням: а) напруги основної частоти та б) шуканої НЗП. Оскільки ці два перетворення є лінійними, то їхня послідовність може бути довільною. У разі попереднього цифрового виділення напруги ОЧ для подальшого отримання НЗП ОЧ має місце непряме вимірювання. При цьому вимоги до точності виділення лінійних напруг ОЧ повинні бути досить високими. У всіх відомих роботах пропонується використання саме такої послідовності перетворень. При визначенні НЗП ОЧ (до ≈ 5 В) із необхідною точністю наступне цифрове виділення НЗП ОЧ перетворює коди з домінуючими неінформативними складовими НПП ОЧ (до ≈ 220 В), більшими у 25–50 разів за інформативні значення НЗП ОЧ. Доводиться використовувати досить складні розрахунки з великою розрядністю. Це є недоліком для досягнення високої точності.

В [1] запропоновано НЗП розраховувати за формулою

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

де $U_{2(1)}$ – НЗП ОЧ, $U_{AB(1)}, U_{BC(1)}, U_{CA(1)}$ – міжфазні напруги ОЧ.

Тобто необхідно з високою точністю виділити напруги ОЧ трьох лінійних напруг, які містять домінуючу неінформативну НПП ОЧ, і потім виконати розрахунки за досить складним алгоритмом.

У роботі [8] для вимірювання НЗП і НПП спочатку отримують два числа $v(t_i)$ та $w(t_i)$, які є проміжними. Для цього коди миттєвих значень трьох фазних напруг (u_A, u_B, u_C) у моменти часу t_i перетворюють як

$$v(t_i) = u_A(t_i) - 0,87 [u_B(t_i) - u_C(t_i)] \quad \text{та} \quad w(t_i) = 0,5 [u_B(t_i) + u_C(t_i)].$$

Кожне з двох чисел $v(t_i)$ та $w(t_i)$ помножують на $\cos \omega t_i$ та $\sin \omega t_i$, а результати запам'ятовують у чотирьох реверсивних лічильниках. За період досліджуваного сигналу після обробки кодів миттєвих значень у зга-

даних реверсивних лічильниках отримують коди v та w квадратурних складових основної гармоніки напруги. Далі коди v та w використовують у арифметичному пристрої для отримання кодів, пропорційних вимірюваним симетричним складовим напруги трифазної мережі.

Складність такого технічного рішення зменшує точність, оскільки при середньоквадратичному значенні похибки σ_i вимірювання кожного миттєвого значення лінійної напруги і припущенні незалежності цих вимірів (найкращий для точності випадок) сумарна похибка виміру миттєвого значення $v(t_i)$ дорівнює $3^{0.5} \sigma_i$. Сумарна похибка виміру миттєвого значення $w(t_i)$ дорівнює $2^{0.5} \sigma_i$, а сумарна похибка вимірювання миттєвого значення результату вимірювання – $5^{0.5} \sigma_i$. Крім того, алгоритм вимірювання є також складним, бо вимагає попереднього виділення чисел $v(t)$ і $w(t)$, а коди основної гармоніки необхідно виділити 4 рази. Використання непрямого вимірювання НЗП ОЧ із домінуючою неінформативною НПП ОЧ ускладнює отримання високої точності. Підвищити точність отримання НЗП ОЧ допомагає використання диференціального методу [9], але реалізація його достатньо складна – ставить високі вимоги до точності формувача опорної трифазної системи напруг, ідентичності опорних напруг кожної фази та інших аналогових блоків і додає свої специфічні похибки.

У випадку визначення НЗП ОЧ домінуючою неінформативною складовою є не просто напруга ОЧ, а саме НПП ОЧ. Тому в першу чергу необхідно послаблювати не напругу вищих гармонік, а НПП ОЧ. Знаючи і використовуючи це твердження, визначення НЗП ОЧ суттєво полегшується.

Метою статті є удосконалення методу визначення КА напруги ОЧ за зворотною послідовністю та відповідно НЗП ОЧ, відхилення і коливання НПП як основних чинників якості електроенергії і НЗП вищих гармонік.

Основна ідея удосконалення методу полягає в тому, що послаблення домінуючої неінформативної НПП ОЧ треба зробити першочерговим, використовуючи наступне рівняння:

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

де $U_{1(l)m}$ – максимальне значення міжфазної (фазної) НПП ОЧ, $\omega = 2\pi f_m$, $f_m = 50$ Гц. Період напруги ОЧ $T_m = 1/f_m = 3n/f_b = 3n\Delta t$, де n – ціле число, наприклад, $n = 120$, i – ціле, $i = 1, 2, 3 \dots 3n$. Далі виділяється НЗП ОЧ.

Розглянемо загальний випадок наявності в трифазній мережі НПП та НЗП k -ї гармонічної складової. Для миттєвих значень міжфазних напруг $u_{AB(k)}$, $u_{BC(k)}$ та $u_{AC(k)}$ цієї складової можна записати

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

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

де $U_{1(k)m}$ та $U_{2(k)m}$ – відповідні максимальні значення симетричних складових НПП та НЗП k -ї складової.

Частота вимірювання миттєвих значень міжфазних напруг f_b підстроюється блоком підстроювання частоти БПЧ до ОЧ f_m напруги електромережі: $f_b = 3nf_m$. Міжфазні напруги АВ, ВС, СА подаються через вхідні блоки на входи трьох АЦП. Із виходів АЦП коди запам'ятовуються поспіль у комірках пам'яті відповідного для кожної напруги регістра РА, РВ, РС (див. як отримуються А-, В-, С-послідовності кодів миттєвих значень міжфазних напруг трифазної електромережі на рис. 1).

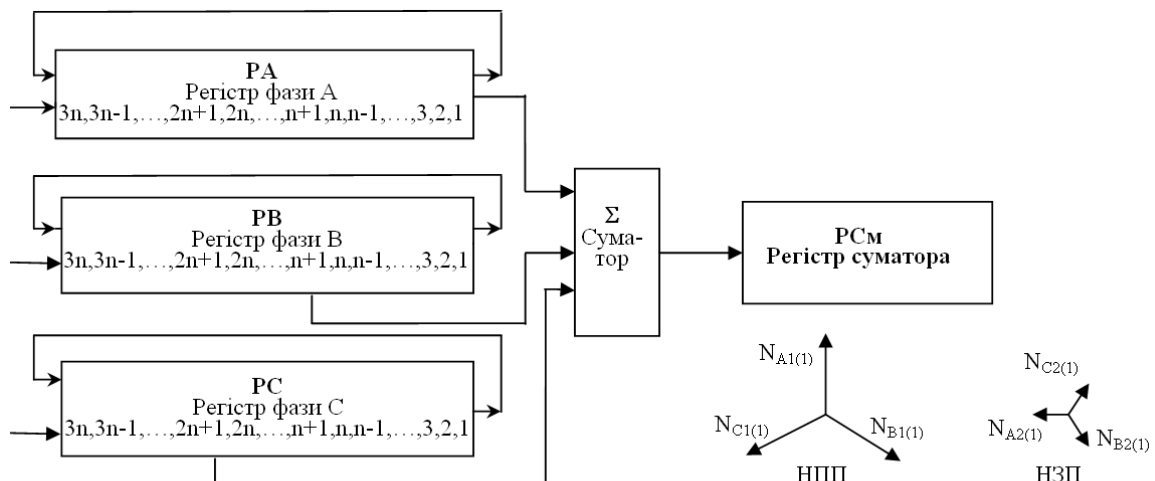


Рис. 1

Рис. 2

На рис. 2 показано вектори кодів НПП і НЗП ОЧ, миттєві значення яких входять до складу миттєвих значень міжфазних напруг, які запам'ятовано в регістрах РА, РВ, РС.

Вміст i -ї комірки регістрів РА, РВ, РС від k -ї гармонічної можна представити виразами

$$N_{A(ik\Delta t)} = K_{ik} [U_{1(k)m} \cdot \sin \omega ik \Delta t + U_{2(k)m} \cdot \sin \omega ik \Delta t],$$

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

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

де K_{1k}, K_{2k} та K_{3k} – коефіцієнти передачі вхідних каскадів і АЦП відповідно лінійних напруг АВ, ВС, СА для напруги k -ї гармонічної складової.

Для подавлення НПП ОЧ і більшості вищих гармонік коди регістра РА, починаючи з першої комірки пам'яті, складаються в суматорі С_м відповідно з кодами регістра РВ (поспіль, починаючи з $(n+1)$ -ї комірки пам'яті, що відповідає для напруги k -ї гармонічної складової додатковому $120^\circ \cdot k$ зсуву фази В зі знаком мінус), та кодами регістра РС (поспіль, починаючи з $(2n+1)$ -ї комірки пам'яті, що відповідає для напруги k -ї гармонічної складової додатковому $240^\circ \cdot k$ зсуву фази С зі знаком мінус). Записуємо отриманий результат у першу комірку пам'яті регістра сум РС_м. Переходимо до другої комірки пам'яті регістра РА і повторюємо пропонувані дії з $(n+2)$ -ю коміркою пам'яті регістра РВ і $(2n+2)$ -ї комірки пам'яті регістра РС, результат записуємо в другу комірку пам'яті регістра сум РС_м і т.д. У регістрі сум РС_м накопичується послідовність $3n$ кодів результатів складань. Це коди миттєвих значень отриманої результуючої напруги. Від напруги k -ї гармонічної складової ($K_{1k} = K_{2k} = K_{3k}$) в i -й комірниці регістра сум РС_м отримуємо $N(ik\Delta t)$

$$N(ik\Delta t) = N_A(ik\Delta t) + N_B(ik\Delta t - 120^\circ \cdot k) + N_C(ik\Delta t - 240^\circ \cdot k) = K_{1k} [U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t) + U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \cdot k - 120^\circ \cdot k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \cdot k + 120^\circ \cdot k) + U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \cdot k - 240^\circ \cdot k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \cdot k - 240^\circ \cdot k)]. \quad (1)$$

Результат у i -й комірниці регістра сум РС_м від напруг k_1 -ї складової ($k_1 = 3s + 1, s = 0, 1, 2, 3, \dots$), $N(ik_1\Delta t) = 3K_{1k} U_{2(k)m} \sin(\omega ik_1\Delta t)$; від напруг k_2 -ї складової ($k_2 = 3s + 2, s = 0, 1, 2, 3, \dots$), $N(ik_2\Delta t) = 3K_{1k} U_{2(k)m} \sin(\omega ik_2\Delta t)$; від напруг k_3 -ї складової ($k_3 = 3s + 3, s = 0, 1, 2, 3, \dots$), $N(ik_3\Delta t) = 3K_{1k} [U_{1(k)m} \sin(\omega ik_3\Delta t) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik_3\Delta t)]$.

В отриманому результаті на кожні три посліпіль гармонічні складові (k_1, k_2, k_3 , при однаковому s) відсутні дві НПП (для k_1, k_2 гармонічної складової). Тобто запропонований спосіб подавляє НПП основної частоти і без додаткових витрат втричі зменшує кількість НПП вищих гармонічних складових. Отриманий результат відповідає напрузі, яка стала "чистішою". Результати складання кодів миттєвих значень лінійних напруг із відповідними кутами зсуву, які запам'ятовано в регістрі РС_м, відображено для векторів НПП, НЗП ОЧ на рис. 3 (на якому $a = e^{j120^\circ}$). Таким чином, НЗП ОЧ збільшилася втричі.

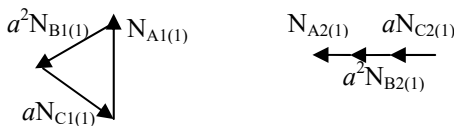


Рис. 3

Далі для отримання НЗП основної частоти з (1) виділяються коди напруги основної частоти. Для отримання НЗП k_1 -ї і k_2 -ї гармонічних складових із (1) виділяються коди напруги відповідно k_1 -ї і k_2 -ї частоти. Для вимірювання НПП основної частоти достатньо поміняти місцями в алгоритмі будь-які дві міжфазні напруги.

Запропонований метод більше ніж на порядок зменшує вимоги до точності виділення напруги основної частоти тому, що після складання кодів миттєвих значень практично зникає неінформативна домінуюча НПП ОЧ (яка є більшою за інформативну НЗП ОЧ приблизно в 50 разів). Також значно зменшується більшість НПП вищих гармонічних складових [10].

Висновки. Запропонований спосіб дає змогу в 20–50 разів зменшити вимоги до точності виділення кодів напруги і розрядності блоків Фур'є-перетворення при вимірюванні КА за зворотною послідовністю і характеризується НЗП ОЧ, тому що зникає необхідність виконувати обчислення з кодами міжфазних напруг, що містять домінуючу за модулем неінформативну НПП ОЧ.

Зменшено вплив вищих гармонічних складових на визначення КА, оскільки практично відсутні НПП більшості вищих гармонічних. Розроблено алгоритм визначення напруги симетричних складових, за яким складаються коди миттєвих значень міжфазних напруг, тому визначення НЗП ОЧ спрощується, оскільки виміряне значення збільшується в 3 рази порівняно з міжфазними напругами.

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. К., 1997.
2. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частоти та напруги з широтно-імпульсною модуляцією. К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. 340 с.
3. Xing Li, Mei Su, Yao Sun, Handbing Dan, Wenjing Xiong. Modulation strategies based on mathematical construction method for matrix converter extending the input reactive power range. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. Vol. 29. No 2. Pp. 654-664.
4. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И. Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 41-43.
5. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51. Issue 6. Pp. 581-588.
6. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С., Белецкий О.А. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов. *Технічна електродинаміка*, 2015. № 5. С. 3-11.

7. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 23 – 25.

8. Минц М.Я., Чинков В.Н., Гриб О.Г. Цифровой измеритель несимметрии трехфазной сети. А.с. СССР № 746336. Бюл. № 25. 1980.

9. Тесик Ю.Ф. Применение дифференциального метода к измерению показателей качества электроэнергии. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2005. № 3(12). С. 16 – 21.

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

УДК 621.317.789

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ И ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Д.К. Маков, канд.техн.наук

НТУУ "Киевский политехнический институт имени И. Сикорского",

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

E-mail: makodk47@gmail.com

Представлен новый метод аналого-цифрового определения симметричных составляющих трехфазного электрического напряжения. Он реализован следующей последовательностью операций: подстройкой, кратной трем, от частоты измерения мгновенных значений к основной частоте электрического напряжения; аналого-цифровым преобразованием мгновенных значений трехфазных напряжений с запоминанием полученных кодов; подавлением доминирующего неинформативного напряжения прямой последовательности основной частоты большинства высших гармоник и выделением кодов напряжений, которые содержат искомую симметричную составляющую, и выделением кодов напряжения основной частоты. По сравнению с известными метод характеризуется простотой и повышенной точностью. Библиограф. 10, рис. 3.

Ключевые слова: показатели качества электроэнергии, напряжения прямой и обратной последовательностей, частота.

METHOD OF DETERMINATION OF THREE-PHASE VOLTAGE ASYMMETRY OF FUNDAMENTAL FREQUENCY AND ULTRAHARMONICS

D.K. Makov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: makodk47@gmail.com

The new method of digital determination of symmetric phase-sequence system of three-phase electric voltages is presented. It uses the next operations: tuning multiple three frequency of measuring of instantaneous values to fundamental frequency of network voltage; analog-digital transformation of instantaneous values of three networks voltages and memorized it; selection of codes that contain the sought after symmetric phase-sequence; selection of codes of voltage of fundamental frequency. A method differs in simplicity and exactness. References 10, figures 3.

Key words: indexes of quality of electric power; negative phase-sequence system of voltages, positive phase-sequence system of voltages, coefficient of asymmetry.

1. Standart of Ukraine 13109-97. Norms of quality of electric energy are in the systems of power supply of general-purpose. Kyiv. 1997. (Rus)

2. Mykhalskyi V.M. Means for improving the quality of electrical energy on input and output of frequency converters and voltage ones with pulse-length modulation. Kyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2013. 340 p. (Ukr)

3. Xing Li, Mei Su, Yao Sun, Handbing Dan, Wenjing Xiong. Modulation strategies based on mathematical construction method for matrix converter extending the input reactive power range. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. Vol. 29. No 2. Pp. 654-664.

4. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M., Ushakov V.I. Computer Modeling of Electrothermal Processes and Thermomechanical Stress at Induction Heating of Moving Copper Ingots. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 2. Pp. 10–18. (Rus)

5. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51. Issue 6. Pp. 581-588.

6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivaschenko D.S., Beletsky O.A. Processes of energy exchange between nonlinear and linear links of electric equivalent circuit of supercapacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 5. Pp. 3–11. (Rus)

7. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivaschenko D.S. Modeling of Nonlinear Resistance of Electro-Spark Load Taking into Account its Changes During Discharge Current Flowing in the Load and et Zero Current in it. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 5. Pp. 23–25. (Rus)

8. Mints M.Ya., Chinkov V.N., Grib O.G. Digital measuring device of asymmetry of three-phase network. Patent of USSR No 746336. Publ. 1980. No 25. (Rus)

9. Tesik Yu. Application of differential method to measuring of indexes of quality of electric power. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2005. No 3(12). Pp. 16-21. (Rus)

10. Shcherba A.A., Serpilin K.L., Makov D.K. Method of the digital measuring of symmetric sequences of voltage of three-phase network. Patent of Ukraine UA № 72534. Publ. 2012. No 16. (Ukr)

Надійшла 06.03.2018
Остаточний варіант 20.03.2018