УДК 621.317.7

М. Й. Бурбело, д.т.н., проф.; В. І. Романовський, к.т.н, доц.

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ДЛЯ УСТАНОВОК ДИНАМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Запропоновано структурні схеми швидкодійного вимірювального каналу для установок динамічної компенсації реактивної потужності, основаного на інтегруванні миттєвих потужностей на ковзному інтервалі часу тривалістю півперіоду напруги живлення з використанням затримки в часі одного з ортогональних складників миттєвої потужності.

Ключові слова: розподільні електричні мережі, якість електричної енергії, реактивна потужність, динамічна компенсація.

Вступ

Застосування установок динамічної компенсації реактивної потужності в електричних мережах забезпечує одночасну оптимізацію низки параметрів якості електроенергії (усталеного відхилення, коливання та несиметрії напруги) і вимагає вдосконалення їхнього інформаційного забезпечення. Особливо складним € створення швидкодійних вимірювальних каналів параметрів, що характеризують несиметричність електричного трифазного навантаження. Зокрема це стосується вимірювальних каналів статичних тиристорних компенсаторів (СТК), статичних компенсаторів на базі інверторів напруги, призначених для динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування струмів і напруг у вузлах приєднання, які вимагають здійснення регулювальних дій із затримкою в часі, що не перевищує половини періоду напруги живлення.

Обґрунтування результатів

Для аналізу несиметричних режимів трифазних електричних мереж напругою 6, 10, 35 кВ з ізольованою нейтраллю використовують комплексну повну потужність і умовну потужність зворотної послідовності

$$\underline{S} = 3 \left(\dot{U}_{1} \overset{*}{I}_{1} + \dot{U}_{2} \overset{*}{I}_{2} \right) = 1,5 \left(\dot{U}_{\alpha} \overset{*}{I}_{\alpha} + \dot{U}_{\beta} \overset{*}{I}_{\beta} \right);$$
(1)

$$\underline{S}_{2} = 3 \left(\dot{U}_{1} \overset{*}{I}_{2} + \dot{U}_{2} \overset{*}{I}_{1} \right) = 1,5 \left(\dot{U}_{\alpha} \overset{*}{I}_{\alpha} - \dot{U}_{\beta} \overset{*}{I}_{\beta} \right),$$
(2)

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ – комплексні напруги та комплексні спряжені струми відповідно прямої та зворотної послідовностей; $\dot{U}_{\alpha}, \dot{U}_{\beta}, \dot{I}_{\alpha}, \dot{I}_{\beta}$ – комплексні напруги та комплексні спряжені струми в ортогональній системі координат Кларка.

У [1, 2] розроблено алгоритми для отримання інформації про активний та реактивний складники повної потужності $\underline{S} = P + jQ$, а в [3 – 6] про дійсний та уявний складники умовної потужності зворотної послідовності $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$, під час побудови яких використано підхід, що ґрунтується на інтегруванні добутку миттєвих напруг і струмів на ковзному інтервалі часу тривалістю півперіоду (*T*/2):

$$P(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}) dt; \quad Q(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}' i_{\alpha} + u_{\beta}' i_{\beta}) dt; \quad (3)$$

Наукові праці ВНТУ, 2014, № 3

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} - u_{\beta}i_{\beta})dt; \quad Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}'i_{\alpha} - u_{\beta}'i_{\beta})dt, \quad (4)$$

де u_{α}', u_{β}' – перетворення Гільберта ортогональних складників напруги.

Такий підхід відповідає теорії реактивної потужності С. Буденю.

Однак, як показано в [4, 5], перехідні характеристики вимірювального каналу для величин P_2, Q_2 , в основу реалізації якого покладено формули (4), мають значне перерегулювання, що негативно впливатиме на стійкість системи динамічної компенсації реактивної потужності. Для зменшення перерегулювання було запропоновано використання виразів [4]

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} - u_{\beta}'i_{\beta}')dt; Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}'i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta}')dt,$$
(5)

де *i_β*' – перетворення Гільберта ортогонального складника струму, застосування яких виключає перерегулювання системи динамічної компенсації реактивної потужності.

Недоліком вимірювального каналу є необхідність застосування трьох інтегрувальних перетворювачів Гільберта, досить складних у реалізації [7].

Для отримання складників потужностей можна також використати наявний фазовий зсув 90 електричних градусів, який існує між ортогональними складниками трифазних напруги та струму [5]:

$$P(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) + p_{\beta}(t)) dt; \quad Q(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q_{\alpha}(t) - q_{\beta}(t)) dt; \quad (6)$$

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) - p_{\beta}(t)) dt; \quad Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q_{\alpha}(t) + q_{\beta}(t)) dt,$$
(7)

де $q_{\alpha} = u_{\beta}i_{\alpha}; q_{\beta} = u_{\alpha}i_{\beta}$ – ортогональні складники миттєвих реактивних потужностей.

Такий підхід відповідає теорії реактивної потужності С. Фріз. Він виключає необхідність використання інтегрувального перетворення, що істотно спрощує реалізацію швидкодійних вимірювальних каналів. У той же час перерегулювання для величин P_2 , Q_2 буде значним [5].

З метою зменшення перерегулювання пропонуємо підхід, який полягає в застосуванні фазового зсуву на чверть періоду напруги живлення (*T*/4) сигналів, пропорційних ортогональним складниками миттєвих потужностей. Тоді замість (4) отримаємо

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) - p_{\beta}(t-T/4)) dt;$$

$$Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q'_{\alpha}(t) - q'_{\beta}(t-T/4)) dt,$$
(8)

а замість (7) отримаємо

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) - p_{\beta}(t-T/4)) dt;$$

$$Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q_{\alpha}(t) + q_{\beta}(t-T/4)) dt,$$
(9)

де $p_{\alpha} = u_{\alpha}i_{\alpha}$; $p_{\beta} = u_{\beta}i_{\beta}$; $q'_{\alpha} = u'_{\alpha}i_{\alpha}$; $q'_{\beta} = u'_{\beta}i_{\beta}$ – ортогональні складники миттєвих активних потужностей.

На рис. 1, а зображено залежності $p_{\alpha}(t)$, $p_{\beta}(t)$, $p_{\beta}(t - T/4)$, p(t), $p_{2}(t)$, а на рис. 1, б – Наукові праці ВНТУ, 2014, № 3 2 $q_{\alpha}(t), q_{\beta}(t), q_{\beta}(t - T/4), q(t), q_{2}(t)$, отримані шляхом математичного моделювання відповідно до формул (6), (9). Аналогічні залежності отримуємо за формулами (3), (8). Основною особливістю залежностей $p_{2}(t), q'_{2}(t), q_{2}(t)$, які входять у підінтегральні вирази (8) і (9), що забезпечують відсутність перерегулювання під час перехідного процесу, є мала амплітуда їхніх коливань. Саме завдяки цій особливості забезпечується відсутність перерегулювання на виході інтегрувальних пристроїв вимірювального каналу.



Рис. 1. Формування складників: a) $P(t), P_2(t);$ б) $Q(t), Q_2(t)$

На рис. 2, а зображено структурну схему вимірювального каналу, що реалізує алгоритм (8), який складається з трансформатора напруги *TH*, трансформаторів струму *TC*, масштабного перетворювача напруг *ПH*, масштабного перетворювача струмів у напруги *ПC*, перетворювачів потужності *ПП*1,..., *ПП*4, елементів затримки сигналів у часі *E3*1 та *E3*2, елемента ковзного інтегрування *EKI* (елементи затримки і ковзного інтегрування реалізують із використанням мікроконтролера). На структурній схемі вимірювального каналу (рис 2, б), що реалізує алгоритм (9), інтегратори відсутні.



б)Рис. 2. Структурні схеми вимірювального каналу:а) із використанням алгоритму (8); б) із використанням алгоритму (9)

Дослідимо роботу вимірювального каналу в перехідних режимах, наприклад, під час увімкнення до мережі несиметричного навантаження. На рис. 3, а і б подано перехідні характеристики вимірювального каналу для величин P, Q та P_2, Q_2 під час увімкнення до мережі 10 кВ несиметричного навантаження <u>S</u> = P + jQ = 925 + j291 кВ·А, <u>S</u>₂ = $P_2 + jQ_2 = 13 + j59$ кВ·А. Як випливає з наведених залежностей, перерегулювання під час увімкнення навантаження по всіх виходах вимірювального каналу відсутнє.



Рис. 3. Перехідні характеристики вимірювального каналу: а) для величин *P*, *Q*; б) для величин *P*₂, *Q*₂

Основними джерелами похибок вимірювального каналу є амплітудні та фазові похибки вимірювальних трансформаторів напруги і струму, а також похибки, зумовлені невідповідністю інтервалу інтегрування половині періоду напруги мережі [6].

Аналіз показав, що абсолютні похибки вимірювання несиметричних складників навантаження з використанням алгоритмів (8) і (9) не перевищують похибок вимірювання активної та реактивної потужностей. Використання алгоритму (8) можна рекомендувати за наявності несиметрії трифазної напруги і вищих гармонік у струмі навантаження. У той же час алгоритм (9) чутливий до несиметрії трифазної напруги, але інваріантний до наявності вищих гармонік у струмі навантаження.

Висновки

Отже, запропоновано вимірювальний канал параметрів несиметричних трифазних навантажень для пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності, в основу принципу дії якого покладено інтегрування миттєвих потужностей на ковзному інтервалі

часу, що дорівнює половині періоду напруги живлення, з використанням затримки в часі одного з ортогональних складників миттєвої потужності. Вимірювальний канал має достатню стійкість у перехідних режимах, а також характеризується відсутністю методичних похибок вимірювань за наявності несиметрії трифазної напруги і вищих гармонік струму навантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурбело М. Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 65 – 68.

2. Бурбело М. Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в перехідних режимах електроприводів / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2010. – 104 с.

3. Бурбело М. Й. Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 3. – С. 30 – 33.

4. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54 – 56.

5. Бурбело М. Й. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, М. В. Никитенко // Вісник НУ "Львівська політехніка" Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2010. – № 666. – С. 14 – 18.

6. Бурбело М. Й. Вимірювальний перетворювач параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 5. – С. 72 – 75.

7. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравновешивания) / Г. А. Штамбергер; под ред. К. Б. Карандеева. – Новосибирск: Наука, 1975. – 164 с.

Бурбело Михайло Йосипович – професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.

Романовський Володимир Ігорович – доцент кафедри електроенергетики.

Сумський державний університет.

M. I. Burbelo, Dr. Sc. (Eng.), Prof.; V. I. Romanovskiy, Cand. Sc. (Eng), Assist. Prof. MEASURING CHANNEL FOR UNITS OF REACTIVE POWER DYNAMIC COMPENSATION

Structural diagrams of fast acting measuring channel for units of reactive power dynamic compensation, based on integration of instantaneous powers on sliding time interval, that equals half cycle of supply voltage, using time delays during one of the orthogonal components of instantaneous power are suggested.

Key words: distributive electric grids, quality of electric energy, reactive power, dynamic compensation.

Introduction

Application of units of reactive power dynamic compensation in electric grids simultaneously provides optimization of certain parameters of electric energy quality (steady state deviation, oscillations voltages asymmetry) and requires improvement of their information support. Creation of fast-acting measuring channels of the parameters, characterizing the asymmetry of electric three-phase loading is the most complex problem. In particular, it concerns measuring channels of static thyristor compensators (STC), voltage inverter-based static compensators, intended for dynamic compensation of reactive power, voltages and currents balancing in the connection nodes of fast-changing loads of consumers, requiring regulation with time delay that does not exceed half cycle of supply voltage.

Substantiation of the results

Analysis of asymmetric modes of three-phase electric grids of 6, 10, 35 KV with isolated neutral is performed using complex total power and complex rated power of reverse sequence

$$\underline{S} = 3 \left(\dot{U}_1 \overset{*}{I}_1 + \dot{U}_2 \overset{*}{I}_2 \right) = 1,5 \left(\dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\alpha + \dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\beta \right); \tag{1}$$

$$\underline{S}_{2} = 3 \left(\dot{U}_{1} \overset{*}{I}_{2} + \dot{U}_{2} \overset{*}{I}_{1} \right) = 1,5 \left(\dot{U}_{\alpha} \overset{*}{I}_{\alpha} - \dot{U}_{\beta} \overset{*}{I}_{\beta} \right),$$
(2)

where $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ – complex voltages and complex conjugate currents of direct and reverse sequences, respectively; $\dot{U}_{\alpha}, \dot{U}_{\beta}, \dot{I}_{\alpha}, \dot{I}_{\beta}$ – complex voltages and complex conjugate currents in or Clark orthogonal coordinate system.

In [1, 2] algorithms for obtaining information regarding the components of total power $\underline{S} = P + jQ$ are developed, and in [3 - 6] – regarding the components of rated power of reverse sequence $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$, while construction of which, the approach, comprising the integration of the sum or difference of products of instantaneous voltages and currents (instantaneous powers) on sliding time interval that equals half cycle of supply voltage (T/2) is used:

$$P(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta})dt; \quad Q(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}'i_{\alpha} + u_{\beta}'i_{\beta})dt; \quad (3)$$

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} - u_{\beta}i_{\beta}) dt; \quad Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}'i_{\alpha} - u_{\beta}'i_{\beta}) dt, \quad (4)$$

where u_{α}', u_{β}' – orthogonal components of grid voltage after integrating transformation (in conditions of nonsinusoidality – after Gilbert transform, that provides phase shift of all harmonic Haykobi праці BHTY, 2014, № 3

components of the voltage on the angle, that equals 90 electrical degrees).

Such an approach corresponds to C. Budeanu theory of reactive power.

However, as it is shown in [4, 5], transient characteristics of measuring channel for values P_2, Q_2 , realized on the formulas (4), have considerable overshoot, that negatively influences the stability of the system of reactive power dynamic compensation. For decreasing the overshoot it was suggested to use the expressions [4]

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} - u_{\beta}i_{\beta}) dt; \quad Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta}) dt, \quad (5)$$

where i_{β}' – integrating conversion of orthogonal component of the current.

The drawback of measuring channel is the necessity to apply, in case of considerable nonsinusoidality of Gilbert transforms currents, which are rather complex in realization [7].

For obtaining of powers components 90 electrical degrees phase shift, existing between orthogonal components of three-phase voltage and current can be used [5]:

$$P(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) + p_{\beta}(t)) dt; \quad Q(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q_{\alpha}(t) - q_{\beta}(t)) dt; \quad (6)$$

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) - p_{\beta}(t)) dt; \quad Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q_{\alpha}(t) + q_{\beta}(t)) dt,$$
(7)

where $q_{\alpha} = u_{\beta}i_{\alpha}$; $q_{\beta} = u_{\alpha}i_{\beta}$ – orthogonal components of instantaneous reactive powers.

Such an approach corresponds to S. Fryze theory of reactive power. It excludes the necessity of using integrating transformation, that greatly simplifies the realization of fast-acting measuring channels. At the same time, overshoot for P_2, Q_2 values will be considerable [5].

In order to decrease overshoot, the approach, applying phase shift guadrature cycle of signal supply voltage (T/4), proportional to orthogonal components of instantaneous powers is suggested. Then, instead of (4) we obtain

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) - p_{\beta}(t-T/4)) dt;$$

$$Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q'_{\alpha}(t) - q'_{\beta}(t-T/4)) dt,$$
(8)

and instead of (7) we obtain

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) - p_{\beta}(t - T/4)) dt;$$

$$Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q_{\alpha}(t) + q_{\beta}(t - T/4)) dt,$$
(9)

where $p_{\alpha} = u_{\alpha}i_{\alpha}$; $p_{\beta} = u_{\beta}i_{\beta}$; $q'_{\alpha} = u'_{\alpha}i_{\alpha}$; $q'_{\beta} = u'_{\beta}i_{\beta}$ – orthogonal components of instantaneous powers.

Fig. 1 a, shows dependences $p_{\alpha}(t)$, $p_{\beta}(t)$, $p_{\beta}(t-T/4)$, p(t), $p_2(t)$, Fig. 1 b shows dependences $q_{\alpha}(t)$, $q_{\beta}(t)$, $q_{\beta}(t-T/4)$, q(t), $q_{2}(t)$, obtained by means of mathematical modeling in accordance with the formulas (6), (9). Similar dependences we obtain by the formulas (3), (8). Basic feature of dependences $p_{2}(t)$, $q'_{2}(t)$, $q_{2}(t)$ being the part of subintegral expressions (8) and (9), proving the lack of overshoot during transient process, is small amplitude of their oscillations. Due to

this characteristic feature the lack of overshoot at the output of integrating devices of measuring channel is provided.



Fig. 2 shows structural diagram of measuring channel, realizing the algorithm (8), that consists of voltage transformer (VT), current transformer (CT), scale converter of voltages (VC) scale converter of currents in voltages (CC), two integrators (I1), (I2), power converters (PC1,..., PC4), signal delay elements (DE1) and (DE2), sliding integration element (SIE) (elements of delay and sliding integration are realized, using microcontroller). In structural diagram of measuring channel (Fig. 2 b) realizing the algorithm (9) integrators are missing.



Fig. 2. Structural diagrams of measuring channel: a) using the algorithm (8); b) using the algorithm (9)

We investigate the operation of measuring channel in transient mode, for instance, while connection of unbalanced load to the grid. Fig. 3 a and b show transient characteristics of measuring channel for values P, Q and P_2, Q_2 while connection to 10 KV unbalanced load $\underline{S} = P + jQ = 925 + j291$ KV·A, $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 13 + j59$ KV·A. As it follows from the above-mentioned dependences, the overshoot while load connection of all the outputs of measuring channel is missing.



Fig. 3. Transient characteristics of measuring channel: a) for values P, Q; b) for values P_2, Q_2

Basic sources of measuring channel errors are amplitude and phase errors of measuring transformers of voltage and current as well as errors, caused by non-conformity of integration interval to halt cycle of grid voltage [6].

The analysis showed that absolute errors of load asymmetric components measurements using algorithms (8) and (9) do not exceed errors of active and reactive power measurement. Usage of the algorithm (8) can be recommended if asymmetry of three-phase voltage and higher harmonics are available in load current. At the same time, algorithm (9) is sensitive to asymmetry of three-phase voltage but is invariant to the presence of highest harmonics in load current.

Conclusions

Measuring channel of asymmetric three-phase load parameters for units of dynamic compensation of reactive power is suggested. The operation principle of the channel is based on integration of instantaneous powers on sliding time interval, that equals halt cycle of supply voltage, using time delay of one of orthogonal components of instantaneous power. Measuring channel is rather stable in transient modes, and is characterized by the lack of methodical errors of measurements in case of asymmetry of three-phase voltage and highest harmonics of load current.

REFERENCES

1. Бурбело М. Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 65 – 68.

2. Бурбело М. Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в перехідних режимах електроприводів / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2010. – 104 с.

3. Бурбело М. Й. Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж /

М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 3. – С. 30 – 33.

4. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54 – 56.

5. Бурбело М. Й. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, М. В. Никитенко // Вісник НУ "Львівська політехніка" Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2010. – № 666. – С. 14 – 18.

6. Бурбело М. Й. Вимірювальний перетворювач параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 5. – С. 72 – 75.

7. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравновешивания) / Г. А. Штамбергер; под ред. К. Б. Карандеева. – Новосибирск: Наука, 1975. – 164 с.

Burbelo Mykhailo – Dr. Sc. (Eng.), Professor with the Department of Electrical Engineering Systems of Energy Supply and Energy Management.

Vinnytsia National Technical University.

Romanovskiy Volodymir – Assistant Professor with the Department of Electrical Power Engineering. Sumy State University.